

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

ZLEPŠENÍ KVALITY ELEKTRICKÉ ENERGIE V SÍTI S ELEKTRICKOU OBLOUKOVOU PECÍ

IMPROVING POWER QUALITY IN THE NETWORK WITH AN ELECTRIC ARC FURNACE

DAVID SEGETH

Vedoucí práce: Čerňan Martin Ing.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Květen 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **David Segeth**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Zlepšení kvality elektrické energie v síti s elektrickou obloukovou pecí**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled požadavků na kvalitu elektrické energie.
- 2) Popište problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece.
- 3) Zpracujte přehled prostředků pro zlepšení kvality elektrické energie v průmyslovém areálu s elektrickou obloukovou pecí.
- 4) Navrhňte možná řešení pro konkrétní případ.
- 5) Porovnejte přínosy jednotlivých řešení na základě měření, případně na základě matematického modelu.

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 50160
- [2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. Voltage quality in electrical power systems. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755.
- [3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s., ISBN 978-80-01-04938-9.
- [4] TLUSTÝ, J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999

Vedoucí: Ing. Martin Čerňan

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Poděkování

Tato práce je vyústěním celého mého studia na Českém vysokém učení technickém v Praze a mého zájmu o danou problematiku.

Při psaní této práce jsem zejména ocenil pomoc a podporu pana inženýra Čerňana, který mi byl oporou nejenom po stránce poskytování informací k práci, ale také chci srdečně poděkovat za jeho vedení.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kolegům v práci za jejich pevné nervy a všestrannou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Bílé Vodě dne 5. května 2015

Anotace:

Práce se zabývá problematikou kvality elektrické energie v sítích s obloukovými pecemi. Především se jedná o problémy s vysokou hladinou flicker efektu a s kompenzací odběru jalového výkonu. V první části práce jsou popsány požadavky na kvalitu elektrické energie, které stanovuje zákon č. 458/2000 Sb. a související vyhlášky a normy. Další část práce je zaměřena na popis problémů, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece na síť. Poslední část práce se zabývá prostředky, které lze použít pro zlepšení kvality elektrické energie v závodě slévárny Metalurgie s.r.o. Chrudim.

Annotation:

This work deals with the quality of the electricity network with arc furnaces. Above all it is a problem with a high level of flicker effect and with power factor correction. In the first part there is described the requirements for power quality, which are set by law no. 458/2000 Coll. and related regulations and standards. Another part is focused on the description of the problems that caused the operation of electric arc furnac. The last part deals with resources that can be used to improve the quality of electricity in the plant foundry Metallurgy Ltd. Chrudim.

Obsah

1 Úvod.....	14
2 Parametry pro posouzení kvality elektrické energie.....	15
2.1 Velikost napájecího napětí.....	15
2.1.1 <i>Definice a původ úbytků napětí.....</i>	<i>15</i>
2.1.2 <i>Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance.....</i>	<i>16</i>
2.1.3 <i>Definice poklesu napětí.....</i>	<i>17</i>
2.1.4 <i>Původ poklesu napětí a přepětí.....</i>	<i>17</i>
2.2 Harmonické zkreslení.....	18
2.2.1 <i>Původ vyšších harmonických.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Matematické vzorce pro vyšší harmonické.....</i>	<i>19</i>
2.2.3 <i>Fourierova transformace.....</i>	<i>22</i>
2.2.4 <i>Harmonické a jejich šíření v síti.....</i>	<i>23</i>
2.2.5 <i>Zdroje vyšších harmonických napětí.....</i>	<i>25</i>
2.2.6 <i>Zdroje vyšších harmonických proudů.....</i>	<i>25</i>
2.2.7 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy.....</i>	<i>27</i>
2.2.8 <i>Problémy způsobené harmonickými napětími.....</i>	<i>30</i>
2.2.9 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti.....</i>	<i>32</i>
2.2.10 <i>Mezní hodnoty vyšších harmonických.....</i>	<i>32</i>
2.2.11 <i>Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických.....</i>	<i>37</i>
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt.....	39

2.3.1	<i>Příčiny kolísání napětí.....</i>	40
2.3.2	<i>Účinky kolísání napětí na světelné zdroje.....</i>	40
3.	Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece.....	42
3.1	Elektrický oblouk.....	42
3.1.1	<i>Stejnoseměrný elektrický oblouk.....</i>	44
3.1.2	<i>Střídavý elektrický oblouk.....</i>	45
3.2	Elektrické obloukové pece.....	46
3.2.1	<i>Pece s přímým obloukem.....</i>	46
3.2.2	<i>Pece s vodivým dnem.....</i>	47
3.2.3	<i>Pece s nevodivým dnem.....</i>	48
3.2.4	<i>Pece s nepřímým obloukem.....</i>	48
3.2.5	<i>Pece se zakrytým obloukem.....</i>	49
3.3	Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece.....	50
3.3.1	<i>Napájecí síť obloukové pece.....</i>	52
3.3.2	<i>Pecní transformátor.....</i>	52
3.3.3	<i>Krátká cesta.....</i>	52
3.3.4	<i>Elektrody obloukových pecí.....</i>	55
3.4	Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí.....	56
3.4.1	<i>První typ změn proudového zatížení.....</i>	56
3.4.2	<i>Druhý typ změn proudového zatížení</i>	56
3.4.3	<i>Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn.....</i>	56
3.5	Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť.....	58

3.5.1	<i>Omezení zkratových a velkých proudů.....</i>	<i>58</i>
3.5.2	<i>Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení.....</i>	<i>58</i>
3.5.3	<i>Nepřímá kompenzace.....</i>	<i>58</i>
3.5.4	<i>Přímá kompenzace.....</i>	<i>59</i>
3.5.5	<i>Séριο-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece.....</i>	<i>60</i>
4.	Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie, s.r.o.	63
4.1	<i>Naměřené průběhy ve “Slévárně TS2” v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim.....</i>	<i>63</i>
4.2	<i>Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim.....</i>	<i>70</i>
5.	Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece	75
5.1	<i>Matematický model obloukové pece.....</i>	<i>75</i>
5.2	<i>Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě.....</i>	<i>76</i>
6.	Závěr.....	80
	Seznam použité literatury.....	81

Seznam obrázků

Obr. č. 2.1 Definice poklesu napětí a přepětí.....	17
Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických.....	21
Obr. č. 2.3 3. a 5. harmonická proud.....	24
Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla.....	26
Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku	27
Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči.....	28
Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor.....	30
Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže.....	31
Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže.....	32
Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě.....	40
Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě.....	41
Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky.....	42
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku.....	43
Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích	44
Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk.....	44
Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem.....	45
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností.....	46
Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem.....	47
Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem.....	47
Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem.....	48
Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem.....	49
Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem.....	49
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí.....	50
Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť.....	51
Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece.....	53
Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty.....	54

Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace.....	59
Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem.....	59
Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem	59
Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece.....	60
Obr. č. 3.20 Vektorový diagram sério-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece	61
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1.....	64
Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2.....	64
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1.....	65
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází	65
Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází	66
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1.....	66
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické.....	71
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické.....	71
Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů.....	72
Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2.....	74
Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky	78
Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavně.....	79

Seznam tabulek

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn	33
Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn	37
Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče	73
Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty.....	76

1. Úvod

Elektrická energie jakožto spotřební zboží musí podléhat mnoha parametrům, tak aby bylo možno posuzovat její kvalitu. V dřívějších dobách nám pro posouzení kvality elektrické energie stačily pouze dva základní ukazatele. Tím prvním je velikost napětí sítě a kmitočet. Postupem času se, ale díky masivnímu rozvoji v elektrotechnice a elektronice tyto dva základní parametry ukazují jako nedostatečné pro objektivní posouzení parametrů sítě. Postupem času díky ekologickým a hospodářským tlakům došlo k masivnějšímu rozšíření elektrických zařízení s úsporným provozem. Většina těchto zařízení má nelineární nebo proměnlivé provozní charakteristiky. S tímto vývojem jsou pak spjaty stále více se projevující zpětné vlivy na síť. Tyto zpětné vlivy pak následně mohou za určitých podmínek negativně ovlivňovat provoz jiných elektrických zařízení.

Kvalita elektrické energie je v poslední době velice diskutovaným tématem a to jak z energetických tak ekonomických důvodů. Z energetického pohledu jde převážně o dodržení dodávek elektrické energie odpovídajících parametrů a o dodržení směrnic o elektromagnetické kompatibilitě. Ekonomický dopad je pak dán hlavně nevhodným technickým řešením, které se následně projeví, jako zvýšení ztrát, přerušování dodávky nebo sankcí za porušení smluvních dohod.

Rostoucí úroveň energetického rušení je úzce spjatá s nárůstem moderních spotřebičů u odběratelů. V dřívějších dobách se u odběratelů nevyskytovali spotřebiče jako frekvenční měniče, spínané zdroje apod. a u odběratelů se většinou nacházely pouze asynchronní motory a spotřebiče s odporovým charakterem. Tento typ spotřebičů vyžadoval pouze paralelní kompenzaci odběru jalového výkonu. Pro paralelní kompenzaci se v dnešní době převážně využívají kompenzační kondenzátory. Tento typ kompenzace je v dnešní době stále hojně využíván, avšak s nárůstem energetického rušení už není v některých případech možné připojit pouze kompenzační kondenzátory, ale je nutné tyto kondenzátory chránit před účinky rušení sítě.

Tato práce práci se zabývá především kompenzací jalového odběru a úrovní flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí.

2. Parametry pro posouzení kvality elektrické energie

Dodávky elektrické energie se řídí dle PPDS (Pravidel provozování distribučních soustav), které vychází ze zákona č. 458/2000 Sb. a z vyhlášky č. 540/2005 Sb. Pro technické posouzení kvality elektrické energie se práce bude zabývat pouze těmi ukazateli, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160 a v PNE 33 3430. Norma ČSN EN 50160 uvádí hlavní parametry elektrické energie v místech připojení odběratelů z veřejné distribuční sítě. Tato norma platí jak pro síť NN tak i pro síť VN. Mezi tyto ukazatele patří:

- Velikost napájecího napětí (poklesy napětí a přepětí)
- Harmonické zkreslení
- Rychlé změny napětí (flicker efekt)
- Symetrie třífázového napětí

Podrobněji budu jednotlivé z těchto ukazatelů popisovat dále.

2.1 Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dle normy ČSN EN 50160 definována pro společný napájecí bod (PCC). Úbytky napětí jsou závislé na velikosti protékajícího proudu a na vzdálenosti spotřebitele. Tyto úbytky se se u různých spotřebitelů liší a mění se v závislosti na čase. Distribuční síť musí udržet napětí v rozmezí $U_n \pm 10\%$ a to bez ohledu na odběr spotřebitele.

2.1.1 Definice a původ úbytků napětí

Rozdíl mezi napětím ve společném napájecím bodě U_1 a napětím v místě odběru U můžeme definovat následujícím vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U \quad (2.1)$$

nebo v procentech

$$\Delta U_{\%} = \left[\frac{U_1 - U}{U_n} \right] * 100 \quad (2.2)$$

kde U_1 , U a U_n jsou absolutní hodnoty fázorů fázového napětí.

Dále může být úbytek napětí definován následovně (při zanedbání činného úbytku na reaktanci a jalového úbytku na odporu):

$$\Delta U = I_{\tilde{c}} R_s + I_j X_s \quad (2.3)$$

kde R_s a X_s je činná a induktivní část síťové impedance, I_c a I_j je činná a jalová (předpokládá se induktivní) část odběrového proudu. Pro výpočet úbytku napětí pro základní harmonickou by měla být brána v úvahu:

- pro jednofázové odběry impedance smyčky Z_f (impedance fázového vodiče) + Z_n (impedance středního vodiče)
- pro symetrické trojfázové odběry impedance Z_f

V normě ČSN EN 61000-3-1 se uvádí, že pro spotřebitelskou síť o frekvenci 50Hz mají být použity tyto impedance:

Impedance fázového vodiče:

$$Z_f = 0,24 + j0,15 \Omega \quad (2.4)$$

Impedance středního vodiče :

$$Z_n = 0,16 + j0,1 \Omega \quad (2.5)$$

Impedance související s úbytkem napětí se skládá ze dvou částí, a to induktivní části, která je dána zejména rozptylovou indukčností transformátoru a odporovou částí, kterou tvoří zejména odpor vodiče nízkého napětí. Vzhledem k poměru velikostí obou částí impedance je možné v síti nízkého napětí uvažovat, že pokles napětí mezi napájecím bodem sítě a spotřebitelem odpovídá ztrátám na odporu vedení ($\Delta U \approx RI^2$)

2.1.2 Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance

Pokud se napětí sítě bude pohybovat mimo vymezené tolerance může to způsobovat u spotřebitelů značné problémy:

vyšší než dovolené napětí

Pokud je hodnota napětí vyšší než dovolená bude to u spotřebitele způsobovat zkracování životnosti zařízení (např. žárovky) a bude docházet ke zkracování životnosti izolace. Dále se také zvýší ztráty a výrazně vzroste poruchovost zařízení.

nižší než dovolené

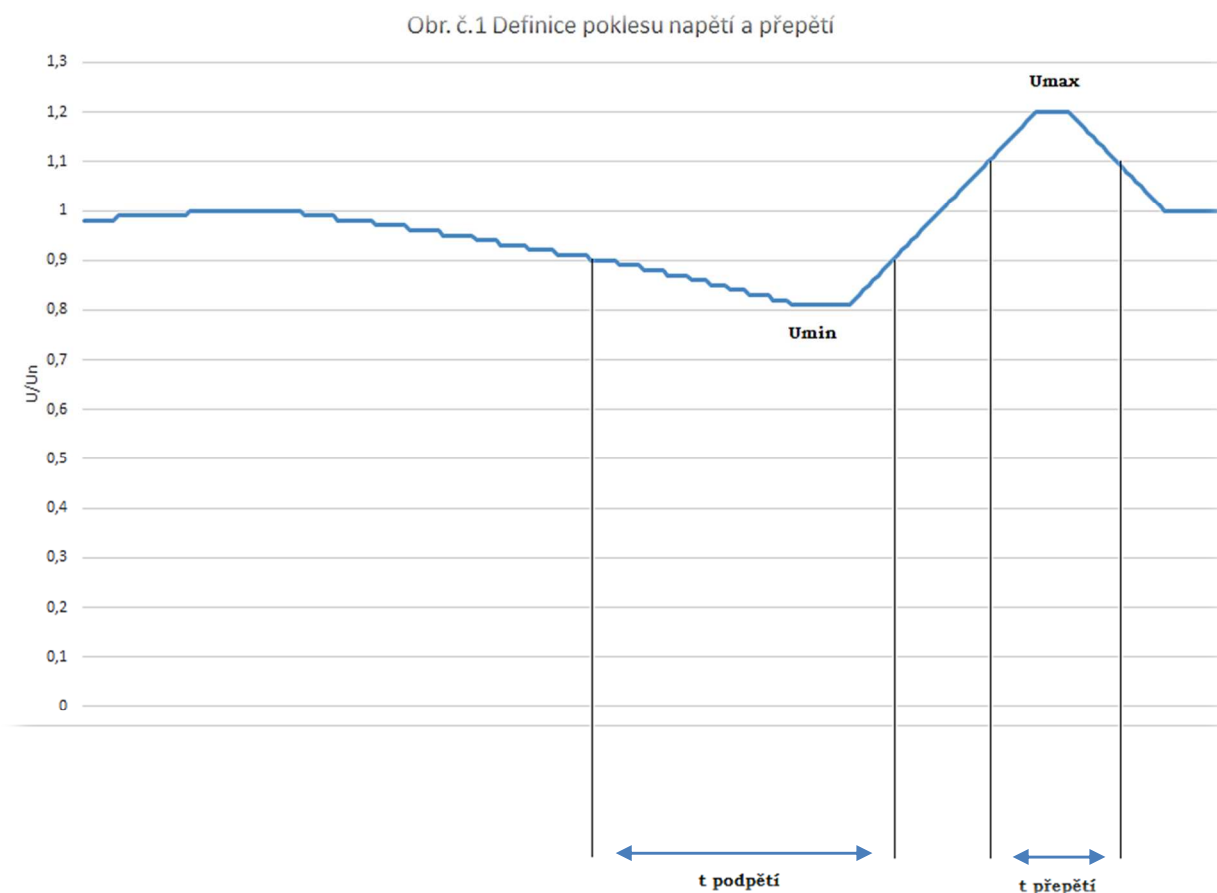
Pokud je hodnota napětí nižší než dovolená způsobí to pokles výkonu zařízení a to pak nedokáže udržet jmenovité parametry. Při dalším poklesu napětí se může začít projevovat nefunkčnost různých typů zařízení, nebo dokonce nemožnost jejich zapnutí.

2.1.3 Definice poklesu napětí

Změny napětí jsou definovány pomocí efektivní hodnoty napětí. Dle normy ČSN EN 61000-3-3 je změna napětí charakterizována těmito ukazateli:

- Trvání napěťového poklesu
- Nejmenší poměrné napětí v době poklesu napětí
- Trvání přepětí
- Poměrné napětí v době přepětí

Definice těchto ukazatelů je uvedena na obrázku č. 2.1



Obr. č.2.1 Definice poklesu napětí a přepětí

2.1.4 Původ poklesu napětí a přepětí

V běžném provozu se napětí pohybuje ve stanovených mezích. Dle specifikací uvedených v normě ČSN EN 50160 je měřené napětí v průběhu jakéhokoliv týdne v roce dáno 95% statistickou hodnotou zprůměrovaných 10 minutových měření hodnot efektivních hodnot napětí. Tato hodnota se pak musí pohybovat v mezích daných touto normou. V případě zbývajících 5% neexistuje žádné nařízení. To ale neznamená, že se napětí může pohybovat v libovolných mezích.

Původy poklesu napětí a přepětí se dají rozdělit na dva typy:

- Vytvářené nebo ovlivněné spotřebiteli
- Způsobené chybami sítě

Mezi první typ patří například náhlé odlehčení sítě po odepnutí zařízení většího výkonu. Mezi druhý typ patří například chyby způsobené zkratem nebo nedostatečně rychlým řízením elektrického systému (pomalé reakce na aktuální zatížení sítě).

Dále se tyto poklesy a přepětí dají rozdělit dle doby trvání:

- Krátké
- Dlouhé

Krátké poklesy nebo přerušení napětí mohou být eliminovány správným nastavením ochran a použitím záložních zdrojů UPS.

Dlouhé poklesy napětí se nazývají výpadky a jsou většinou způsobeny poruchami na vedení nebo u zdroje.

2.2 Harmonické zkreslení

V distribučních a průmyslových sítích se v dnešní době nevyskytují čistě sinusové průběhy napětí a proudu s frekvencí 50 Hz. Stále častěji se v sítích objevují i celé násobky základní harmonické (50 Hz) a těm říkáme vyšší harmonické. Zdrojem těchto vyšších harmonických jsou zařízení s nesinusovými proudy. Tyto zařízení lze rozdělit do dvou skupin:

- Elektrická zařízení s obsahem polovodičových prvků. Mezi tyto prvky patří například: usměrňovače, motory s frekvenčním měničem, pulzní zdroje, stmívače, apod.
- Elektrická zařízení, která ze svého principu funkce odebírají ze sítě nesinusové proudy a vykazují nelineární voltampérové charakteristiky. Mezi ně patří: středofrekvenční a obloukové pece, plynové výbojky, zářivky, indukčnosti, apod.

2.2.1 Původ vyšších harmonických

Překročení napětí, vyšší harmonické, přes hodnotu odolnosti proti rušení, se u připojeného zařízení, projeví následujícími způsoby:

- Snížení životnosti a tím způsobenými předčasnými výpadky zařízení citlivými na tepelné přetížení, jako jsou kondenzátory a motory
- Poruchami funkce elektronických zařízení
- Chybnou funkcí ochran
- Nesprávnou funkcí přijímačů HDO (Hromadné dálkové ovládání).
- Nepříznivé ovlivnění zhášení oblouku zemních spojení díky vyšším harmonickým

Z výše uvedených důvodů musí provozovatel distribuční sítě nucen dbát, aby napětí vyšších harmonických nepřekračovala stanovené meze.

Účinky vyšších harmonických se ještě násobí díky skinefektu. Činné odpory vodičů i vinutí strojů vzrůstají a tím rostou i jejich ztráty. Odpor roste rychleji u vícevrstvých vinutí (např. u transformátorů). Vodiče a vinutí strojů navržené na 50 Hz, často nevyhoví z hlediska ztrát od vyšších harmonických. Pokud se v síti vyskytnou proudy vyšších harmonických, vznikají ve vodičích přídavné činné ztráty. Tyto ztráty způsobené vyššími harmonickými se snažíme omezit na minimum a co nejlépe u zdroje těchto harmonických. Snížení podílu vyšších harmonických se provádí výměnou samotného zařízení (s jinou konstrukcí nebo jiným principem funkce) pokud je to možné po technické nebo ekonomické stránce, nebo filtrací vyšších harmonických pomocí filtrů.

2.2.2 Matematické vzorce pro vyšší harmonické

Nesinusové průběhy proudu a napětí se rozkládají na řadu sinusových průběhů pomocí Fourierova teorému. Napětí a proud je popsán dle vztahů (2.6) a (2.7).

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \quad [V] \quad (2.6)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^q I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{I,n}) \quad [A] \quad (2.7)$$

Efektivní hodnotu napětí určíme dle rovnice (2.8) vycházející z rovnice (2.6)

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^q U_n^2} \quad [V] \quad (2.8)$$

U_n pro $n = 1, 2, 3, \dots$ jsou efektivní hodnoty napětí jednotlivých harmonických

Následně podobně určíme rovnici pro efektivní hodnotu proudu (2.9), která vychází z rovnice (2.7)

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^q I_n^2} \quad [A] \quad (2.9)$$

pro $n = 1, 2, 3, \dots$

obsah základní harmonické (1. harmonické)

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{I} \quad [-] \quad (2.10)$$

nebo

$$g = \frac{I_1}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.11)$$

obsah vyšších harmonických proudů

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad [-] \quad (2.12)$$

nebo

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.13)$$

obdobné vztahy platí pro napětí.

Dle současných norem se pro posouzení celkového harmonického zkreslení používají koeficient zkreslení proudu k_{ZI} a koeficient zkreslení napětí k_{ZU} nebo častěji používaná zkratka THD (Total Harmonic Distorsion). Tyto koeficienty se určí z rovnic (2.14) a (2.15).

$$k_{ZI} = THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

$$k_{ZU} = THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U} * 100 \quad [\%] \quad (2.15)$$

Vztahy pro výkony:

Obecně platí pro střední hodnotu činného výkonu střídavého proudu rovnice (2.16)

$$P = \int_0^T u(t) * i(t) * dt \quad (2.16)$$

Po dosazení do rovnice (2.16) za $u(t)$ a $i(t)$ a při použití ortogonality goniometrických funkcí pro činný výkon platí rovnice (2.17).

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.17)$$

$$\text{Kde} \quad \varphi_n = \varphi_{U,n} - \varphi_{I,n}$$

Tedy

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 + P_1 + P_2 + \dots \quad (2.18)$$

Z rovnice (2.18) vyplývá, že střední hodnota výkonu obecně střídavého proudu se rovná součtu středních hodnot výkonů jednotlivých harmonických. To znamená, že napětí a proud dvou různých kmitočtů nedávají trvale žádný výkon.

Střední hodnota jalového výkonu je definována analogicky jako součet středních hodnot jalových výkonů jednotlivých harmonických:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.19)$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu je definována jako součin efektivních hodnot proudu a napětí:

$$S = U * I = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)} \quad (2.20)$$

Poměr činného a zdánlivého výkonu označujeme jako činitel výkonu, případně jako opravdový účinník:

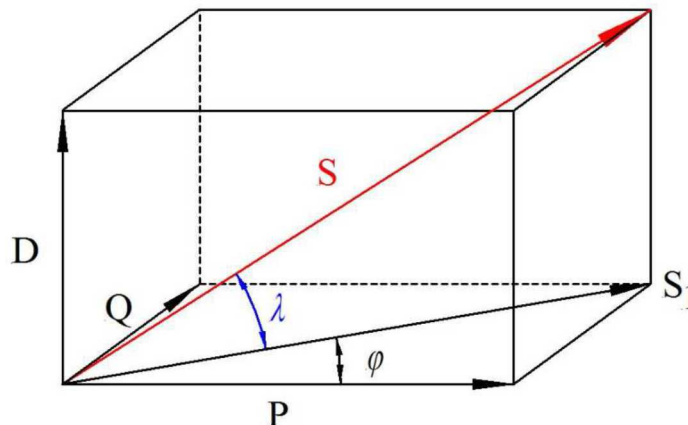
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n}{\sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)}} \quad (2.21)$$

Pro zdánlivý výkon také platí:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.22)$$

Kde D je tzv. deformační výkon, který je produktem efektivních hodnot harmonických různého řádu včetně jejich součinů se stejnosměrnými složkami napětí a proudu. Deformační výkon způsobuje, že není-li mezi harmonickými proudy a napětí fázový posuv, je přesto činitel výkonu $\lambda < 1$.

Geometricky lze vztahy mezi činným, jalovým, zdánlivým a deformačním výkonem vyjádřit pomocí obrázku č. 2.2.



Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických [4]

2.2.3 Fourierova transformace

Analytická metoda

Rozklad libovolné periodické funkce na konečnou nebo nekonečnou řadu harmonických funkcí řeší harmonická analýza na základě tzv. Fourierova teorému.

Periodická funkce $f(v)$, kterou budeme dále analyzovat, musí splňovat Dirichletovy podmínky:

1. funkce $f(v)$ je v konečném počtu intervalů spojitá a monotónní
2. má konečný počet extrémů

Řadu vzniklou rozkladem periodické funkce nazýváme Fourierovou řadou. Jejimi členy jsou jednotlivé harmonické. Dále budeme používat trigonometrické vyjádření Fourierovy řady.

Podle Fourierova teorému je možné periodickou funkci rozložit v řadu:

$$f(\vartheta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega_1 t) + B_n \sin(n\omega_1 t)) \quad (2.23)$$

$$f(v) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2.24)$$

kde nové konstanty řady pro n -tou harmonickou jsou:

$$A_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \cos(n\omega_1 t) dt \quad (2.25)$$

pro $n=0, 1, 2, \dots$

$$B_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \sin(n\omega_1 t) dt \quad (2.26)$$

pro $n=1, 2, \dots$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.27)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (2.28)$$

Numerická metoda

Numerické metody harmonické analýzy nahrazují integrály rovnice přibližnými součty (numerická integrace), které lze pro různé případy upravit. Pro výpočet koeficientů Fourierovy řady periodického signálu můžeme rovněž vyjít z klasické definice diskrétní Fourierovy transformace:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT)e^{-jn\omega T} \quad (2.29)$$

kde:	T	je vzdálenost mezi vzorky
	K	je počet vzorků za periodu
	$T_1=T \cdot K$	je délka periody
	S(kT)	je hodnota vzorku

Po úpravách dostaneme:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right] \quad (2.30)$$

Při porovnání se vztahem dostaneme:

$$\hat{c} = \frac{\hat{S}(n\omega_1)}{K} \quad \hat{C}_n = 2\hat{c} \quad C_0 = \frac{S_0}{K} \quad (2.31)$$

$$\hat{C}_n = \operatorname{Re}\{\hat{C}_n\} + j\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\} \quad (2.32)$$

$$C_n = \sqrt{(\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\})^2 + (\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\})^2} \quad (2.33)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\}}{\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\}} \quad (2.34)$$

2.2.4 Harmonické a jejich šíření v síti

V trojfázovém systému jsou harmonické ve třech fázích, ale s frekvencí odpovídající jejich řádu. Harmonické mohou být reprezentovány fázory v kruhovém diagramu, stejně jako fázory základní harmonické, a jejich fázový posun je definován symetrickými složkami. Obecně pro k-tou harmonickou platí rovnice (2.35).

$$I_k^b = I_k^a e^{-jk120^\circ} \quad a \quad I_k^c = I_k^a e^{-jk240^\circ} \quad (2.35)$$

Souměrný trojfázový systém sousledné, zpětné a netočivé (nulové) složky je následující:

Netočivá harmonická složka:

$$k = 3n \quad (2.36)$$

Sousledná harmonická složka:

$$k = 3n + 1 \quad (2.37)$$

Zpětná harmonická složka:

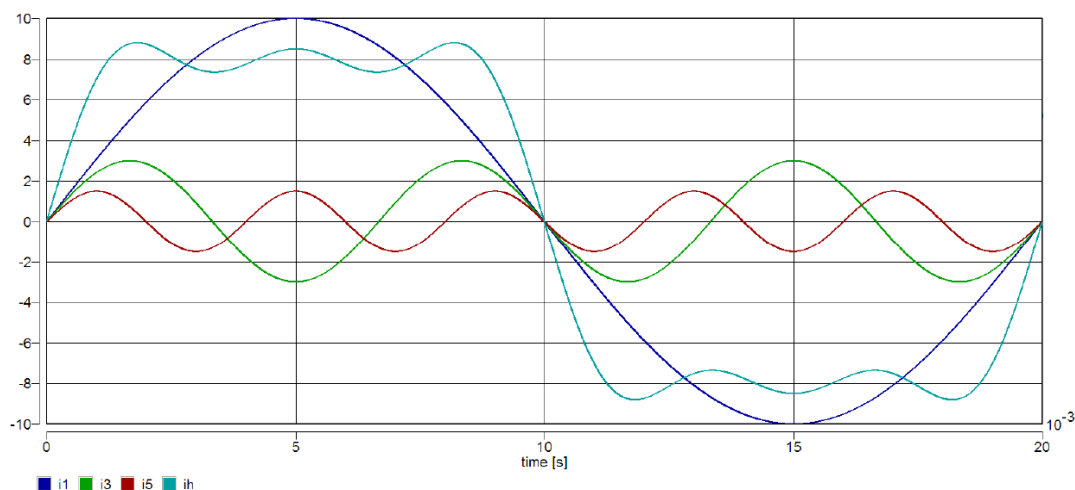
$$k = 3n - 1 \quad (2.38)$$

Kde:

k je řád harmonické

n=1, 2, 3, ...

Z předešlého vyplývá, že třetí harmonické proudy se přidávají k netočivým složkám proudu, příspěvek proudu ve střední vodiči tedy potom odpovídá trojnásobku proudu třetí harmonické. Pokud je amplituda třetí harmonické proudu téměř rovna amplitudě základní harmonické, potom ve středním vodiči trojfázového systému poteče okolo dvoj až trojnásobku proudu fázového vodiči. V případě symetrické zátěže přispívá pátá harmonická do zpětné složky proudu. Středním vodičem tedy tečou pouze asymetrické složky proudu – ty, které přispívají do netočivé složky harmonických proudů, můžeme harmonické proudy generované nelineární zátěží sčítat také v asymetrickém případě. Jednotlivé harmonické proudy zátěží lze počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů zátěží potom vede k výsledkům pro každou větev a vektorový součet proudů jednotlivých větví dává výsledný proud transformátoru.



Obr. 2.3 3. a 5. harmonická proudu [4]

2.2.5 Zdroje vyšších harmonických napětí

Alternátory

Vznik vyšších harmonických je dán drážkováním ve statoru a lze jej omezit použitím zlomkového vinutí. Druhým důvodem vzniku vyšších harmonických je nesinusové rozdělení magnetického pole v rotoru, zapříčiněné drážkami v rotoru turboalternátorů, resp. Vyniklými póly u hydroalternátorů.

Asynchronní motory

Vyšší harmonické zde vznikají vlivem drážkování statoru a rotoru. Zlomkové vinutí nepřináší požadované snížení vyšších harmonických. Možným opatřením je použití sešikmení drážek.

2.2.6 Zdroje vyšších harmonických proudů

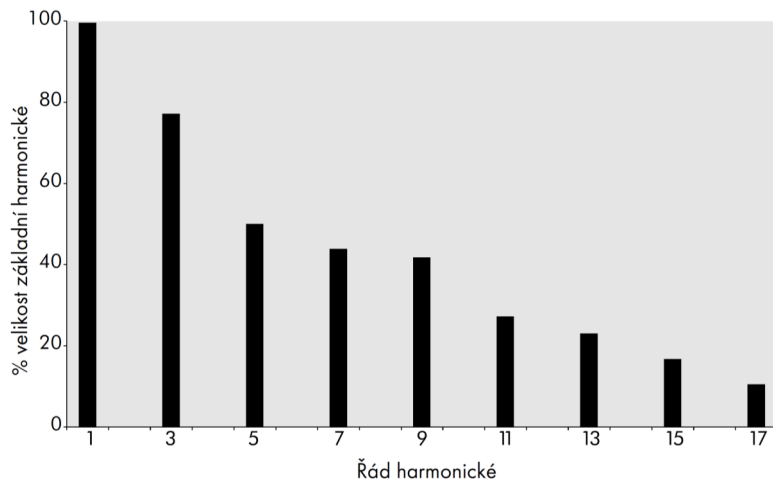
Korona

Korona je zdrojem 5. a 7. harmonické a v případě uzemněného uzlu 3. a 9. harmonického proudu.

Zářivky, plynové výbojky a domácí spotřebiče

Problematiku rušení těchto spotřebičů řeší ČSN EN 61000-3-2. V této normě stanoveny jak všeobecné požadavky a mezní hodnoty pro zařízení, ale také praktické metody typových zkoušek. Norma pokrývá oblast spotřebičů 50 Hz a napětí 230/400V způsobující generaci harmonických nízkých řádů do 40. harmonické.

Elektronické předřadníky svítidel se v posledních letech staly velmi populárními, protože se díky nim vylepšila účinnost svítidel. Jejich největší nevýhodou je, že generují harmonické v odebíraném proudu. Typy s kompenzací účinníku jsou díky své vysoké ceně dostupné pouze pro výkonově větší svítidla. Malé jednotky jsou většinou bez kompenzace. Typické spektrum kompaktního svítidla ukazuje obr. č. 2.4



Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla [8]

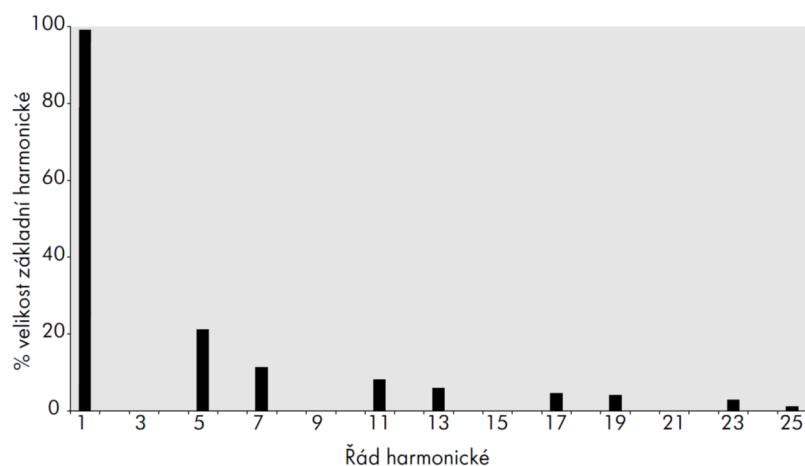
Transformátory

U transformátorů je vznik vyšších harmonických způsoben nelineární charakteristikou magnetizačního proudu a toku.

Usměrňovače a měniče

Elektronické regulátory otáček, UPS jednotky a usměrňovače jsou obecně založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako tzv. šestipulsní můstek, protože se zde vyskytuje 6 pulsů za jednu periodu na jeho stejnosměrném výstupu.

Šestipulsní můstek generuje harmonické v řádu $6n \pm 1$, tzv. v řádu o jeden vyšší a o jeden nižší než je šestinásobek základní harmonické. Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické, takže může být 20% páté harmonické a 9% jedenácté harmonické, atd. Typické spektrum šestipulsního můstku je na obr. č. 2.5.



Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku [8]

Velikost harmonických se výrazně redukuje použitím vícepulsních můstků jako je například 12-ti pulsů, jehož napájení je z transformátorového vinutím zapojeného hvězda/trojúhelník s 30-ti stupňovým fázovým posuvem mezi těmito vinutími.

Teoreticky jsou u tohoto můstku harmonické řádu $6n$ odstraněny, ale v praxi hodnota jejich omezení závisí na „přizpůsobení“ střídače, které je často s faktorem mezi 20 a 50. Harmonické řádu $12n$ zůstávají nezměněny. Při tomto zapojení není redukován jen celkový harmonický proud, ale zůstávají pouze harmonické proudy vyšších řádů, pro které je návrh filtru mnohem snadnější.

Často jsou kroky k omezení vyšších harmonických již provedeny od výrobce např. přidáním filtrů nebo sériových indukčností.

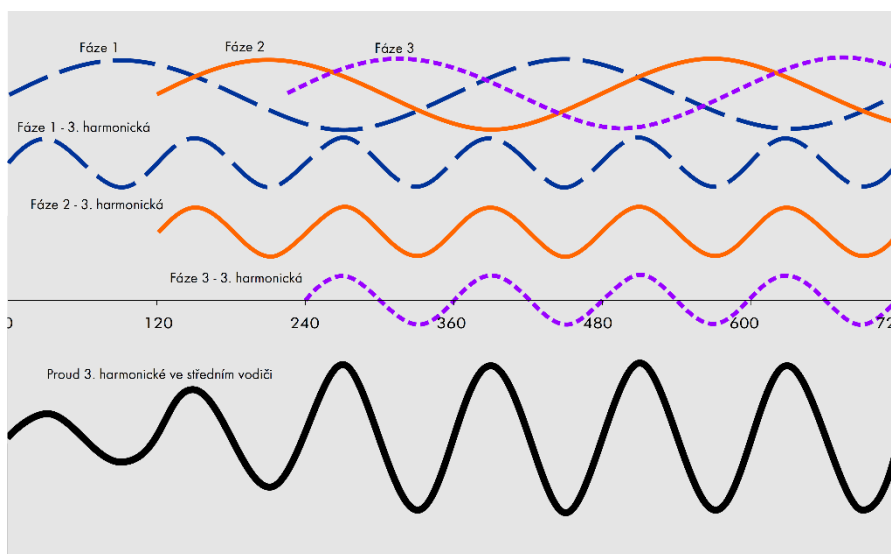
Další zvýšení počtu pulsů na 24 dosáhneme použitím dvou paralelních 12-ti pulsů jednotek s fázovým posuvem 15 stupňů. Toto řešení vede k omezení vyšších harmonických o cca 4,5%.

2.2.7 Problémy způsobené harmonickými proudy

Přetížení (přehřívání) středního vodiče

Při symetrickém zatížení v trojfázové síti, kde jsou napětí vzájemně posunuta o 120° , je výsledný proud středními vodiči nulový. Pokud je ale zatížení nesymetrické, pak ve středním vodiči protéká proud, který je dán výsledkem vektorového součtu jednotlivých fázových proudů.

I pokud je zatížení jednotlivých fází rovnoměrné a středním vodičem neteče proud základní harmonické neplatí to pro proudy vyšších harmonických a to hlavně pro proudy třetí harmonické a její násobky, které se naopak ve středním vodiči sčítají viz. obr. č. 2.6.



Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči. [8]

Vlivy na transformátory

Transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem. Za prvé, ztráty vířivými proudy, které jsou normálně na úrovni kolem 10% ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Ve skutečnosti u transformátoru plně zatíženého nelineárně zátěží IT technologií budou celkové ztráty dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěží. Výsledkem toho je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost. Prakticky za těchto okolností může být snížena životnost transformátoru ze 40 let až na 40 dní! Naštěstí jen málo transformátorů je plně zatíženo, ale tento jev musí být uvažován při volbě zařízení.

Druhý vliv je spojen s 3n harmonickými. U vinutí zapojeného do trojúhelníka jsou tyto harmonické ve fázi, takže se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tedy pro 3n harmonické je transformátor zapojený do trojúhelníka jako izolační, přičemž harmonické jiných řad transformátorem procházejí. Cirkulující 3n harmonické proudy musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru.

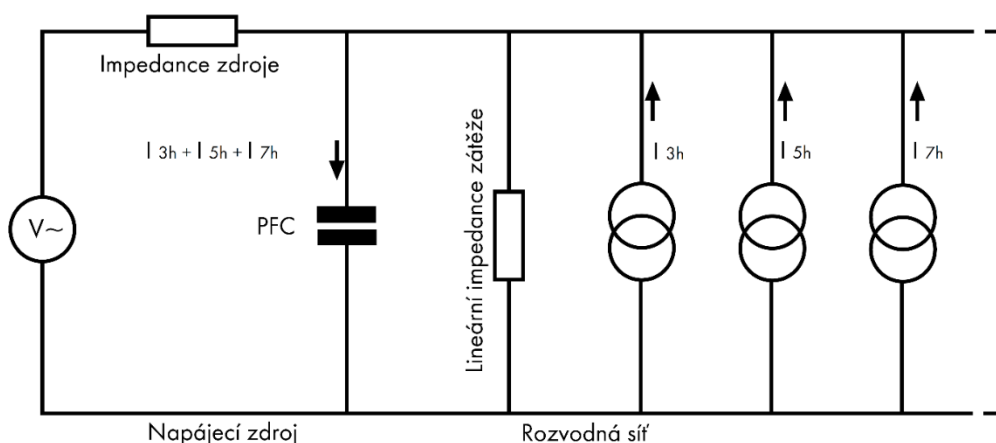
Rušení při spínání vypínačů

Proudové chrániče vypínají, jestliže je součet proudů ve fázových vodičích a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Rušení při spínání těchto vypínačů může být způsobeno harmonickými ze dvou důvodů. Za prvé tyto vypínače jako elektromechanická zařízení nemusí sčítat harmonické složky proudu korektně a proto vypínají chybně. Za druhé, některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které musí být filtrovány v napájecím obvodu zařízení. Filtry, které se normálně k tomuto účelu užívají, mají zapojeny kondenzátory mezi fázemi, středním vodičem a zemí, a díky tomu teče malý proud do země (svodový proud). Velikost tohoto proudu je limitována normami, dle kterých musí být menší než 3,5 mA, a obvykle je mnohem menší, ale je-li zařízení připojeno pouze do jednoho obvodu, může tento svodový proud způsobit vypnutí. Tuto situaci lze jednoduše řešit využitím více obvodů, z nichž každý napájí několik zátěží.

Rušení při spínání miniaturních vypínačů je vesměs způsobeno tím, že protékající proud je větší, než očekávaný dle výpočtů nebo jednoduchých měření, právě vlivem harmonických. Mnoho přenosných měřících přístrojů neměří správně efektivní hodnoty a pak mohou být podhodnoceny nesinusové proudy až o 40%.

Přetěžování kompenzačních kondenzátorů

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při induktivní zátěži (jako jsou např. indukční motory). Na obr. 2.7 je uvedeno náhradní schéma pro kompenzační kondenzátor s nelineární zátěží. Impedance kondenzátoru klesá s kmitočtem, zatímco impedance sítě, která je obecně induktivní, se stoupajícím kmitočtem roste. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudu vyšších řádů, a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k poškození kondenzátoru.



Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor [8]

Váženějším problémem je rezonance kapacity kondenzátoru s indukčností napájecí sítě v blízkosti harmonických kmitočtů (které se vyskytují ve 100 Hz intervalech). V takových případech se mohou objevit velké hodnoty napětí nebo proudů, které často vedou k haváriím kompenzačních jednotek.

Rezonancím se můžeme vyvarovat tak, že ke kondenzátorům přidáme do série takovou tlumivku (indukčnost), aby celková impedance byla induktivní pro nejmenší výraznou harmonickou. Toto řešení omezuje harmonický proud tekoucí do kondenzátoru. Velikost sériové tlumivky může být problém zejména, jsou-li přítomny harmonické nízkých řádů. Toto zapojení se užívá v případě hrazené kompenzace jalového výkonu.

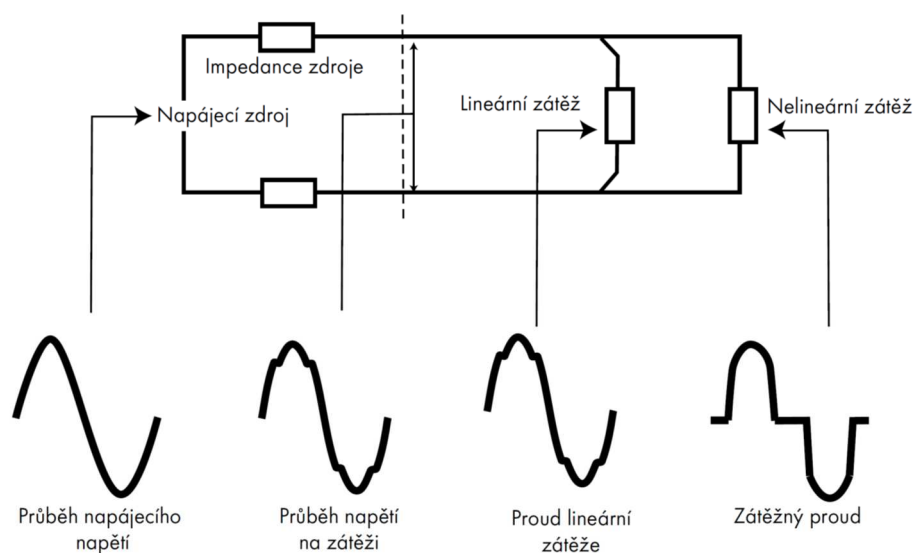
Skin efekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev je znám jako skin efekt, který se více projevuje na vyšších kmitočtech. Skin efekt je obvykle zanedbáván, protože při základním kmitočtu se projevuje velmi málo, ale u kmitočtů nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše, se stává skin efekt významným, protože způsobuje případné ztráty a oteplení. Tam, kde se vyskytují proudové harmonické musí projektanti uvažovat skin efekt při

návrhu kabelů. Mnohožilové kabely a vrstvené přípojnice mohou být využity při řešení tohoto problému. Je ale nutno dávat pozor, aby použitý systém přípojníc zamezil mechanickým rezonancím na harmonických kmitočtech.

2.2.8 Problémy způsobené harmonickými napětími

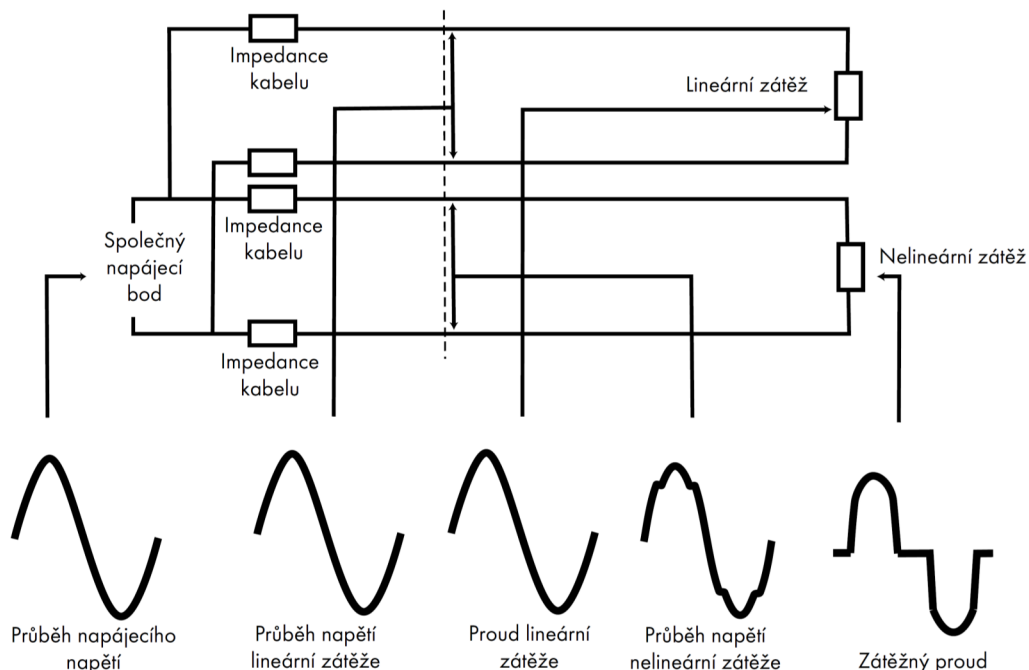
Harmonický proud zátěže způsobuje napěťové zkreslení na impedanci napájecí sítě (to je důvod „ploché křivky“). Jsou zde dvě části impedance, impedance vnitřních kabelů od společného napájecího bodu (PCC) a základní impedance napájecí sítě k PCC, např. lokálního napájecího transformátoru. Situace je uvedena na obr. 2.8.



Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže [8]

Deformovaný odběrový proud nelineární zátěže způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedanci kabelů. Výsledné zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu a to i v případě lineárních zátěží.

Řešením je oddělení obvodů se zátěžemi generujícími harmonické proudy od obvodů se zátěžemi citlivými na harmonické, jak je ukázáno na obr. č. 2.9. Zde jsou samostatné obvody, které z PCC napájejí lineární a nelineární zátěže. Napětové zkreslení vlivem nelineární zátěže pak nemá vliv na napájení lineární zátěže.



Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže [8]

Při posouzení harmonického zkreslení je nutno připomenout, že při napájení zátěže přes UPS nebo při využití záložního generátoru při poruše, může být impedance napájecí sítě a tím i napětové zkreslení mnohem větší.

Jsou-li instalovány lokální transformátory, pak mohou být voleny tak, aby měly dostatečně nízkou výstupní impedanci a dostatečnou schopnost odolávat přídavnému ohřívání, jinými slovy dostatečně předdimenzované transformátory.

Indukční motory

Napětové zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudů indukovaných do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty. Pokud je očekávat výskyt harmonicky zkresleného napětí, pak by měly být motory dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát.

Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání induktivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukuje elektromagnetické interference (EMI) a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidelnostem v provozu regulátorů. Může zde být dokonce i několik průchodů nulou během jedné půlperrody.

2.2.9 Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

Jestliže má harmonický proud původ v napájecí síti, pak roste harmonické zkreslení napětí úměrně impedanci napájecí sítě ve společném napájecím bodě (PCC) a harmonickému proudu. Jelikož impedance napájecí sítě je obecně induktivního charakteru, její amplituda roste se zvyšujícím se kmitočtem. Samozřejmě, pokud je napětí deformováno harmonickými proudy z jiných nelineárních spotřebičů a zkreslením příslušícím transformátoru, každý další spotřebič přispívá k tomuto deformování. Teda zákazníkům nemůže být dovoleno zvyšovat znečištění sítě tak, aby způsobovali újmu jiným zákazníkům. Proto jsou v mnoha zemích stanoveny limity pro generování harmonických proudů do napájecí sítě.

2.2.10 Mezní hodnoty vyšších harmonických

Základem pro určení mezních hodnot vyšších harmonických je hladina nízkého napětí (dále nn). Pro hladinu nn jsou velikosti kompatibilní úrovně stanoveny s ohledem na možnost vzniku rušení připojených zařízení (asynchronní motory, TV přijímače, výpočetní techniku, ostatní elektroniku). Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí, která se mohou vyskytovat ve veřejné napájecí síti nn, jsou uvedeny ve středním sloupci v tab. č. 2.1, která byla získána dlouhodobým pozorováním a je součástí normy ČSN IEC 1000-2-2. V podstatě se jedná o hodnoty odpovídající třídě II. Kompatibilní úrovně tříd I. a III. byly odvozeny později a jsou výsledkem optimalizace kompatibilních úrovní v elektroenergetickém systému a především v průmyslových sítích a hodnoty jsou v souladu s IEC 1000-2-4 (ČSN EN 61000-2-4).

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn [4]

Řád harmonické n	Přípustná hodnota u_{nVT} v % U_1		
	tř. I	tř. II	tř. III
Liché hodnoty harmonických nedělitelné třemi			
5	3,0	6,0	8,0
7	3,0	5,0	7,0
11	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	4,5
17	2,0	2,0	4,0
19	1,5	1,5	4,0
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	$0,2+12,5/n$	$0,2+12,5/n$	$5 \times \text{SQR}(11/n)$
Liché hodnoty harmonických dělitelné třemi			
3	3,0	5,0	6,0
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	2,0
21	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	1,0
Sudé harmonické			
2	2,0	2,0	3,0
4	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	1,0
8	0,5	0,5	1,0
10	0,5	0,5	1,0
>10	0,2	0,2	1,0

Celkové harmonické zkreslení napětí je dáno ČSN EN 61000-2-4

třída I	5%
třída II	8%
třída III	10%

Problematika stanovení kompatibilních mezí v sítích vn a vvn je řešena v normách PNE 33 3430, existují dva základní přístupy. Prvý přístup vychází z materiálu VDEW "Zásady pro posuzování zpětných vlivů", druhý pak z materiálů a návrhů IEC. Obě metodiky stanovují příspěvky rušení od jednotlivých odběratelů připojených ve společném napájecím bodě (PCC) tak, aby mohl dodavatel garantovat všem odběratelům elektrickou energii předepsané kvality.

Stanovení příspěvku odběratele k znečištění sítě vyššími harmonickými

Příspěvek odběratele je možné zanedbat (připojení vždy přípustné), pokud je splněna podmínka dle (2.39).

$$\frac{S_{odb}}{S_{kV}} \leq \frac{1}{1000} \quad (2.39)$$

S_{odb} zdánlivý výkon připojovaného zařízení

S_{kV} zkratový výkon ve společném napájecím bodě (PCC)

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430 (metodika VDEW)

V případě, že není podmínka (vzorec 2.39) splněna, je nutná podrobnější analýza. Pokud je již zařízení instalované je vhodné provést měření.

Výpočet B_n

$$B_n = \frac{Z_n * k_{pn} * \sqrt{3} * I_n}{u_{nVT} * U_1} * 100 \quad (2.40)$$

kde Z_n je impedance sítě při kmitočtu n-té harmonické [Ω]

k_{pv} je činitel soufáznosti 0,3-1

u_{nVT} je kompatibilní mez nn viz. tab. 2 [%] pro třídu II

U_1 je jmenovité sdružené napětí v odběrovém bodě pro $n=1$ [V]

I_n můžeme určit měřením, nebo z následující rovnice (2.41).

$$I_n = \frac{S_{odb}}{\sqrt{3} * U_1} * \frac{i_{np}}{100} \quad (2.41)$$

kde S_{odb} je zdánlivý výkon zařízení (měniče frekvence)

i_{np} je proud dané harmonické

Určení B_{max}

B_{max} je největší hodnota ze všech B_n (kde n je řád harmonické $n=2...25$)

Napětí vyšších harmonických v síti vznikají spolupůsobením všech zařízení na hladinách nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Z předchozí věty je zřejmé, že jedno zařízení se smí na celkové hodnotě rušení podílet pouze částečně.

Nejvyšší hodnoty harmonických napětí se zpravidla vyskytují v sítích nízkého napětí, neboť zde se sčítají podíly příslušných úbytků napětí vzniklé ve všech napěťových hladinách.

$$u_{nvvn} + u_{nvn} + u_{nnn} \quad (2.42)$$

Výsledné napětí vyšší harmonické v příslušné napěťové hladině musí být s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu rovno a nebo menší než je přípustná hladina pro danou napěťovou úroveň. Proto může každý ze tří zdrojů v jednotlivých napěťových úrovních přispívat podílem vyplívající z rovnice (2.43).

$$u_n = k_N * u_{nVT} \quad (2.43)$$

kde k_N je činitel napěťové úrovně

nízké napětí k_{Nnn}	0,2 až 0,3
vysoké napětí k_{Nvn}	0,4 až 0,7
velmi vysoké napětí k_{Nvvn}	0,1 až 0,3

Celkový součet součinitelů pro všechny tři úrovně bývá roven jedné. Velikost jednotlivých součinitelů se volí podle zkušeností. U harmonických, jejichž řád je násobkem tří nedochází ke sčítání v různých napěťových hladinách koeficient pro nízké napětí $k_{Nnn}=1$.

Rozdělení přístupných úrovní mezi jednotlivé odběratele vychází ze vztahu:

$$k_A = \frac{S_0}{S_T} \quad (2.44)$$

- S_0 sjednaný výkon odběratele
- S_T vztažná hodnota výkonu rovná 70% zdánlivého výkonu transformátoru napájecího danou sítí
- k_A činitel připojení

Činitel k_A se využije při vyhodnocování velikosti maximálního činitele rušení B_{max}

$B_{max} < 0,02$	Produkce vyšších harmonických je jen nepatrná, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_A * k_N$	Produkce vyšších harmonických leží z hlediska poměru výkonů pod přípustnou hodnotou, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_N$	Produkce vyšších harmonických leží pod hodnotou přípustnou pro síťovou úroveň. Pokud určitý počet zákazníků plně nevyžaduje celé své podíly, je možné i v tomto případě souhlasit s připojením
$B_{max} > k_N$	Zařízení produkuje nepřijatelně vysoké harmonické proudy

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430-1 (metodika IEC)

V sítích vysokého a velmi vysokého napětí:

Mezní hodnota příspěvku i -tého odběratele E_{ni} se stanoví z rovnice (2.45)

$$E_{ni} = G_{ns} \left(\frac{P_i}{P_t} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (2.45)$$

Kde: E_{ni} je přístupný příspěvek i -tého odběratele k n -té harmonické napětí v PCC, vyjádřených v procentech jmenovitého napětí sítě

G_{ns} je mezní hodnota n -té harmonické napětí (v procentech jmenovitého napětí) ve vyšetřované síti viz. tab 3.9

P_i je sjednaný maximální příkon i -tého odběratele

P_t je výkon, který je možno odebírat z distribuční sítě při daném provozu

a koeficient určující soufáznost

$$a = 1 \in \{n < 11\} \quad (2.46)$$

$$a = 1,4 \in \{11 < n < 13\} \quad (2.47)$$

$$a = 2 \in \{n > 13\} \quad (2.48)$$

Řád harmonické n	Mezní hodnota	
	sítě vn	sítě vvn
liché harmonické		
3	3	2
5	4	2
7	3	2
9	0,9	0,9
11	2,7	1,5
13	2,1	1,5
15	0,3	0,3
17	1,7	1
19	1,3	1
21	0,2	0,2
23	1,3	0,7
25	1,3	0,7
>25	$0,2+5/n$	$0,1+2,5/n$
sudé harmonické		
2	1,5	1
4	0,7	0,7
6	0,5	0,5
8	0,3	0,2
>8	0,2	0,2

Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn [4]

2.2.11 Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických

Z definice impedance jednotlivých prvků elektrických sítí vyplývá, že její velikost je při různých kmitočtech podstatně odlišná od impedance při 50 Hz, pro kterou je navržena. Při jejich určování je nutné věnovat zvláštní pozornost rezonančním jevům. Pokud nastanou rezonance sítě na frekvenci některé harmonické může její napětí nabývat obzvláště vysoké hodnoty, čímž se nebezpečně zvyšuje možnost rušení dalších odběratelů. Při určování impedance sítě ve společném napájecím bodě (PCC) se vychází z náhradního schématu na obr. 3.8., ve kterém je celková kapacita sítě složená z kapacit vedení a případně z kapacit kondenzátorových baterií pro kompenzaci účinníku, reprezentována kondenzátorem připojeným na přípojnicí sítě a chová se jako paralelní rezonanční obvod. Induktivní reaktance je tvořena převážně reaktancí napájecího transformátoru a reaktancí vedení, s níž je dále v sérii reaktance v nadřazeném síťovém bodě Q vypočtená ze ztrátového výkonu. Tlumicí odpor obvodu je tvořen především činným zatížením sítě.

Rezonanční frekvence obvodu je dána vztahem (2.49).

$$f_{rez} = 50 \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (2.49)$$

Kde Q_c je nabíjecí výkon sítě

S_k je zkratový výkon na přípojnicích

Impedance v nadřazeném síťovém bodě Q:

$$Z_{kQv} = \frac{f_n}{50} * \frac{U_n^2}{S_{kQ}} \quad (2.50)$$

Pro další výpočty je možné uvažovat pouze induktivní složku impedance

Impedance transformátorů:

Impedance transformátorů pro vyšší harmonické je přibližně rovna jeho reaktanci

Podélná impedance vedení:

Neuvažujeme vliv skinefektu. Reaktance je dána vztahem:

$$X_{Vv} = \frac{f}{50} * X_V \quad (2.51)$$

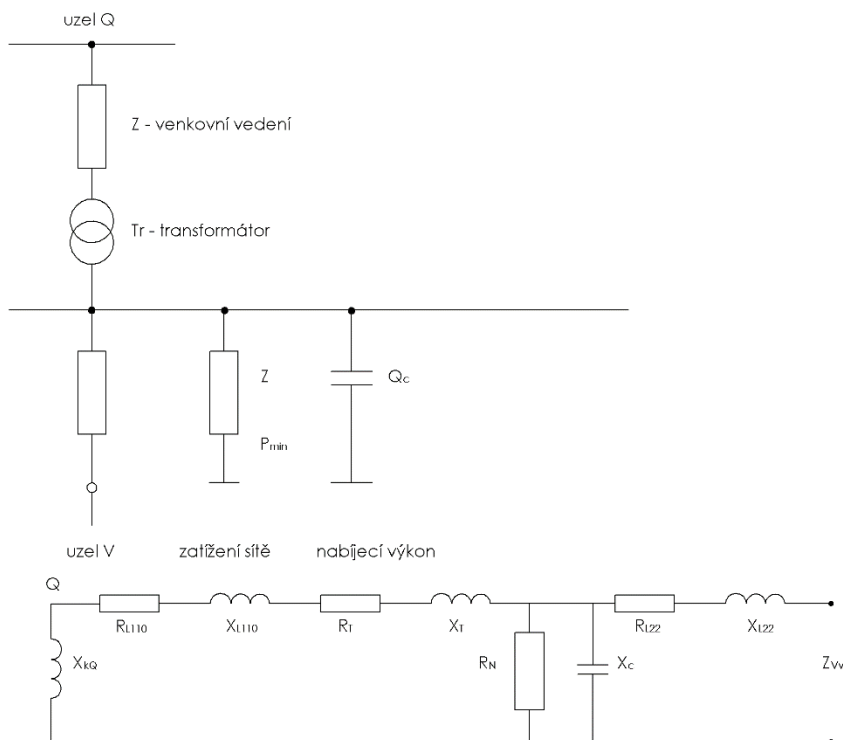
Příčná impedance vedení a kondenzátorů:

Kapacitní jalové výkony sítě Q_c jsou určeny především jalovými výkony vedení a jalovými výkony nehrazených kondenzátorů pro kompenzaci účinníku. Výsledná impedance je dána vztahem:

$$Z_c \cong X_c = \frac{50}{f} * \frac{U_n^2}{Q_c} \quad (2.52)$$

Impedance zátěže sítě:

Velikost impedance sítě na frekvenci blízké první paralelní rezonanci závisí na tlumícím účinníku ohmické zátěže. Činnou složkou rozběhové impedance motorů můžeme zanedbat. Impedance sítě dosahuje nejvyšší hodnoty při minimální činné zátěži $P_{\text{čmin}}$. V energetických sítích je $P_{\text{čmin}}$ rovno asi 2/3 slabého zatížení sítě.



Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě

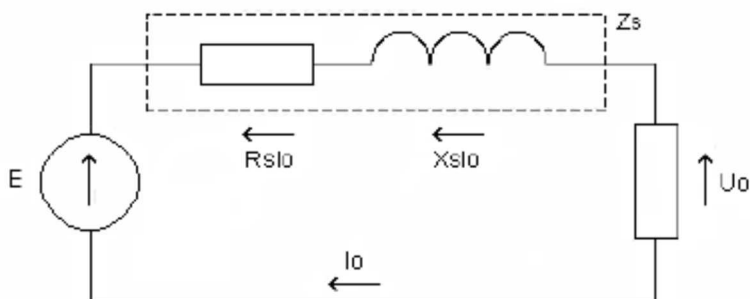
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt

Elektrické spotřebiče jsou více či méně citlivé na kolísání úrovně napětí v distribuční síti. Mezi tyto spotřebiče patří například světelné zdroje (žárovky). Tyto spotřebiče vyžadují pro správnou funkci konstantní úroveň napětí. Odběratelé s proměnlivým odběrem elektrické energie však bohužel způsobují měnící se úbytky napětí. Rychlé periodické změny napětí, které nazýváme kolísání napětí, způsobují jev zvaný flicker efekt. Toto kolísání napětí způsobuje změny světelného toku, které má za následek změny ve zrakovém vnímání člověka a tak ho omezuje při jeho činnostech.

2.3.1 Příčiny kolísání napětí

Pro každé vedení je napětí na zátěži odlišné od napětí na začátku při zdroji. To je demonstrováno na jednofázovém náhradním obvodu dle obr. 2.11. Rovnice (2.53) ukazuje, jak může být rozdíl napětí ΔU odvozen z fázorového diagramu a jednoduchých geometrických pravidel.

$$\frac{E-U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U}{U_0} = R_S * \frac{P}{U_0^2} + X_S * \frac{Q}{U_0^2} \cong R_S * \frac{\Delta U}{U_0} + \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.53)$$



Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě

Náhradní odpor vedení je v praxi poměrně malý ve srovnání s jeho reaktancí ($X_S > 10 * R_S$). Takže uvedená rovnice přejde na následující tvar, který definuje poměrnou hodnotu změny napětí na koncové zátěži:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.54)$$

Vidíme, že primární příčinou fluktuace napětí je časová změna jalového výkonu na proměnlivé zátěži. Takové zátěže jsou obloukové pece, pohony válcovacích stolic, navíječky, atp. Obecně řečeno, jsou to zátěže s velkým počtem změn výkonu. Také malé výkonové zátěže jako rozběh indukčních motorů, svářečky, ohříváče vody, regulátory výkonu, elektrické pily a kladiva, pumpy a kompresory, jeřáby a výtahy také mohou být zdroji flicker efektu. Velikost úbytku napětí závisí na velikosti proudu, který protéká danou reaktancí a úbytek je tedy způsoben i činnou složkou odběru zátěže.

2.3.2 Účinky kolísání napětí na světelné zdroje

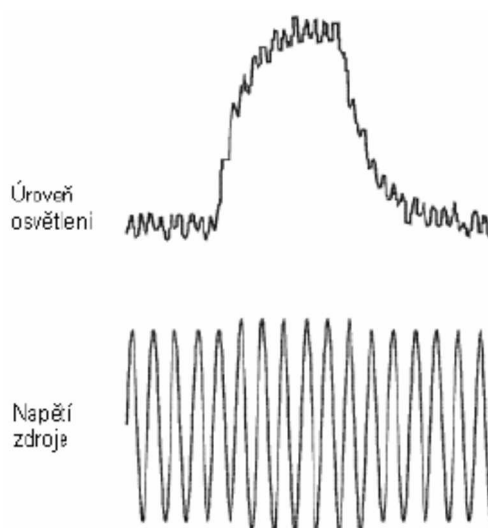
Jakékoliv změny amplitudy napájecího napětí vedou k změnám světelného toku světelného zdroje. Tento jev je znám jako flicker efekt, což je subjektivní nepříznivý vizuální dojem při nestabilním světelném toku, jehož jas nebo spektrální rozdělení se mění v čase. Přenos kolísání napájecího napětí na kolísání výstupního záření světelných zdrojů je velice komplexní problém závislý na principu funkce světelného zdroje, jeho konstrukci, dimenzování, napájení, ale i provozních podmínkách.

Odezva světelného zdroje na kolísání napětí může být vyjádřena jeho přenosovou funkcí, kterou je popsána změna výstupního parametru na základě změny parametru vstupního, vstupním parametrem je relativní velikost změny velikosti napětí $\Delta U/U$ a výstupním parametrem relativní velikost změny velikosti světelného toku $\Delta \Phi/\Phi$. Jejich podíl definuje zesílení přenosu (2.55).

$$G.F. = \frac{\Delta\phi/\phi}{\Delta U/U} \quad (2.55)$$

Každý světelný zdroj má svou vlastní přenosovou funkci, kterou lze získat vyhodnocením odezvy zdroje na periodickou amplitudovou modulaci napětí v rozsahu modulačních frekvencí (0; 50) Hz. Odezvu je přitom možné měřit, nebo i simulovat na modelu světelného zdroje.

Žárovky jsou zvláště citlivé na změny v napájecím napětí, jejich světelný tok Φ je úměrný přiloženému napětí podle vztahu $\Phi \sim U^y$, kde y se mění mezi 3,1 a 3,7. Obr. 2.12 ilustruje změny světelného toku žárovky 60 W, 230 V vlivem kolísání napětí napájecího napětí.



Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky

Kolísavé změny proudu (v případě této práce způsobené obloukovou pecí) způsobují nízkofrekvenční kolísání napětí, které má za následek blikání světelných zdrojů (flicker efekt). Ten významně narušuje vidění a obecně způsobuje neklid, nepohodlí, psychickou a psychologickou únavu a dokonce má i patologické vlivy na lidské bytosti. Fyziologie tohoto jevu je komplexní. Flicker efekt ovlivňuje proces vidění a reakce lidského mozku. Blikající světelné zdroje vytvářejí nepohodlí a zhoršení kvality práce – v některých případech mohou způsobit nehody na pracovišti.

Proto byly stanoveny předpisy pro bezpečnost a ochranu zdraví pracujících (BOZP), které jsou kontrolovány místními hygienickými organizacemi. Jedná se zejména o nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kde se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci a právě zde v § 45 jsou uvedeny bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště.

Aby se minimalizovaly příčiny vzniku flicker efektu, jsou stanoveny v normě ČSN EN 61000-3-3 ed. 3 přípustné meze krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{st} = 1,0$ (vzorkování po 10 minutách) a dlouhodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{lt} = 0,65$ (vzorkování po 2 hodinách).

3. Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece patří mezi velmi důležitá zařízení při zpracování kovů. Jejich historie sahá až na konec 19. století, kdy Paul Héroult sestrojil první průmyslově použitelnou elektrickou obloukovou pec. Tyto pece jsou využívány v metalurgii a díky jejich použití se v této oblasti dosáhlo významného pokroku.

Teoretické poznatky a praktické zkušenosti potřebné k úspěšné stavbě a k dobrému provozu pece jsou velmi obsáhlé. Kvůli těmto důvodům se občas stává, že oblouková pec nevyhovuje danému účelu. Může se například stát, že síť do které je elektrická oblouková pec zapojena nedosahuje takových parametrů, aby zpětný vliv této pece neovlivňoval ostatní provozy v síti.

3.1. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je výboj plynu, který vzniká za normálních nebo vyšších tlaků, jenž je schopný samostatně existovat po určitou dobu. Mezi charakteristické vlastnosti oblouku patří:

- Vysoká proudová hustota katodové skvrny
- Vysoká teplota katodové skvrny nebo celé katody
- Malé úbytky napětí v katodové a anodové oblasti
- Malé napětí na elektrodách
- Vysoká teplota obloukového plazmatu
- Intenzivní vyzařování světla z oblouku

Podle druhu napájení lze oblouky rozdělit podle způsobu napájení na:

- Střídavé oblouky
- Stejnoseměrné oblouky

Nebo podle druhu použitých elektrod na:

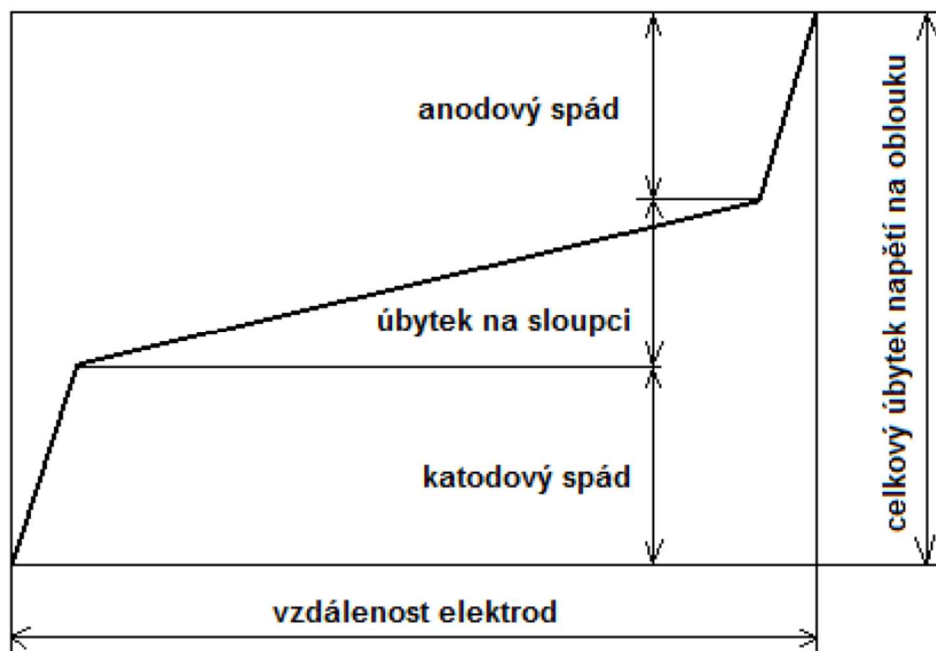
- Obloukové pece s uhlíkovými elektrodami
- Obloukové pece s kovovými elektrodami

Nebo podle tvaru výbojové dráhy na:

- Oblouky volně hořící
- Oblouky stabilizované

Stabilizovaný oblouk znamená, že oblouk hoří jen ve vymezeném prostředí.

Průběh úbytku napětí na oblouku je znázorněn na obr. č. 3.1. Na tomto obrázku si můžeme všimnout třech různých oblastí. Jsou to: katodová oblast, úbytek na sloupci a anodová oblast. Velikost anodového a katodového úbytku napětí závisí na materiálu elektrod. Všechny oblasti jsou závislé na procházejícím proudu obloukem a na prostředí, ve kterém oblouk hoří.



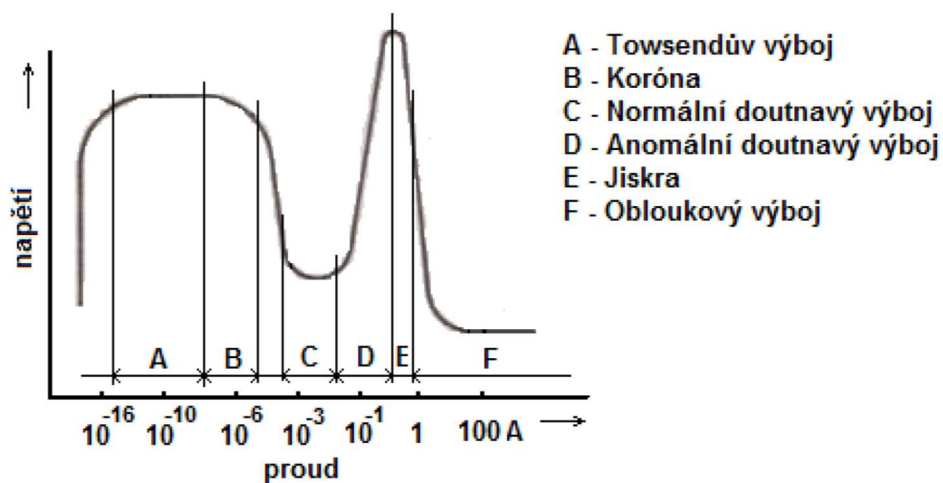
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku [3]

Vznik a vývoj tepla je důsledkem fyzikálních dějů, probíhajících v ohraničeném plynném prostředí, který je za normálních podmínek nevodivý. Toto prostředí stává vodivým až díky působení ionizačních faktorů:

- Vysoká teplota
- Elektrické pole
- Radioaktivní záření, rentgenové záření, krátkovlnné elektromagnetické záření

Ionizace plynu je fyzikální proces, jehož výsledkem je vznik nových nábojů z atomů a molekul plynu. Dalším využívaným dějem je rekombinace částic. Vytváří se v plynu, ve kterém existují částice s opačným nábojem. Při rekombinaci se uvolňuje energie, která se může využít.

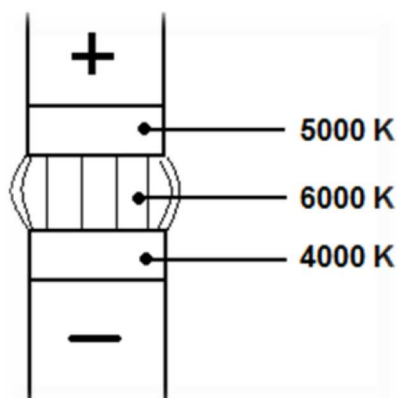
Charakteristiky různých typů výbojů jsou znázorněny na obr. 3.2. Na voltampérové charakteristice můžeme vidět klesající napětí obloukového výboje s rostoucím proudem.



Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích [3]

3.1.1 Stejnoseměrný elektrický oblouk

Stejnoseměrný elektrický oblouk vznikne tak, že necháme protékat stejnoseměrný proud přes spojené elektrody. V místě spojení elektrod dojde k jejich přehřátí a k následné ionizaci okolních par. Při následném oddálení elektrod bude stejnoseměrný elektrický oblouk protékat přes vzniklé vodivé prostředí. Stejnoseměrný elektrický oblouk je znázorněn na obr. 3.3.



Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk [3]

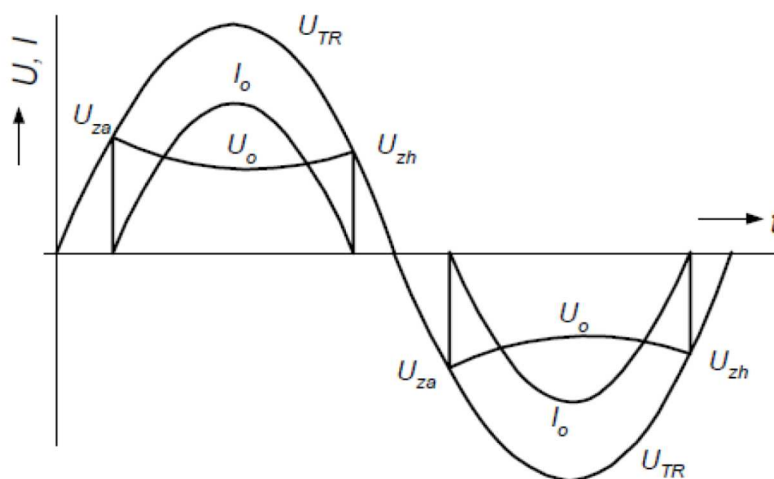
3.1.2 Střídavý elektrický oblouk

Střídavý elektrický oblouk se vytváří obdobně jako oblouk stejnosměrný. Hlavní změnou jsou periodické změny polarity napětí a proudu. Při změně polarity stejnosměrného proudu začne v určitém okamžiku oblouk zhasínat. Pokud se udržela anoda (v předcházející půlperiodě katoda) žhavá, dojde k opětovnému zapálení oblouku i při malých hodnotách napětí. Z tohoto vyplývá, že pokud se na obou elektrodách udrží žhavá místa, může oblouk hořet v obou periodách i při napájení střídavým proudem a vzniká střídavý elektrický oblouk. Střídavý elektrický oblouk je velmi nestabilní a proto se musí k jeho stabilizaci využívat stabilizační člen. Podmínky pro hoření střídavého elektrického oblouku jsou:

- žhavost obou elektrod
- po změně polarity musí být k dispozici napětí pro zapálení oblouku

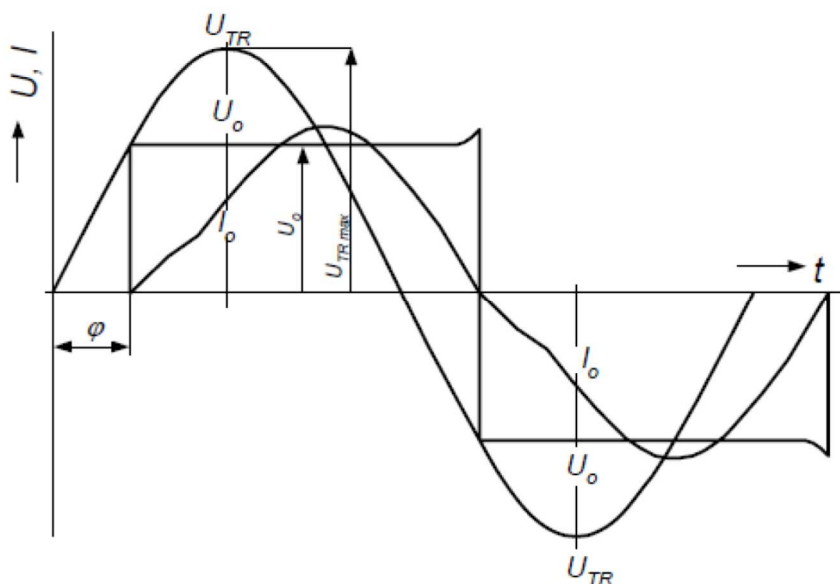
Pro stabilizaci hoření oblouku musíme do obvodu zařadit vhodnou indukčnost. Zařazením indukčnosti do obvodu se nám zhorší účinnost, a proto její velikost nesmí být příliš velká. Optimální velikost indukčnosti by měla být taková, aby se hodnota pohybovala okolo $\cos\varphi = 0,85$. Nejčastěji se volí tlumivka na železném jádře a ve výjimečných případech bez jádra.

Na obr. 3.4 je znázorněn průběh napětí a proudu u oblouku v jehož obvodě je zapojen pouze rezistor. Na obr. 3.4 jsou: U_{TR} napětí zdroje (transformátoru), U_o napětí na oblouku, I_o proud oblouku, U_{ZA} zapalovací napětí, U_{ZH} zhasíací napětí oblouku. Zapalovací napětí oblouku je o trochu vyšší než napětí zhasíací. Proud oblouku způsobuje prohnutý tvar napětí oblouku U_o . S rostoucím proudem oblouku napětí oblouku klesá. Průběh proudu oblouku má tvar podobný sinusovce, ale na začátku a na konci každé půlperiody má nulovou hodnotu.



Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem [3]

Pokud se do obvodu oblouku sériově zapojí indukčnost (obr. 3.5), nastává fázový posuv mezi napětím a proudem, ale i prodloužení doby hoření oblouku vlivem indukčnosti tlumivky. Pro docílení trvalého hoření oblouku je nutné do obvodu zapojit takovou tlumivku, aby bylo docíleno fázového posuvu minimálně $\cos\varphi = 0,85$. Napětí na oblouku má obdélníkový tvar, což je charakteristické pro oblouky s vysokými proudy.



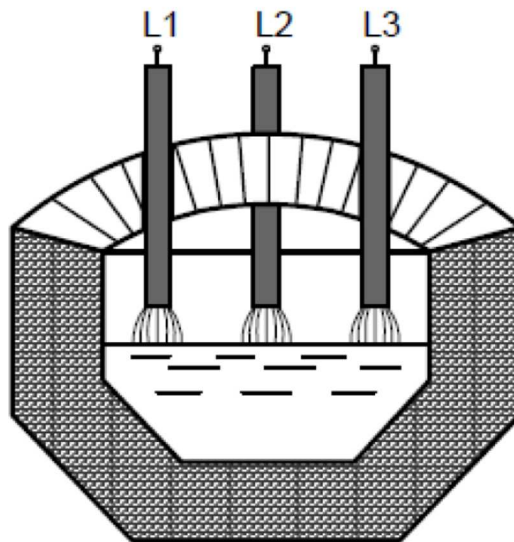
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností [3]

3.2 Elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece rozdělujeme podle způsobu hoření oblouku na pece s přímým obloukem, nepřímým obloukem a se zakrytým obloukem.

3.2.1 Pece s přímým obloukem

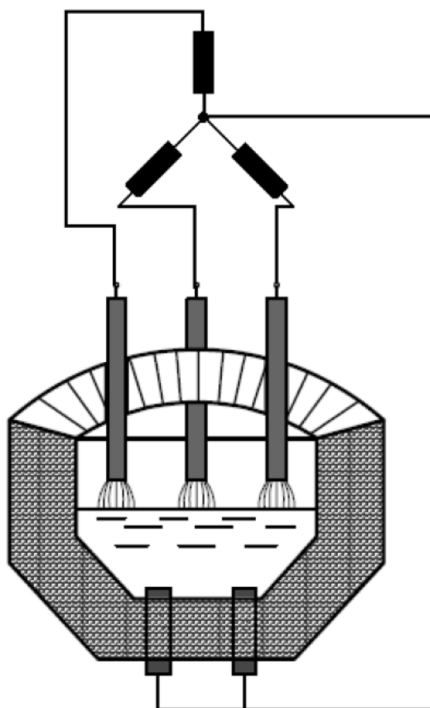
U pecí s přímým obloukem (obr. 3.6) hoří oblouk mezi elektrodou (většinou grafitovou) a vsázkou. Proudový obvod se uzavírá přes taveninu. Tyto pece se také nazývají pece se závislým obloukem. Přenos tepla do lázně je přímý, což urychluje tavení. Tento typ pecí se také vyznačuje delší životností. Tento typ pecí se využívá především k výrobě oceli a litiny.



Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem [3]

3.2.2 Pece s vodivým dnem

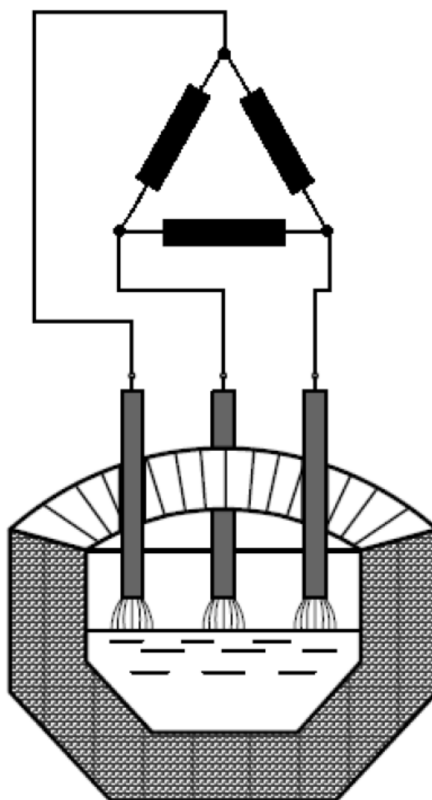
Pece s vodivým dnem (obr. 3.7) patří mezi starší typy obloukových pecí. Byly konstruovány tak, že sekundární strana pecního transformátoru byla zapojena do hvězdy s fázovým vývodem jednotlivých bodů hvězdy na elektrody. Pro zlepšení symetrie byl nulový bod spojen se dnem nádoby. Mezi výhody těchto pecí patří rovnoměrnější ohřev taveniny v celém jejím objemu. Tyto pece se již v dnešní době nevyrábějí.



Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem [3]

3.2.3 Pece s nevodivým dnem

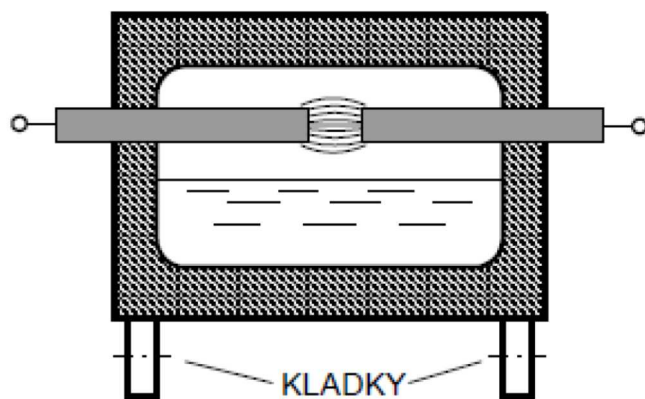
U pecí s nevodivým dnem (obr. 3.8) je sekundární vinutí pecního transformátoru zapojeno do trojúhelníka. Proud u tohoto druhu pecí prochází z elektrody přes strusku do taveniny a zpět přes strusku obloukem do druhé elektrody. Proud tedy neprochází dnem pece. Většina moderních elektrických obloukových pecí je tohoto typu.



Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem [3]

3.2.4 Pece s nepřímým obloukem

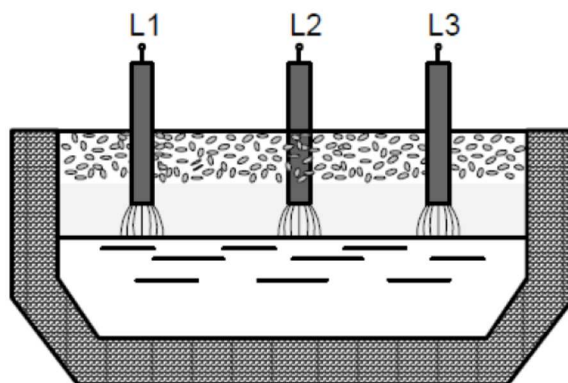
U pecí s nepřímým obloukem (obr. 3.9) hoří oblouk mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výhradně sáláním (zářením). Oblouk hoří mezi elektrodami nezávisle na vsázce. Mezi výhody těchto pecí patří jednoduchá obsluha a menší investiční náklady. Používají se k tavení neželezných kovů, šedé litiny a k výrobě ocelolitiny. Jejich velikost se pohybuje maximálně o objemu vsázky 3 tuny.



Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem [3]

3.2.5 Pece se zakrytým obloukem

U tohoto typu pece (obr. 3.10) hoří oblouk mezi vsázkou a elektrodami, které jsou ponořené do roztavené strusky a obsypány závěškou rud a příměsí. Oblouk tedy hoří zcela zakrytý. Důsledkem průchodu proudu mezi elektrodami, struskou a závěškou vzniká odporový ohřev strusky a závěšky, a proto se tyto pece také někdy nazývají oblouk-odporové. Elektrody jsou svisle uloženy, a jsou buď to amorfní, nebo samospékavé. Bývají vybaveny automatickou regulací elektrod. Tyto pece pracují většinou trvale bez přestávek. Hlavním problémem pecí se zakrytým obloukem jsou elektrické přívody, jelikož pracují s malým napětím a velkým proudem. Systém přívodů je řešen jako bifilární. Pece se používají jako redukční k výrobě surového železa a feroslitin, kde je potřeba dosahovat vysokých teplot.



Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem [3]

3.3 Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece

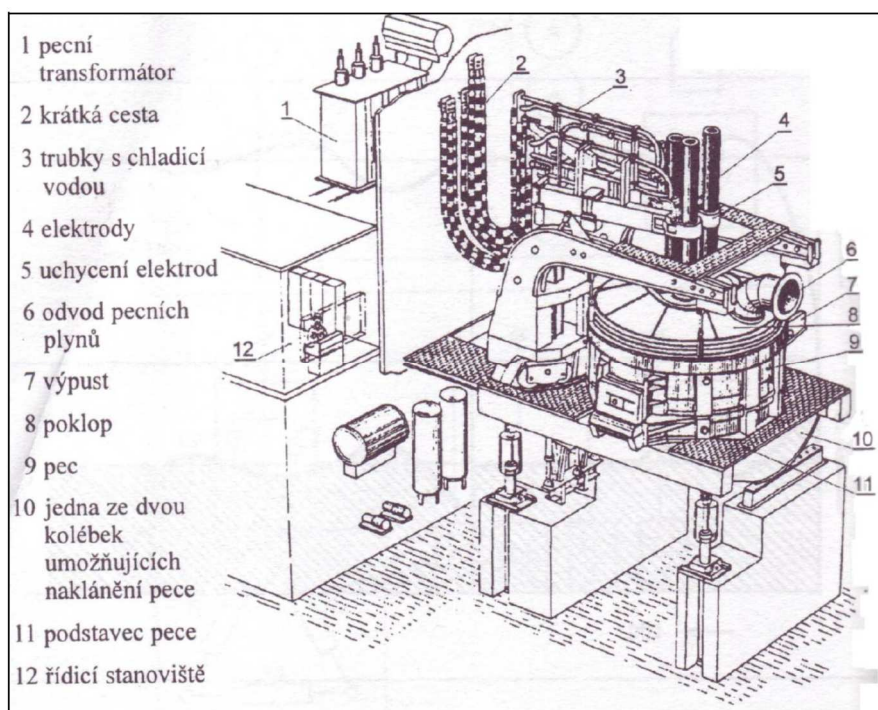
Elektrické zařízení obloukových pecí je velmi nákladné a značně ovlivňuje celkové pořizovací náklady. Podle funkce lze elektrické zařízení obloukové pece rozdělit na:

- silnoproudý elektrický obvod
- obvod automatické regulace pohybu elektrod
- měřící přístroje, ochrany, blokování a signalizace
- řídicí počítač

Elektrické zařízení obloukové pece je znázorněno na obr. 3.11. Nejdůležitější část tvoří silnoproudý obvod, který má zásadní vliv na chod pece. Hlavním úkolem silnoproudého obvodu je dovést elektrickou energii do pracovního prostoru pece a tam ji přeměnit na teplo. Nedílnou součástí elektrického obvodu pece je také automatická regulace polohy elektrod.

Silnoproudý elektrický obvod pece tvoří:

- napájecí síť
- pecní transformátor
- krátká síť
- elektrody



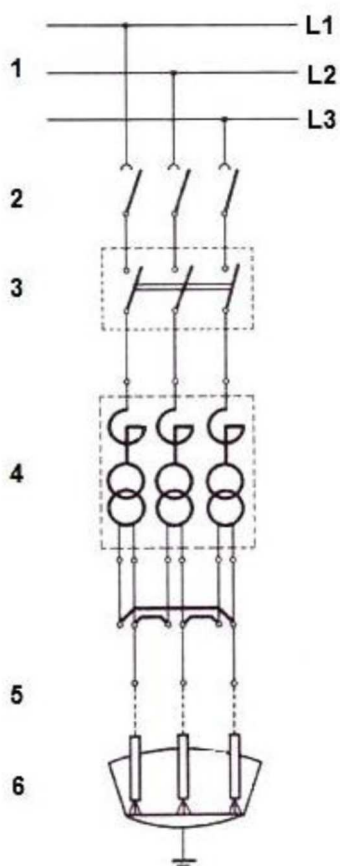
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí [3]

Na dalším obrázku č. 3.12 je znázorněno typické schéma zapojení elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí kde:

1. Napájecí síť 22kV
2. Odpojovač
3. Vysokonapěťový výkonový vypínač
4. Pecní transformátor a tlumivky
5. Krátká síť
6. Elektrody obloukové pece

Vysokonapěťový výkonový vypínač a odpojovač jsou elektricky ovládány pomocí řídicího panelu pecního zařízení. Mezi další možnosti řídicího panelu patří nastavování odboček pecního transformátoru, kterými se reguluje napětí a následně i proud pece.

Samotné ovládání a regulace pece není jednoduchou záležitostí a proto takovou pec může ovládat pouze pověřený pracovník.



Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť [3]

3.3.1 Napájecí síť obloukové pece

Vzhledem k výkonům elektrických obloukových pecí patří tato zařízení mezi největší odběratele elektrické energie. Pec má na síť vysokého napětí nežádoucí vliv, protože ji zahučuje proměnlivými proudy. Rozsah těchto proudů může být mezi nulou a několikanásobkem jmenovité hodnoty. Tyto proměnlivé proudy způsobují kolísání napětí na impedancích. Tyto vyvolávané poklesy napětí mají negativní vliv na ostatní elektrické zařízení připojené na téže síti, především na výpočetní techniku.

Zkratový výkon elektrické sítě patří mezi nejdůležitější ukazatele pro posouzení připojitelnosti elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí. Podle výpočtu zkratového výkonu lze posoudit, zda se vliv rušivých účinků pohybuje v přijatelných mezích.

Do napájecí sítě elektrické obloukové pece patří i odpojovač a výkonový vypínač. Odpojovač slouží k bezpečnému odpojení pece od sítě vysokého napětí v době, kdy pec není využívána.

Vysokonapěťový vypínač slouží ke spínání a rozpínání silnoproudého obvodu během tavení, na začátku a konci tavení, nebo při poruchových stavech. Tento vypínač je velice namáhán, protože často spíná a vypíná vysoké proudy pece. Ve většině případů se provádí jako tlakovzdušný.

3.3.2 Pecní transformátor

Pecní transformátor je nejdůležitější částí elektrického obvodu pece. Výkon pecního transformátoru určuje kapacitu obloukové pece. Tyto transformátory jsou většinou trojfázové, olejové a regulační. U větších výkonů transformátorů se ještě navíc k chlazení oleje využívá vodní chlazení. Charakteristika zatížení pecních transformátorů je značně odlišná od zatížení běžných transformátorů, kde je zatížení trvalé a velmi málo se mění. Primární vinutí pecních transformátorů je zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníka, přepínání je umožněné zdvojnásobením napěťových stupňů. Sekundární vinutí je zapojeno do otevřeného trojúhelníka a všechny začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na víko transformátoru. Sekundární vinutí nelze měnit, protože je napojeno přímo na krátkou cestu. Výkony pecních transformátorů jsou až 120MVA.

Ve společné nádobě s transformátorem se nachází i tlumivka, která je zařazena mezi pecním transformátorem a vysokonapěťovým výkonovým vypínačem viz. obr. 3.13. Tlumivka není zapojena po celou dobu provozu pece, ale je připojena pouze při zapojení primárního vynutí do hvězdy. Hlavním úkolem této tlumivky je omezení zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou. Hlavní nevýhodou použití tlumivky je omezení celkové účinnosti obloukové pece.

3.3.3 Krátká cesta

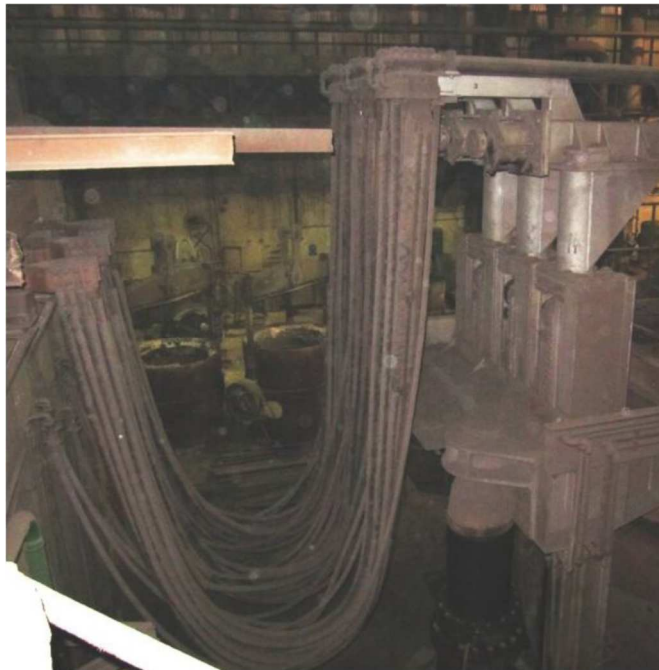
Krátká cesta je důležitou částí elektrické obloukové pece, která spojuje sekundární vývody pecního transformátoru s elektrodami obloukové pece. Z konstrukčního hlediska je krátká síť tvořena paralelním zapojením několika vodičů a to z důvodů vysokých proudů a z důvodu omezení skinefektu. Krátká síť má relativně vysokou indukčnost a pro její snížení se používá bifilárního zapojení, díky kterému dojde ke zlepšení účinnosti celé obloukové pece.

Krátkou cestu lze rozdělit na několik částí:

- Pásová část
- Ohebná lana
- Vodiče ramen držáku elektrod
- Držák elektrod
- Elektrody a spojky

K dosažení nízkých ztrát a celkové dobré účinnosti pece musí mít krátká cesta tyto vlastnosti:

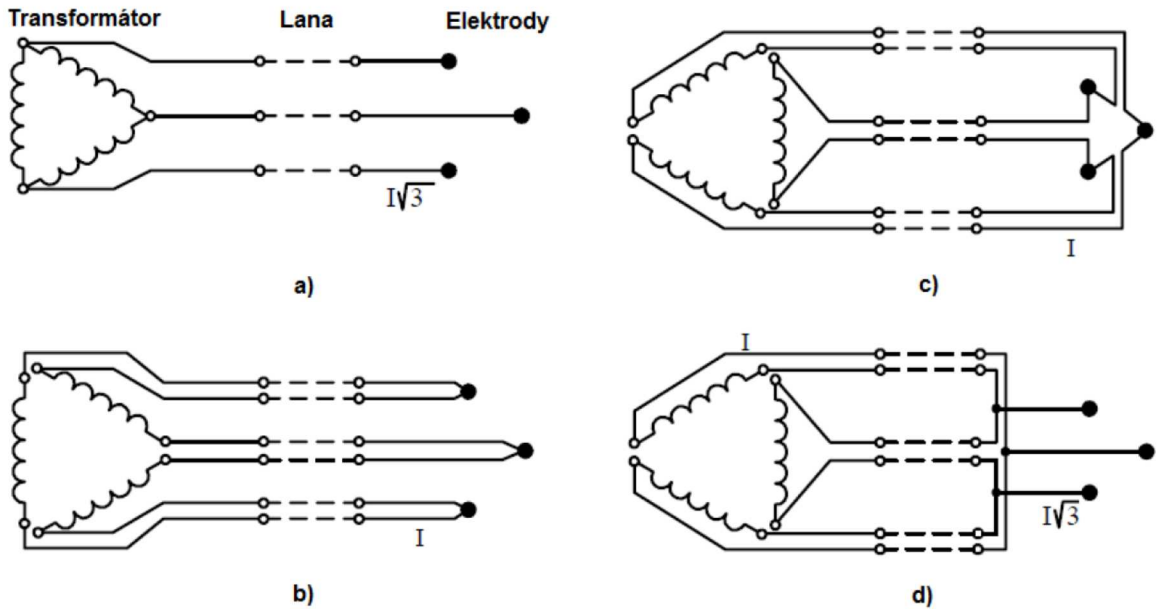
- Co nejkratší délku, aby se snížili elektrické ztráty všech druhů
- Nízká indukčnost
- Nízký ohmický odpor
- Nízkou vzájemnou indukčnost
- Dostatečnou mechanickou pevnost



Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece [3]

Způsoby zapojení krátké cesty:

Různé způsoby zapojení krátké cesty jsou vidět na obr. 3.15. Hlavní rozdíl mezi těmito zapojeními je to kde se skutečně nachází spojení vinutí do trojúhelníka.



Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty [3]

- Na tomto obrázku je vinutí spojeno uvnitř nebo na víku transformátoru
- Na tomto obrázku je vidět bifilární vinutí které je spojeno až na elektrodách. Bifilární přívody jsou náročnější na materiál a tedy i na cenu, ale zato mají menší reaktanční úbytky. Toto zapojení se používá u velkých výkonů obloukových pecí.
- Viz. b.
- Při tomto zapojení je vinutí spojeno až za ohebnými lany. Při tomto zapojení prochází sdružený proud pouze třemi vodiči.

Na obrázcích je také uvedena velikost proudu I přicházející na elektrody. Jelikož prochází při symetrickém stavu vinutím transformátoru proud I , pak na elektrodách v zapojení a. a d. přichází proud sdružený. V zapojení b. a c. přichází na elektrody proud stejný, jako je na vinutí transformátoru.

3.3.4 Elektrody obloukových pecí

Úlohou elektrod je přivést elektrickou energii do pracovního prostoru pece. Způsob jakým se k elektrodám přivádí proud, má velký význam, protože se v elektrodách a kontaktech ztrácí až 10% energie. Hlavními požadavky, které jsou kladeny na elektrody jsou:

- Nízká tepelná vodivost
- Vysoká elektrická vodivost
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká teplota oxidace
- Malý obsah popela a síry

Elektrody jsou prostorově umístěny do rovnostranného trojúhelníku. U obloukových pecí se používají elektrody:

- Uhlíkové
- Grafitové
- Samospékavé

Uhlíkové elektrody

Tyto elektrody se vyrábějí z retortového uhlí, směsí antracitu, koksu, pryskyřice a přírodního grafitu. Polotovary se později zbaví nečistot a lisuje se na požadované průměry a délky. Posléze se elektrody vypalují při teplotě až 1600 °C. Tyto elektrody se používají při výrobě feroslitin a uhlíkových ocelí.

Grafitové elektrody

Tyto elektrody jsou vyráběny stejně jako uhlíkové, akorát se vypalují až teplotou 2700 °C, čímž se uhlík přemění v grafit. Tyto elektrody jsou nejvíce používanými, protože mají větší dovolenou proudovou hustotu než elektrody uhlíkové.

Samospékavé elektrody

Tyto elektrody jsou složeny z ocelového pláště, opatřeného dovnitř žebry, které se vyplňují elektrovodným polotovarem. Tyto elektrody mají stejné složení jako uhlíkové. Výhodou těchto elektrod je nízká cena, protože se vyrábějí přímo na provozované peci.

3.4 Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí

Energetická soustava, která napájí závody s provozem elektrických obloukových pecí je často vystavena rušivým účinkům nepravidelně kolísajícího napětí. Původ tohoto nepravidelného kolísání napětí musíme hledat v nepravidelně proměnlivém proudovém zatížení obloukové pece. Při tomto proměnlivém proudovém zatížení vznikají na impedancích sítě poklesy napětí, jež vedou ke kolísání napětí a ke zpětnému vlivu elektrických obloukových pecí na energetickou soustavu. Kolísání napětí jsou v podstatě vyvolány dvěma typy proudových impulsů.

3.4.1 První typ změn proudového zatížení

Tento první typ proudových zatížení vzniká s četností 0,5krát až jednou za sekundu a to především v prvních 30ti minutách tavby. Zkratový proud při zapálení oblouku mezi elektrodou a vsázkou je tak velký, jako ustálený střední proud pece. Pokud je vsázka studená, neustále se tento zkratový stav opakuje. Mezi další příčiny vzniku průtoku zkratového proudu patří například stav, kdy se elektroda dotkne vsázky, což se stává například při sesednutí vsázky.

3.4.2 Druhý typ změn proudového zatížení

Tento typ změn se vyskytuje 2 až 20krát za sekundu. Intenzita proudu při tomto ději kolísá mezi ± 15 až ± 50 % své jmenovité hodnoty. Tyto změny proudu zřejmě souvisí s kolísání napětí v primárních obvodech obloukové pece. Změny proudu tohoto druhu leží u pásma necitlivosti automatické regulace posuvu elektrod, takže jsou při tradičním vybavení automatické regulace elektrické obloukové pece nepostizitelné.

3.4.3 Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn

Soubor rušivých účinků nepravidelně kolísajícího napětí, které má svoji podstatu zejména v proudových změnách druhého typu, nazýváme „flicker efektem“. Na základě výzkumu kolísání napětí v napájecí síti vn elektrických obloukových pecí je možno říci, že rušivý účinek kmitání napětí pozorovatelný při odchylkách 0,5 % jmenovité hodnoty napětí a četnosti výskytu 6 – 8 kmitů za sekundu. Tento rušivý účinek způsobuje blikání světla žárovkových svítidel, nepříznivě ovlivňuje rentgenová zařízení, televizi a počítače napájené z téže soustavy.

První příčina vzniku kolísání

Tato příčina kolísání napětí vychází z teorie oblouku. Intenzita proudu elektrického oblouku se mění od jedné půlvlny ke druhé vlivem rozdílné ionizace zóny elektrického oblouku, aniž by se měnila samotná délka oblouku.

Rozdílná ionizace zóny elektrického oblouku je způsobena nehomogenitou vsázky, která zrovna v danou chvíli je tavena obloukem. Vlivem vysokých teplot je kus vsázky pod elektrodou taven a mění se z pevného skupenství v kapalné a částečně se i vypařuje. Tyto výpary vlivem vysoké teploty ionizují a podílejí se tak na zvýšení koncentrace nosičů náboje v elektrickém oblouku, který nyní může přenést vyšší proud. Tato příčina vzniku kolísání napětí se projevuje především na začátku tavby a postupem času se stoupající teplotou taveniny její vliv klesá.

Druhá příčina vzniku kolísání

Tato příčina vzniku kolísání vzniká, když elektrický oblouk přeskakuje z jednoho kusu vsázky na druhý. Toto se děje přibližně v pěti až dvaceti periodách což odpovídá zhruba 0,1 až 0,4 krát za sekundu. Přeskočení elektrického oblouku se uskuteční tehdy, když špička nebo hrana kusu vsázky se pod vlivem vysoké teploty elektrického oblouku zaoblí a oblouk přeskočí na jinou špičku. Tímto se mění délka oblouku a tedy i proud oblouku.

Třetí příčina vzniku kolísání

Třetí příčinou je smyčkový pohyb oblouku, při kterém se oblouk prodlužuje. Tímto prodlužováním a zkracováním oblouku se mění amplituda proudu oblouku. Vychýlení oblouku je důsledkem zesíleného magnetického pole sousední fáze. Toto zesílení magnetického pole je důsledkem rozdílného proudu fází. Každá elektroda pracuje samostatně podle okolností vyskytujících se v bezprostředním okolí hoření jejího oblouku. Hodnota proudu může při počátku natavování dosáhnout až zkratové hodnoty proudu, zatímco sousední elektroda pracuje se střední hodnotou proudu. Tento provozní stav trvá tak dlouho, až kus působící zkrat na elektrodě je opálen, nebo až regulace elektrodu zvedne.

Všechny tři popsané vlivy kolísání proudu se libovolně překrývají (superponují) a vedou k takovému kolísání proudu, které co do velikosti amplitudy a četnosti nelze přesně definovat. Všechny popsané vlivy se nejsilněji projevují v počátku natavování a jsou tím slabší, čím je vsázka více natavena.

Elektrická oblouková pec patří mezi velké generátory harmonických do napájecí sítě. Jedná se především o 3. a 5. harmonickou. Celkově elektrické obloukové pece zatěžují napájecí síť hlavně nepravidelně proměnlivým kolísáním napětí, velkou proudovou nesymetrií a špatným účinníkem (zhruba $\cos\varphi=0,7$).

3.5 Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť

3.5.1 Omezení zkratových a velkých proudů

Omezení zkratových a velkých proudů se provádí pomocí zapojení tlumivky do série s pecním transformátorem. Tímto zapojením se snažíme omezit proudové špičky, protože právě při těchto proudových špičkách dochází k nejvyšším úbytkům napětí. Toto zapojení přispívá také ke stabilizaci oblouku. K těmto zkratovým a velkým proudům dochází především při natavování vsázky. Po natavení vsázky se předřadná tlumivka z obvodu vyřadí. Zároveň je nutné provést tuto tlumivku několika stupňovou.

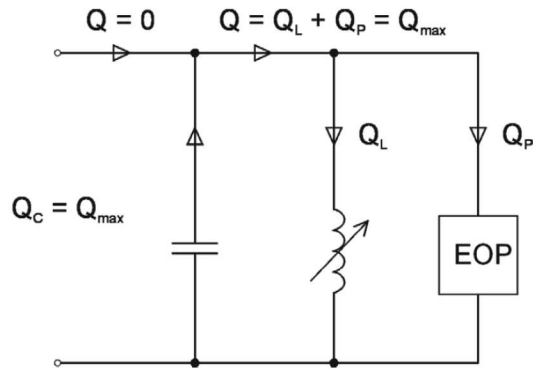
3.5.2 Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení

Zkratový výkon má zásadní vliv na velikost kolísání napětí v síti. Požadovaný zkratový výkon sítě lze odvodit od výkonu pecního transformátoru. Zvýšení zkratového výkonu v místě připojení se provádí:

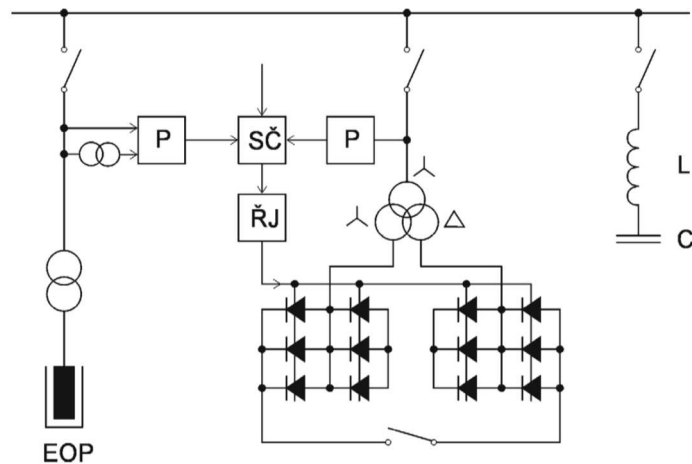
- Zesílení sítě se provádí například zdvojením přívodů, zvětšení transformátorů a podobnými úpravami. Tato řešení jsou nákladná a většinou je nutno celou síť rekonstruovat.
- Připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě
- Sériovou kompenzací
- Paralelní kompenzací

3.5.3 Nepřímá kompenzace

Tímto způsobem udržujeme odběr jalové energie konstantní při maximální hodnotě. V tomto případě omezíme kolísání napětí, ale účinnost je trvale velmi špatná (obr. 3.16). Pro nepřímou kompenzaci se nabízí možnost využít řízený statický usměrňovač jako spotřebič proměnného induktivního výkonu (viz. obr. 3.17). Funkce spočívá v tom, že součet spotřeby pece a usměrňovače je konstantní a tento je kompenzován statickým kondenzátorem. Nevýhodou tohoto řešení je produkce vyšších harmonických. Dále je třeba poznamenat, že i tato koncepce kompenzuje pouze souslednou složku.

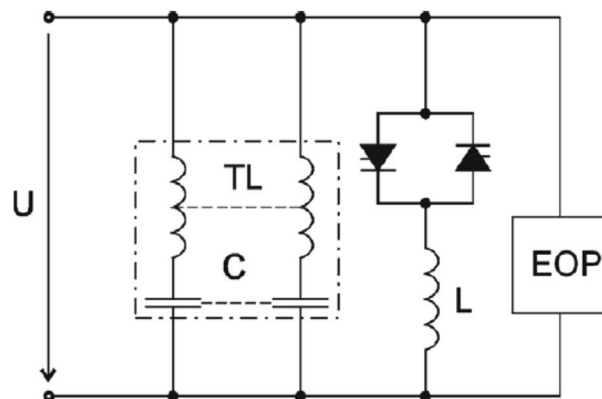


Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace [3]



Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměřňovačem [3]

Jako další možnost se jeví použití jedné tlumivky řízené tyristory pro každou fázi, jejichž proud základní harmonické je měněn antiparalelně zapojenými tyristory (viz. obr. 3.18). I toto zapojení je však zdrojem vyšších harmonických.



Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměřňovačem [3]

3.5.4 Přímá kompenzace

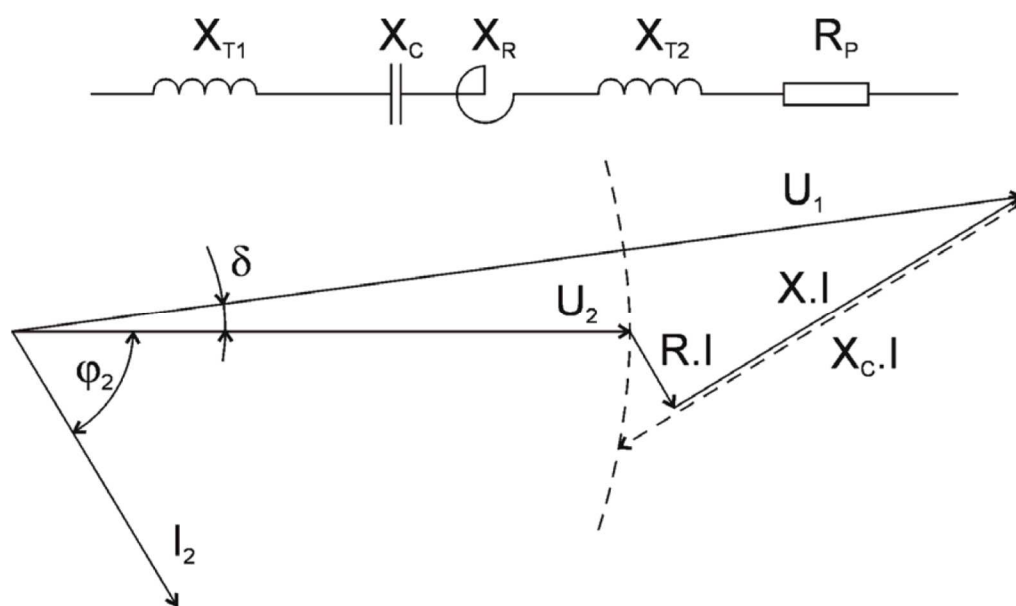
Přímou kompenzací je možno měnit výrobu induktivní energie v kompenzátoru v synchronizmu se spotřebou elektrické obloukové pece. Připojení pevné kondenzátorové baterie není příliš vhodné

řešení, protože takto zapojená kondenzátorová baterie nedokáže reagovat na potřeby proměnlivého induktivního proudu pece. Pevnou kompenzaci lze tedy využít především při kompenzaci proudu na prázdnou pecní transformátoru, případně ke kompenzaci tzv. stálé složky spotřeby Q_c . Vhodnějším způsobem kompenzace je použití více stupňovitého spínání kompenzační baterie pomocí tyristoru. Ke spínání je použito antiparalelní zapojení dvou tyristorů. Díky použití tyristorových spínačů je spínání kompenzačních stupňů velice rychlé. Tyto tyristorové spínače neobsahují žádné pohyblivé části, a proto dosahují dlouhé životnosti. Kompenzační zařízení je možno realizovat jako symetrické nebo i pro kompenzaci nesouměrného zatížení. Doba reakce na změny induktivního proudu a sepnutí tyristorového spínače se pohybuje okolo 30ms.

3.5.5 Serio-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece

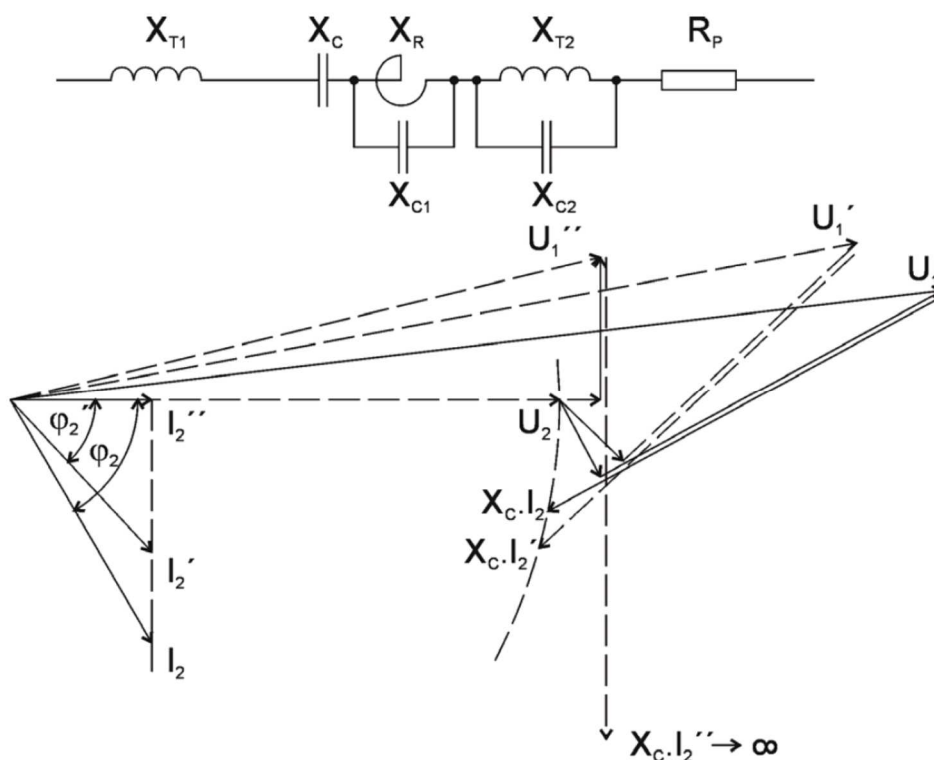
Sériová kompenzace řeší zejména zvýšení a stabilizaci napětí v síti, zatímco paralelní kompenzací dosáhneme zlepšení účinníku omezením zdánlivého proudu o příslušnou složku jalového proudu, dodaného kondenzátorovou baterií přímo v místě spotřeby. Na obr. 3.19 je nakreslen vektorový diagram napětí a proudu elektrické obloukové pece.

Čárkovaně je vynesena vektor napětí $X_c \cdot I$, tedy velikost napětí, které by bylo nutno vykompenzovat sériově zařazeným kondenzátorem, aby byla splněna podmínka $\Delta U = 0$.



Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece [3]

Jestliže zařadíme do obvodu v horní část paralelní kondenzátor X_{C1} , kompenzující spotřebu jalové energie tlumivky X_R , pak vektorový diagram napětí a proudů se změní následovně (viz. obr. 3.20).



Obr. č. 3.20 Vektorový diagram serio-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece [3]

Zdánlivý proud I_2 zmenší svoji hodnotu na I_2' a rovněž úhel φ_2 se zmenší na φ_2' . Vektorový diagram úbytků napětí, odpovídající činnému odporu pecního obvodu a jeho reaktanci, je znázorněn plnou čarou dochází tedy proti původnímu stavu k zmenšení obou složek úbytků napětí.

Jestliže teoreticky vykompenzujeme účinník pece až na $\cos\varphi=0$, pak při nulovém úhlu bude vektor reaktančního úbytku napětí kolmý k vektoru napětí U_2 . Obě složky reaktančního napětí i činného úbytku napětí ΔU budou mít v tomto případě nejmenší hodnotu. Přesto však vektor $X_C \cdot I_2''$ neprotíná kružnici označující geometrické místo bodů o napětí U_2 a tedy konverguje k nekonečnu.

$$X_C * I_2'' \rightarrow \infty \quad (2.56)$$

V případě, kdy $\varphi_2''=0$, není možno splnit podmínku $\Delta U=0$. Lze tedy konstatovat, že činná složka úbytku napětí podstatně ovlivňuje svojí hodnotou velikost kompenzačního výkonu sériového kondenzátoru stejně tak, jako úhel φ_2 mezi proudem a napětím pecního obvodu. Můžeme tedy napomáhat celkovému efektu sériové kompenzace napětí paralelní kompenzací účinníku jen za toho předpokladu, že činná složka úbytku napětí je mnohem menší než složka reaktančního úbytku napětí. Potom stačí vykompenzovat reaktanční úbytek napětí podle zvoleného stupně kompenzace a malý činný úbytek napětí ponecháme nevykompenzován.

Při velmi malém činném úbytku napětí kompenzované sítě s elektrickými obloukovými pecemi je současná paralelní kompenzace účiníku velmi výhodná a poskytuje značné velké nákladů na kompenzační výkon sériových kondenzátorů.

Závěrem lze tedy říci, že sériová kompenzace je tím účinnější, čím je větší úhel mezi vektory napětí a proudu, tedy horší účiník.

4. Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie s.r.o.

4.1. Naměřené průběhy ve „Slévárně TS2“ v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim

Poprvé se měření odehrálo dne 15.5.2014 v rozvodně TS 20 na straně VN přes proudový transformátor s převodem 1200/5A a přes napěťový transformátor 6000/100V. Měření probíhalo při 2 tavbách obloukové pece s výkonem 3MVA. Cílem měření bylo zjištění úrovně flickeru na straně VN a následný návrh opatření pro snížení úrovně flicker efektu a pro udržení neutrálního účinníku obloukové pece.

Výkon pecního transformátoru je 3 MVA a tonáž pece je 5 tun/vsázka. Celý tavíci cyklus trvá okolo 90 minut.

Z provedených měření vyplívá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přívodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecních transformátorů je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

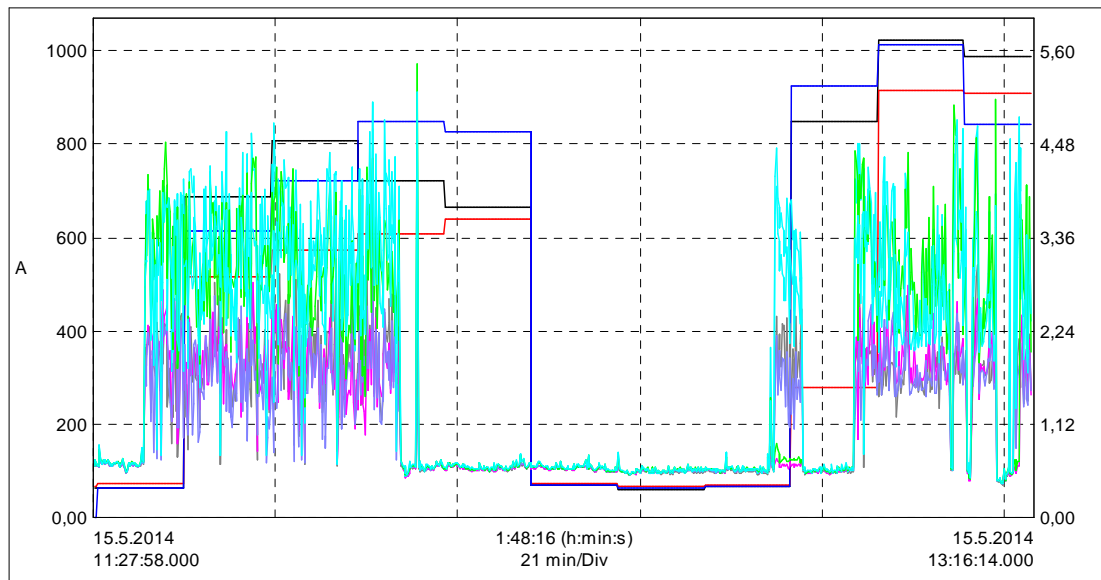
Měření č.1

Měření č.1 probíhalo od 11:27 do 13:16. Na tomto měření je vidět část první tavby (natavování), přičemž náběh obloukové pece trval od 11:33 do 12:07, pak následoval výpadek. V čase 12:55 došlo k opětovnému náběhu obloukové pece až po ustálené tavení v čase 13:16.

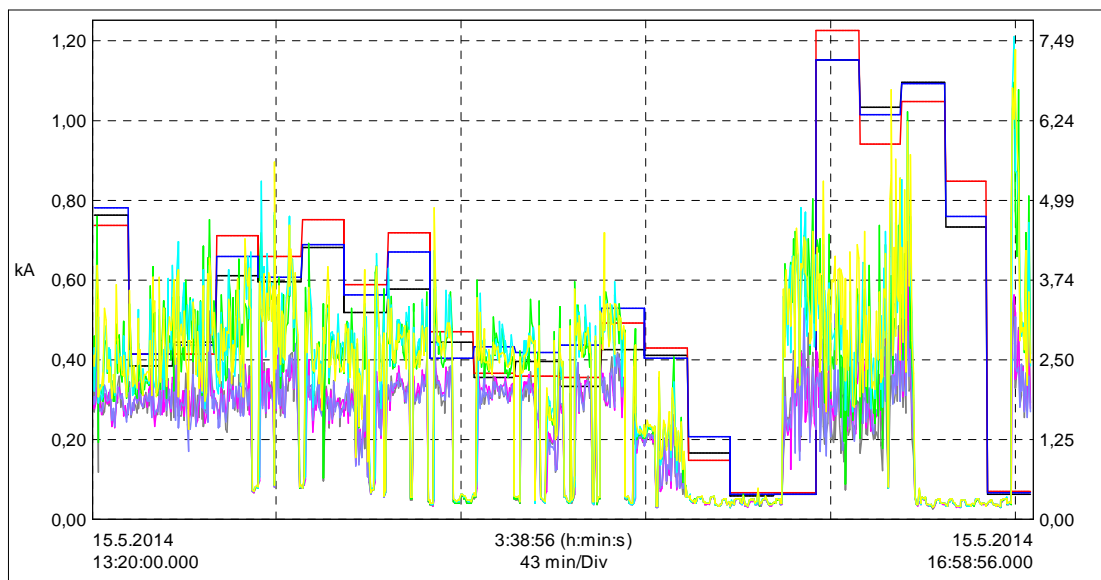
Na následujících dvou grafech jsou zachyceny vlivy provozu obloukové pece na úroveň flicker efektu (na straně VN). Proudy jsou znázorněny světle a náleží jim levá stupnice, flicker efekty jsou tmavé a patří jim pravá stupnice.

Měření č.2

Toto měření začalo v čase 13:20 při ustáleném tavení 1. tavby. V 16:00 začalo natavování 2. tavby. V 16:30 došlo k přerušení 2. tavby z důvodu závady.



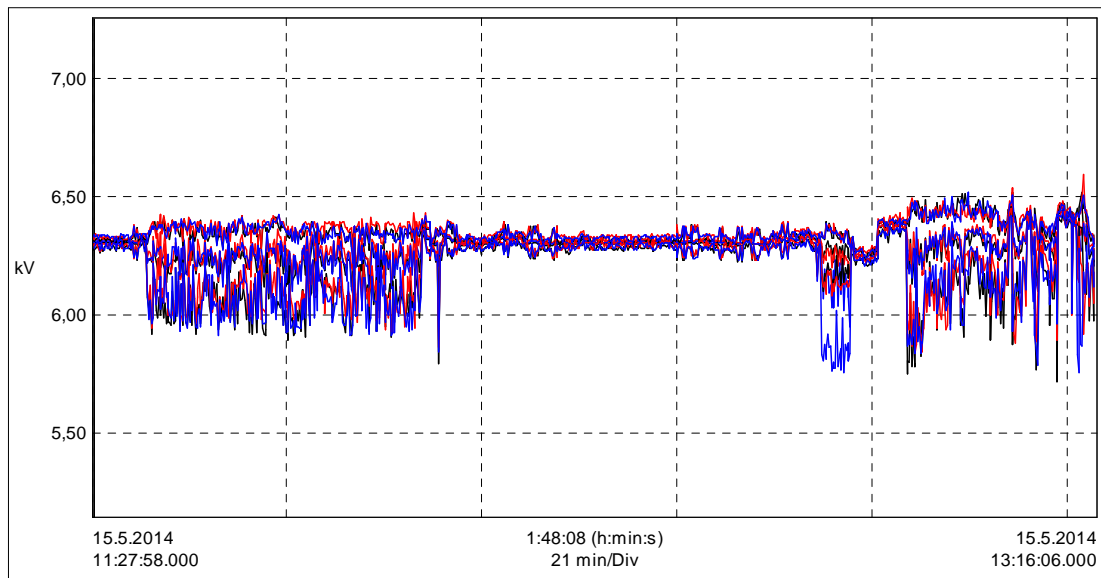
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1



Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2

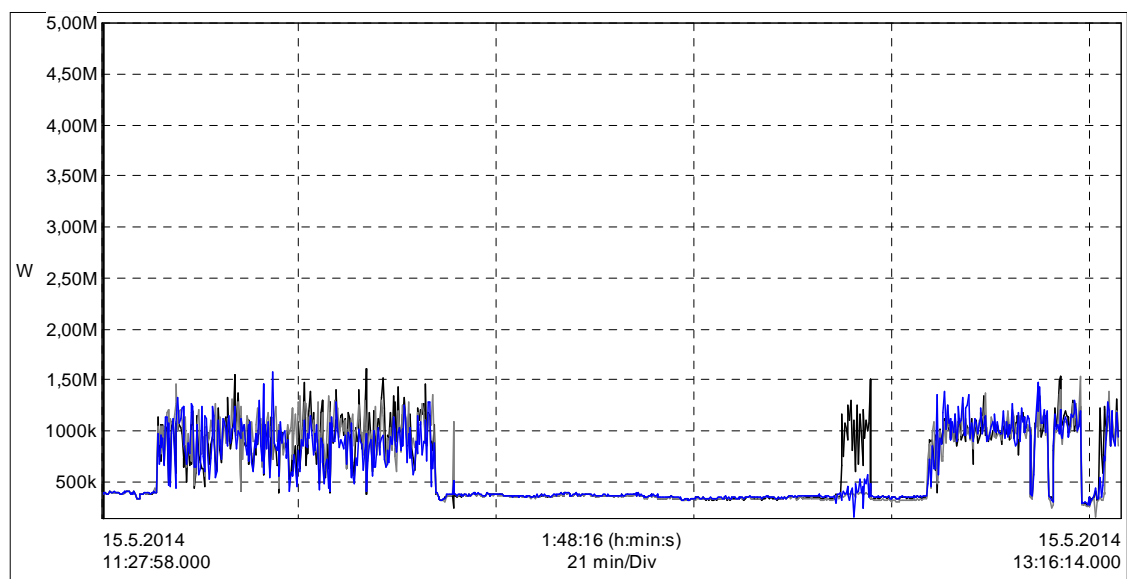
Z těchto dvou grafů můžeme vidět, že při provozu obloukové pece přesahuje úroveň krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu P_{st} hodnoty na straně VN 2,1 – 7,6 krát (na straně NN dokonce 1,4 – 13,7 krát). Povolená mez je stanovena normou ČSN EN 61000-3-3 ed.3 na hodnotu $P_{st} = 1$ (vzorkování po deseti minutách)

Na dalším grafu je vidět kolísání napětí na straně VN při měření č.1. Při provozu elektrické obloukové pece kolísá napětí mezi 5,8 – 6,6 kV. K největšímu kolísání napětí dochází při natavování vsázky.



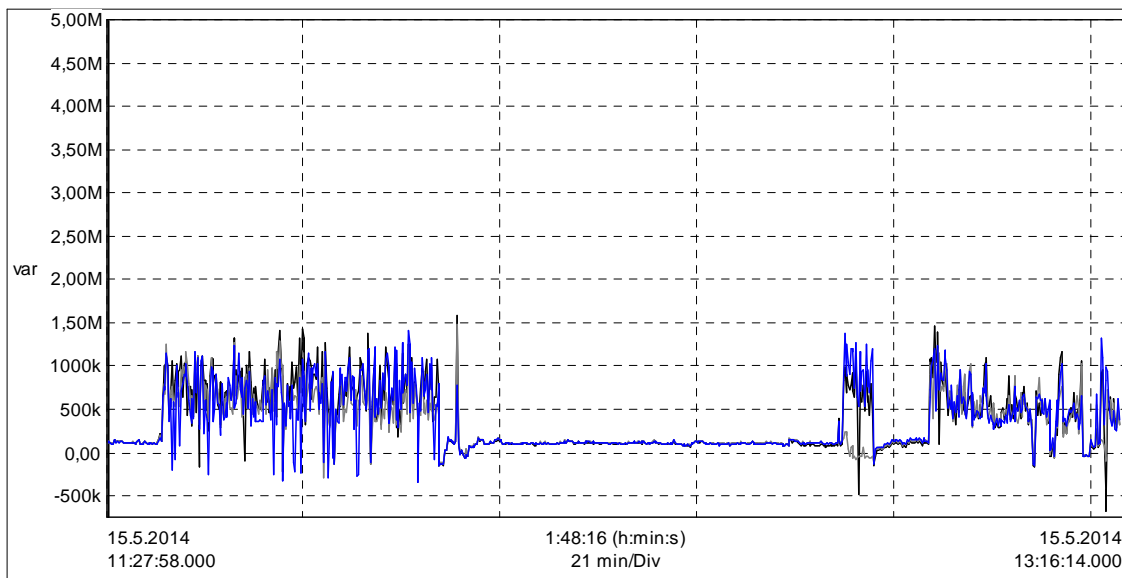
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1

Na následujícím grafu jsou vidět činné výkony jednotlivých fází. Černá znázorňuje fázi L1, šedá fázi L2 a modrá fázi L3.



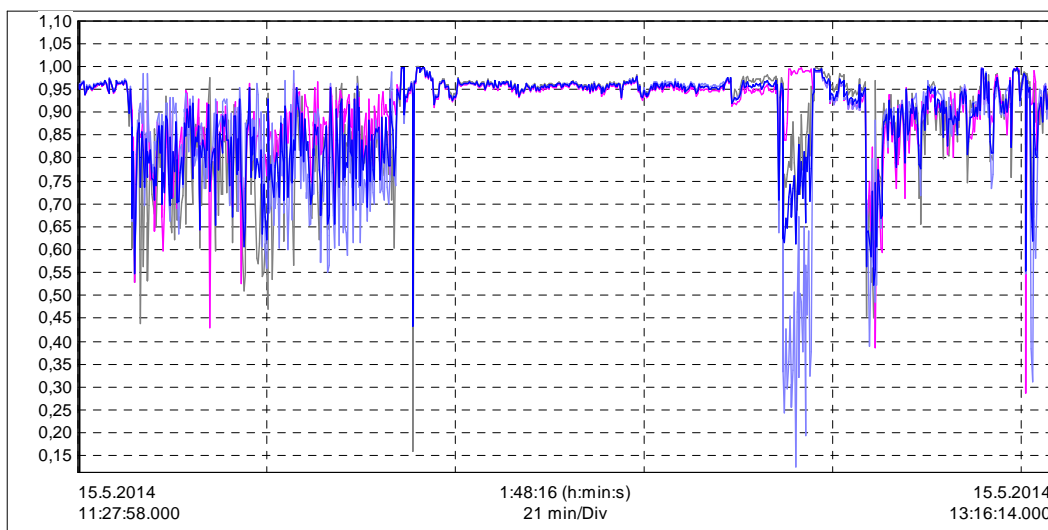
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází

Na dalším grafu jsou zobrazeny průběhy jalových induktivních výkonů. Barevné znázornění jednotlivých fází odpovídá předešlému grafu.

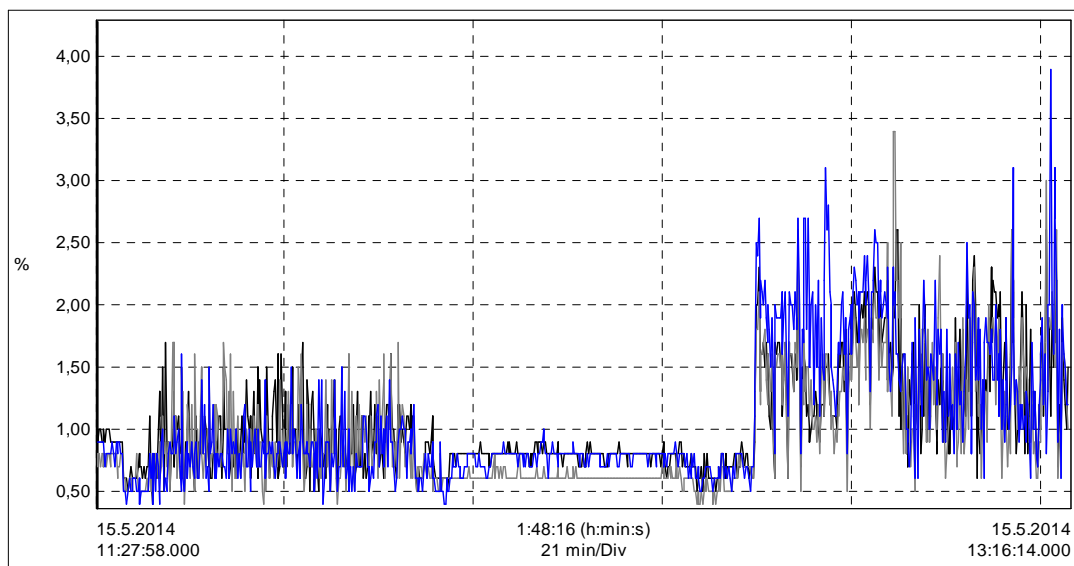


Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází.

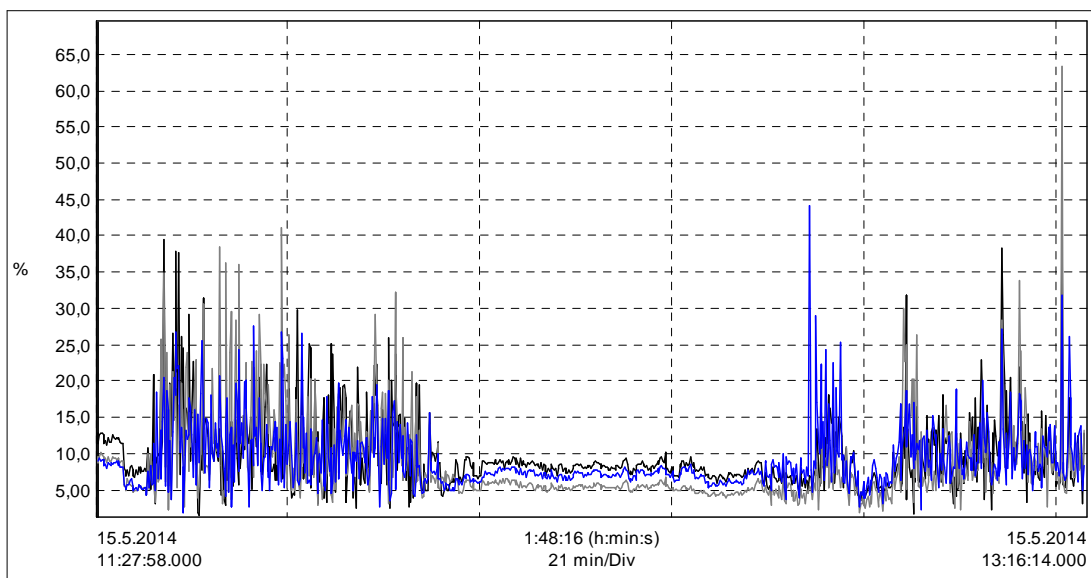
Účinník se při měření č.1 pohyboval v hodnotách znázorněných na následujícím grafu.



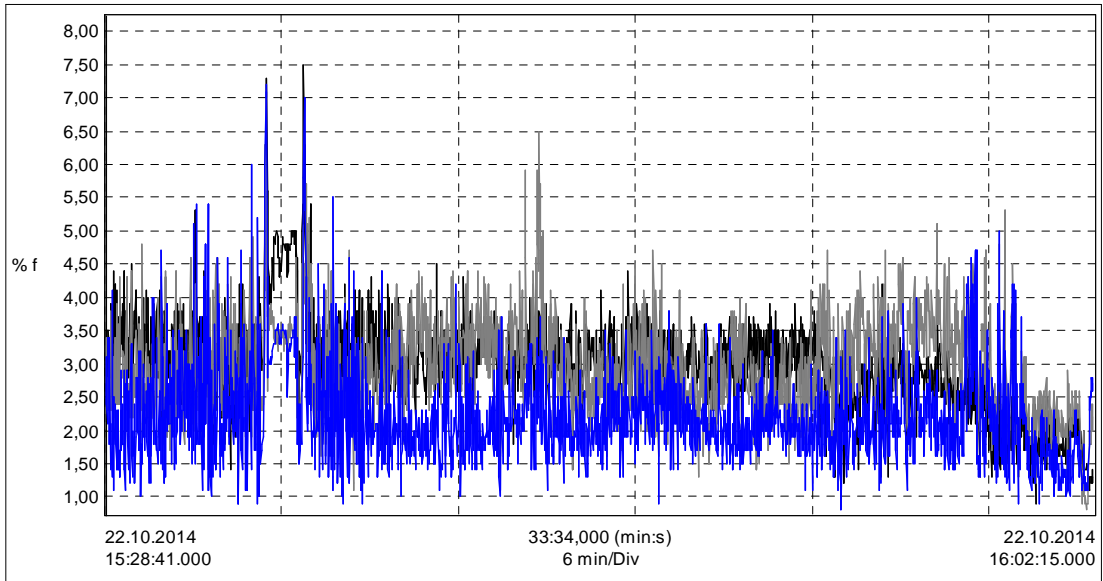
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1



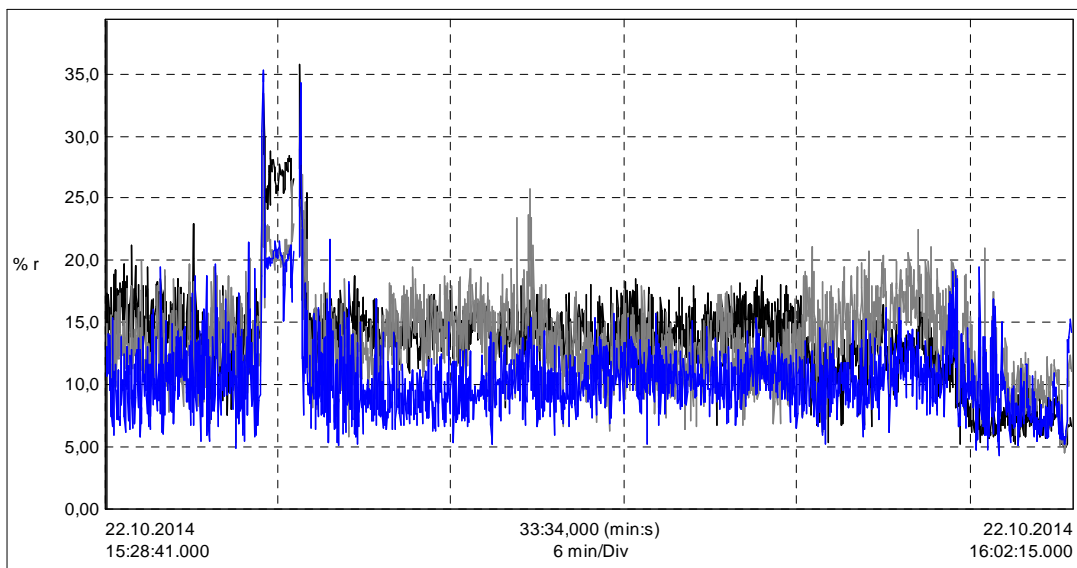
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)

Po prvním měření se uskutečnilo dodatečné měření na NN straně u vypínače kompenzace. Nativování probíhalo od 15:28 do 16:00. Měření bylo určeno hlavně k změření harmonických na straně NN, které se při prvním měření nezaznamenávaly.

Z výše uvedených grafů je vidět, že jalový výkon se skokově mění v řádech jednotek sekund, a proto není možné použití klasicky spínaných kompenzačních stupňů pomocí stykačů, ale musíme použít bezkontaktní tyristorové spínače. Při použití těchto tyristorových spínačů a regulátoru jalového výkonu s rychlou regulací je možné provádět regulaci každých 20 - 30ms. 20ms (délka jedné periody) potřebuje regulátor k měření a vyhodnocení naměřených hodnot a dalších 10ms potřebuje tyristorový spínač k sepnutí kondenzátoru při minimálním rozdílu napětí sítě a napětí kondenzátoru. Klasické vzduchové stykače dokáží spínat 5 – 6 krát za sekundu, ale samotné kondenzátory jsou konstruovány s dobou vybíjení 1 minuta. Při použití klasických vzduchových stykačů by takováto kompenzace nedokázala dostatečně rychle reagovat na změny v síti a docházelo by k nedokompenzování a nebo k překompenzování sítě.

Dále je nutné, aby použité kondenzátory byli v sérii zapojeny s předřadnými hradíci tlumivkami. Tyto tlumivky jsou konstruovány tak, aby tvořily s kondenzátory sériový rezonanční RLC obvod, jehož rezonanční frekvence je zvolena dle frekvence dominantní harmonické (v našem případě je to 5. harmonická – 250Hz). Resonanční frekvence je zvolena pod úroveň dominantní harmonické, v našem případě je standardně vyráběná řada s rezonanční frekvencí 189Hz (činitel zatlumení 7%). Zatlumení kompenzačních kondenzátorů zaručuje, že kondenzátory nebudou při provozu napětově a proudově namáhány vyššími harmonickými. Je taky nutné dodržet to, aby rezonanční frekvence nebyla stejná, nebo příliš blízko frekvenci signálu HDO. Pokud by se tak stalo docházelo by k proudovému přetěžování kompenzace a k odsávání signálu HDO ze sítě, a to by mohlo mít za následek nefunkčnost některých zařízení, která tento signál využívají.

Z provedených měření vyplývá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přívodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecního transformátoru je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

4.2 Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim

Na základě výše uvedených skutečností jsem navrhnul pro snížení hodnoty flicker efektu a pro kompenzaci účinníku v síti obloukové pece dva hrazené kompenzační rozváděče s rychlým spínáním kompenzačních stupňů. Tyto kompenzační rozváděče budou připojeny na sekundární straně transformátorů T201 a T202. Jedná se dva identické kompenzační rozváděče, k jejichž řízení bude sloužit jeden regulátor, který bude paralelně spínat stejné stupně v obou kompenzacích.

Při měření č.1 a č.2 byla stále v provozu ještě stávající kompenzace. Celkový kompenzační výkon tak byl odvozen z naměřených hodnot a z velikosti stávající kompenzace. Stávající kompenzace, ale byla řízena regulátorem QERP, který dostává hodnoty jalového výkonu z elektroměru pomocí impulsních výstupů, a tak není schopen reagovat na náhlé změny jalového výkonu pece. Účinník je proto touto kompenzací regulován zcela minimálně a to hlavně v době natavování vsázky. Navíc díky pomalé regulaci tohoto regulátoru nedochází téměř k žádnému potlačení flickeru a navíc tato kompenzace pozdě odpíná kompenzační stupně a tak tato kompenzace může překompenzovávat (dojde k dodávce kapacitního jalového výkonu do sítě).

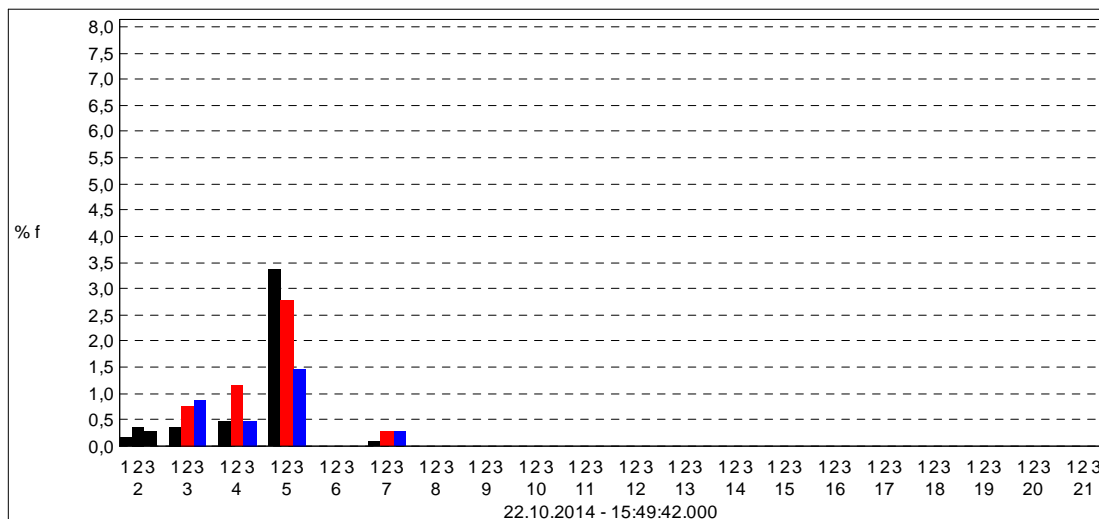
V následující tabulce č. 4.3 jsou uvedeny parametry navrhovaného kompenzačního rozváděče. Celkově se jedná tedy o dvě stejné kompenzace s jedním regulátorem. První kompenzace se připojí na stávající přípojnice po současné kompenzaci na transformátoru T201 a druhá se připojí stejně akorát na transformátor T202. Zapojení stávající kompenzace je vidět na obrázku č. 4.13.

Jako první kompenzační stupeň byl zvolen kondenzátor s kompenzačním výkonem 25kVar. Nižší hodnota jalového výkonu prvního kompenzačního stupně už by byla zbytečná, a regulátor by tak menší stupeň příliš často spínal bez většího vlivu na celkový účinník a na úroveň flicker efektu.

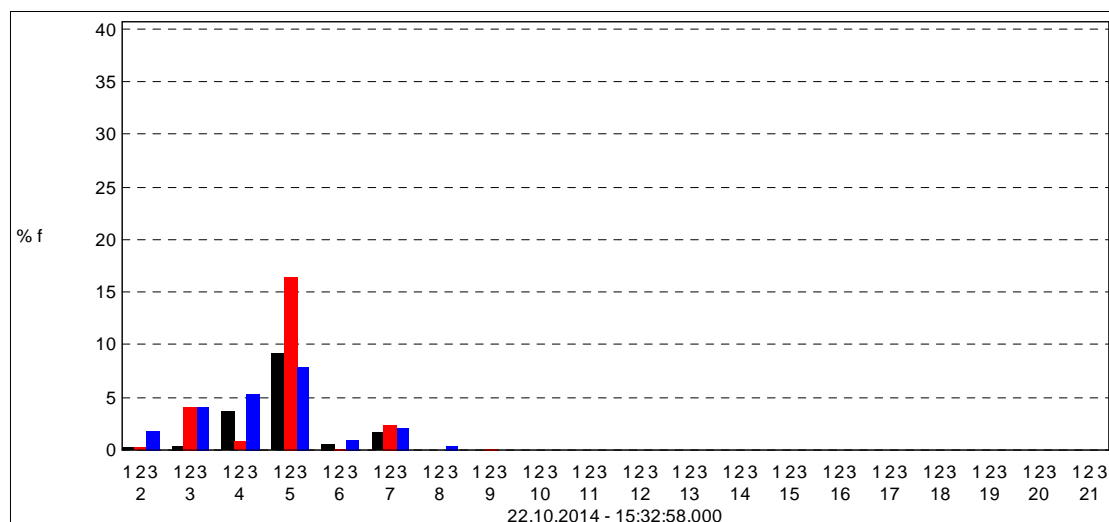
Kompenzace je v hrazeném provedení, a to z důvodu vyšších harmonických v síti a z důvodu omezení strmosti nárůstu proudu při spínání kondenzátorů tyristory. Pokud by strmost nárůstu proudu di/dt byla větší, než dovoluje výrobce tyristorů, mohlo by dojít k destrukci polovodičové vrstvy tyristoru. Dále musíme pro jištění tyristorů použít speciální pojistky s charakteristikou gR nebo aR, které nám zaručují, že při zkratu vybaví pojistky dříve, než dojde k poškození tyristoru.

Z grafu č. 4.11 a 4.12 je vidět, že dominantní harmonickou je 5-tá (250Hz) a proto byla rezonanční frekvence seriového zapojení tlumivky a kondenzátoru zvolena na hodnotu 189Hz (činitel ztlumení $p=7\%$).

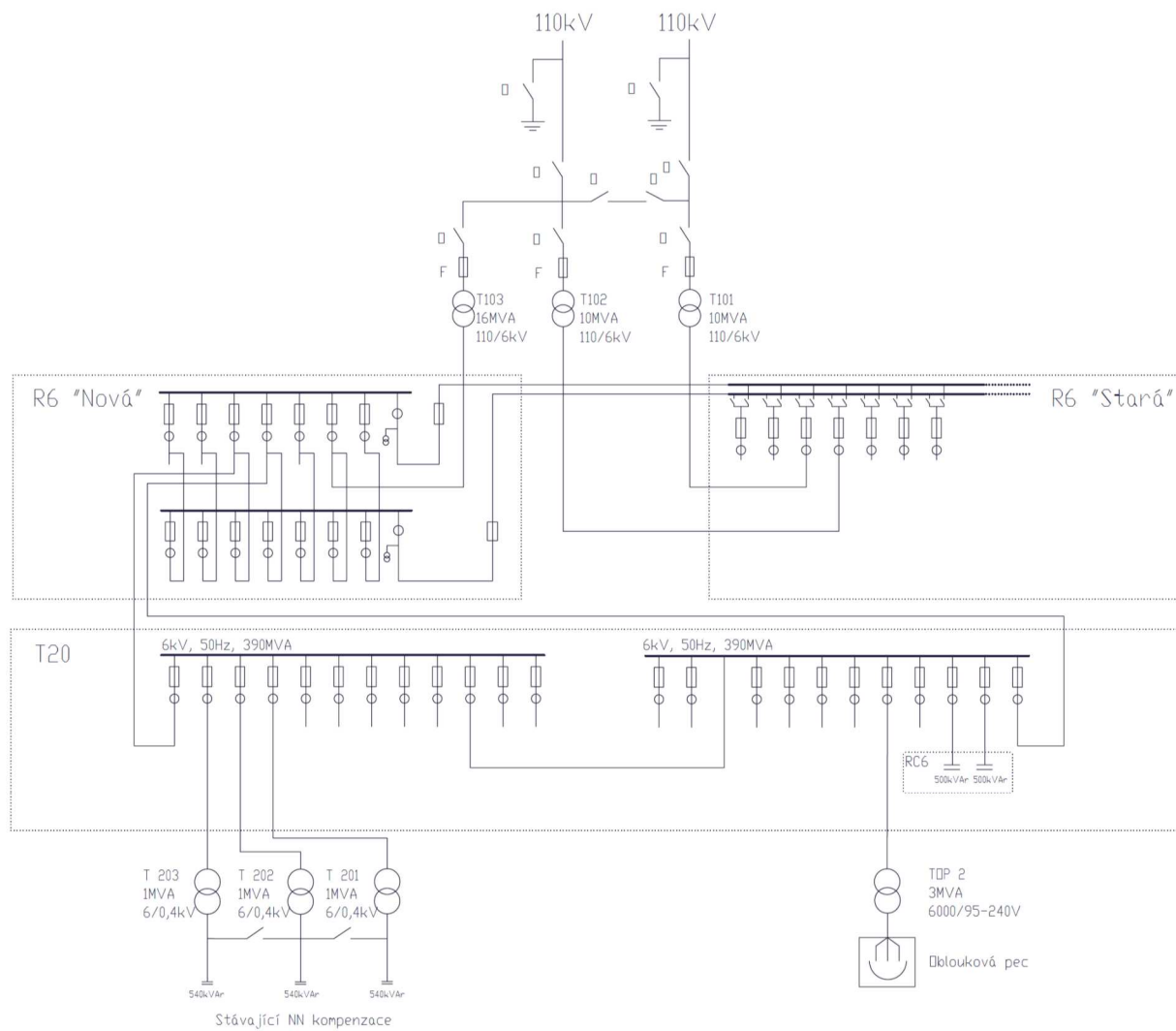
V příloze č.1 a č.2 je vidět schéma kompenzačního rozváděče a jeho model.



Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



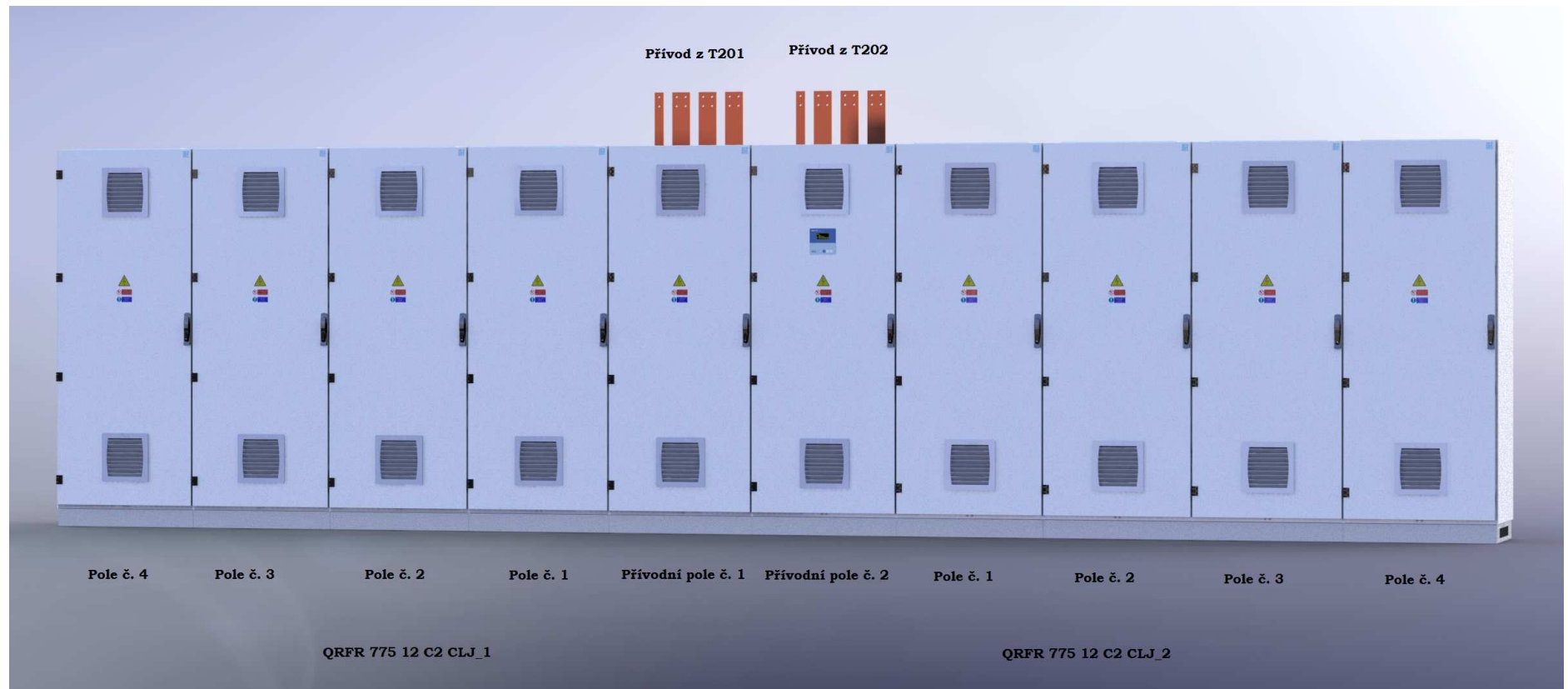
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů

Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče

RYCHLÝ HRAZENÝ KOMPENZAČNÍ ROZVÁDĚČ NN		
Typ		QRFR 775 12 C2 CLJ
Napěťová soustava	-	3/PEN 400/230 V AC, 50 Hz, TN-C
Jmenovitý kompenzační výkon	kvar	688,71
Jmenovitý instalovaný výkon	kvar	775,00
Jmenovitý proud	A	994
Zatlumení	Hz	189
Činitel zatlumení p	%	7
Nejmenší stupeň	kvar	25
Počet stupňů	-	12
Řazení (váhy) stupňů	-	1:2:2:2:2:2:2:4:4:4:4
Počet možností regulace	-	32
Situování přívodu	-	Pomocí stávajících přípojníc shora
Provedení přívodu	-	připraveno pro připojení na přípojnice
Hlavní prvek přívodu	-	Výkonový jistič 1600A
Počet polí	-	5
Zkratová odolnost	kA	65
Spínání kompenzačních stupňů	-	Tyristorové moduly CTU
Regulace (regulátor)	-	FCR12TRX-12
Kondenzátory	-	ZEZ SILKO, 440V , 50Hz, 3f, přetlakový odpojovač, vybíjecí rezistory
Tlumivky	-	ZEZ Cuk, 400/440/189, 50Hz, 3f, tepelná poj.
Větrání	-	nucené
Krytí	-	IP40/00
Teplota prostředí	-	vnitřní provedení 5°C / max. 40 °C, nejvyšší střední hodnota za 24 hod. max. 35 °C
Vnější vlivy	-	vnitřní provedení - třída vlivu dle ČSN 33 2000-5-51- prostory normální
Proudový obvod regulátoru	-	x/5 A nebo x/1 A, max. spotřeba 1 VA
Provedení skříně	-	oceloplechová
Rozměry zařízení - š x v x h	mm	4000x2100x600
Hmotnost	kg	1660



Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2

5. Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece

Přínos kompenzačního rozváděče na zlepšení úrovně flickeru a zlepšení hodnoty účinníku nebylo možné na místě ověřit, protože nedošlo k realizaci z finančních důvodů. Proto bude přínos kompenzačního rozváděče simulován na matematickém modelu elektrické obloukové pece.

5.1 Matematický model obloukové pece

Matematický model obloukové pece [10] se skládá z modelu sítě a modelu samostatné pec. Pro účely ověření funkčnosti kompenzace jsem využil stávající model, u kterého jsem upravil parametry prvků v obvodu tak, aby přibližně odpovídaly chování reálné obloukové pece při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Schéma matematického modelu je v příloze. Výsledná rovnice 2.57 popisující vodivost oblouku a tak i jeho chování vznikla spojením Cassiho modelu pro velké proudy a Mayerova modelu pro malé proudy oblouku.

$$G = G_{min} + \frac{vi}{(A+Bl)^2} \left(1 - e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} \right) + \frac{i^2}{P_0} e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (2.57)$$

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 e^{\left(\frac{-\alpha}{|i|}\right)} \quad (2.58)$$

G.....vodivost oblouku

G_{min}minimální vodivost prostředí mezi elektrodami ve stavu kdy nehoří oblouk

v.....napětí oblouku

i.....proud oblouku

A.....konstanta oblouku

B.....konstanta oblouku

l.....délka oblouku

P_0ztrátový výkon oblouku

θčasová deionizační konstanta

θ_0minimální deionizační konstanta

θ_1proměnlivá deionizační konstanta

Matematický model se snaží věrně napodobit chování obloukové pece při natavování, kdy se velice často a výrazně mění délka oblouku a dále pro ustálenou tavbu, kdy se už je délka oblouku poměrně konstantní. Bohužel jsem neměl možnost měřit přímo na sekundární straně pecního transformátoru a tak nedokáži úplně přesně porovnat průběhy reálné pece a matematického modelu, ale snažil jsem se, aby byly parametry co nejvíce podobné, tak aby bylo možné alespoň částečně objektivně posoudit přínos kompenzace na změnu úrovně flicker efektu.

5.2 Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě

Dle očekávání se flicker efekt pece na straně VN (6kV) s použitím kompenzace snížil. Hodnoty vzešlé z matematického modelu nejsou úplně stejné, jako ty které bychom získali z reálného měření na peci. Toto je způsobeno především neznalostí reálných parametrů obloukové pece, které se zřejmě liší od parametrů pece v matematickém modelu. Simulace použití kompenzačního zařízení s rychlým spínáním kompenzačních stupňů především dokázala, že kompenzační zařízení má pozitivní vliv na úroveň flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí. Dále dle očekávání došlo k výraznému zlepšení účinníku sítě. Simulace proběhla při dvou stavech obloukové pece, a to při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Výsledné hodnoty P_{ST} (short time flicker effect) pro oba stavy pece s kompenzací a bez kompenzace jsou uvedeny v následující tabulce č. 4.4.

Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty

Natavování vsázky		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	5,3	4,4
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,41	0,37
PF	0,55 - 1	0,75 - 1
Ustálená tavba		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	0,65	0,6
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,13	0,13
PF	0,6 - 1	0,75 - 1

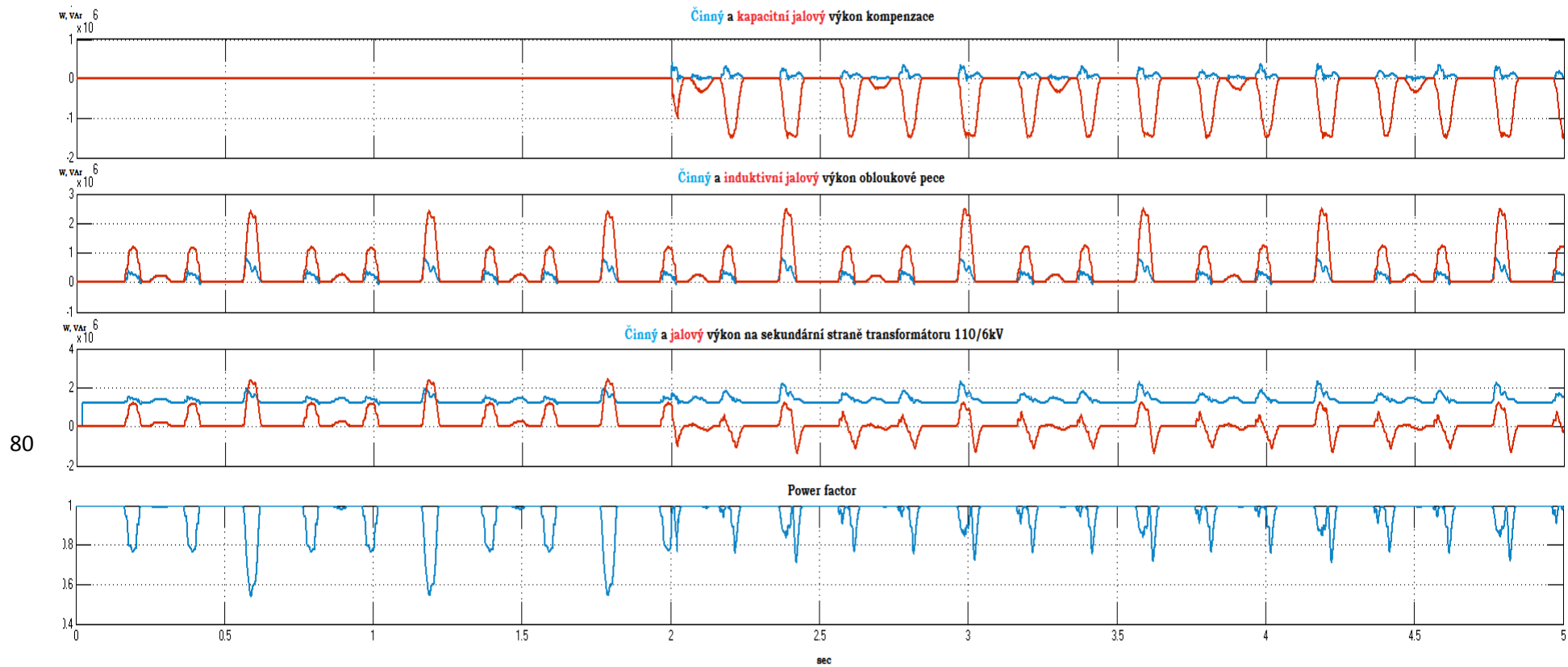
Z výsledných hodnot je vidět, že příznivý vliv kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu v síti se projevuje především při natavování vsázky, kdy se často mění délka oblouku a následně proud obloukovou pecí. Při těchto změnách umožňuje kompenzace s rychlým spínáním kompenzačních stupňů skoro okamžitě reagovat na změnu velikosti jalového výkonu pece a jeho vykompenzováním tak snížit úbytky napětí a úroveň flicker efektu. Kromě snížení úrovně flicker efektu dojde také k zlepšení účinníku

sítě, a tak se provozovatel vyhne pokutám ze strany dodavatele elektrické energie za nedodržení účinníku v rozmezí 0,95 až 1 (induktivní charakter odběru). V reálné síti pro kterou byla kompenzace navrhována se nachází další odběry činného a jalového výkonu, a tak by se účinník při provozu kompenzace pohyboval v rozmezí hodnot 0,95 – 1.

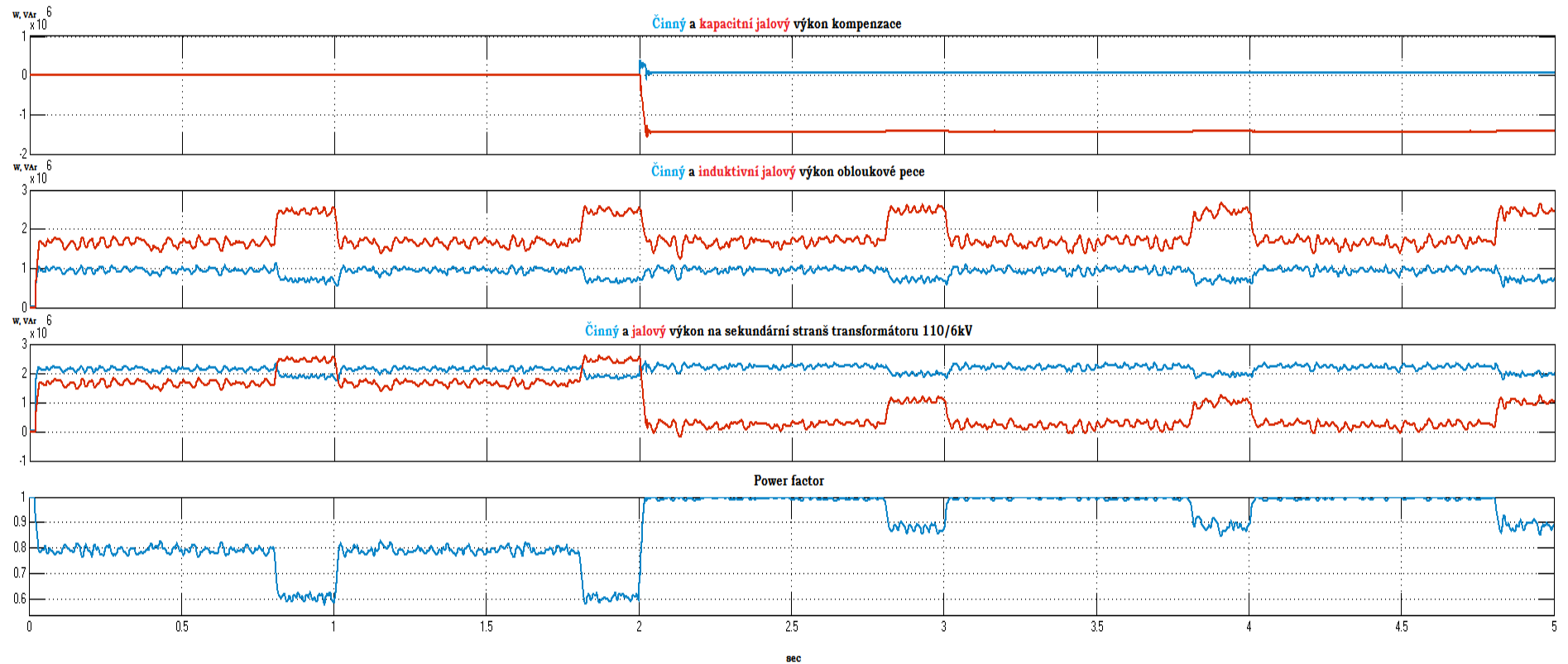
Při ustálené tabbě už nedochází k tak častým a velkým změnám délky oblouku a velikosti proudu obloukové pece. Díky tomu se výrazně sníží úroveň flicker efektu v síti. V této fázi tabby už má kompenzace malý vliv na změnu hodnoty flicker efektu a slouží především ke kompenzaci účinníku sítě.

Z matematického modelu vyplývá, že hodnota flicker efektu při natavování vsázky klesla na straně VN 6kV z 5,3 bez kompenzace na hodnotu 4,4 s kompenzací. I tato hodnota nevyhovuje normě ČSN EN 61000-3-3 ed.3, která požaduje úroveň flicker efektu $P_{ST} \leq 1$, ale v reálném provozu může být situace odlišná a vliv kompenzace na úroveň flicker efektu větší. Power factor, tedy účinník spočítaný z celkového jalového výkonu včetně harmonických a meziharmonických, se zlepšil z hodnoty mezi 0,55 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.15 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). Při ustálené tabbě se úroveň flicker efektu skoro nezměnila. Power factor se z hodnoty mezi 0,6 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.16 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). V síti s obloukovou pecí se v reálném provozu nachází další odběry činné a jalové energie, a tak by se účinník s použitím kompenzace pohyboval zase okolo hodnoty mezi 0,95 a 1.

V matematickém modelu kompenzace zvládne kompenzovat účinník pouze při hodnotě jalového výkonu nad 50 kVAr, ale v reálném provozu je hodnota odběru činného a jalového výkonu i při vypnuté obloukové peci dostatečně velká na to, aby první stupeň kompenzace 50 kVAr vyhověl požadavku na to, aby se účinník pohyboval v dovolených mezích.



Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky



Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavně

6. Závěr

Cílem této práce bylo především prezentovat parametry pro posouzení kvality elektrické sítě a to konkrétně v síti s elektrickou obloukovou pecí. Parametry pro posouzení kvality sítě vycházejí z platných zákonů a norem České republiky. Dále jsem se pokusil poukázat na problémy, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece v síti. Především jsem se zaměřil na zhoršení úrovně flicker efektu a zhoršení účinníku v síti s obloukovou pecí. Samozřejmě, že tyto dva parametry nejsou jediné, které se při provozu pece zhorší. Dále by se šlo zabývat zvýšením hodnoty harmonických, nesymetrickým zatížení sítě, atd. .

Tato práce mi posloužila k hlubšímu porozumění parametrů, které slouží pro posouzení kvality elektrické sítě a to především se spojitostí s elektrickou obloukovou pecí. Jelikož se touto tématikou zabývám i ve svém zaměstnání, snažil jsem si vybrat pro svůj návrh zlepšení kvality elektrické energie reálnou aplikaci, pro kterou jsem navrhl kompenzační zařízení. Bohužel však do dnešního dne nedošlo k instalaci kompenzačního rozváděče a tak jsem nemohl ověřit reálný pozitivní přínos kompenzace na síť s obloukovou pecí. Z těchto důvodů byl pro posouzení přínosu kompenzace použit matematický model obloukové pece. Matematický model jsem se snažil co nejvíce přiblížit reálným parametrům pece v závodě Metalurgie Chrudim, ale i tak se model od reálné pece v různých parametrech liší. I přes tyto rozdíly se ale prokázal pozitivní přínos kompenzace na zlepšení úrovně flicker efektu a účinníku v síti s obloukovou pecí. Doufám, že v budoucnosti bude možnost ověřit výsledky této práce i na reálném zařízení.

Seznam použité literatury

[1] ČSN EN 50160

[2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. Voltage quality in electrical power systems. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755

[3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

[4] TLUSTÝ, J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999

[5] ČSN EN 61000-3-3 ed. 3

[6] PNE 33 3430-1

[7] PNE 33 3430-4

[8] CHAPMAN, David. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Příčiny a účinky. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[9] FASSBINDER, Stefan. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Kondenzátory v prostředích s vyšším obsahem harmonických. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-2-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[10] TAVAKOLI Abdolreza, Mehdi EHSAN a Seyed Mohammad Tagie BATAHIEE. A SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Inactive Power Compensation by Using STATCOM. Journal of Applied Mathematics: Islamic Azad University of Lahijan. 2006, vol. 3, no.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

ZLEPŠENÍ KVALITY ELEKTRICKÉ ENERGIE V SÍTI S ELEKTRICKOU OBLOUKOVOU PECÍ

IMPROVING POWER QUALITY IN THE NETWORK WITH AN ELECTRIC ARC FURNACE

DAVID SEGETH

Vedoucí práce: Čerňan Martin Ing.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Květen 2015

Poděkování

Tato práce je vyústěním celého mého studia na Českém vysokém učení technickém v Praze a mého zájmu o danou problematiku.

Při psaní této práce jsem zejména ocenil pomoc a podporu pana inženýra Čerňana, který mi byl oporou nejenom po stránce poskytování informací k práci, ale také chci srdečně poděkovat za jeho vedení.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kolegům v práci za jejich pevné nervy a všestrannou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Bílé Vodě dne 5. května 2015

Anotace:

Práce se zabývá problematikou kvality elektrické energie v sítích s obloukovými pecemi. Především se jedná o problémy s vysokou hladinou flicker efektu a s kompenzací odběru jalového výkonu. V první části práce jsou popsány požadavky na kvalitu elektrické energie, které stanovuje zákon č. 458/2000 Sb. a související vyhlášky a normy. Další část práce je zaměřena na popis problémů, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece na síť. Poslední část práce se zabývá prostředky, které lze použít pro zlepšení kvality elektrické energie v závodě slévárny Metalurgie s.r.o. Chrudim.

Annotation:

This work deals with the quality of the electricity network with arc furnaces. Above all it is a problem with a high level of flicker effect and with power factor correction. In the first part there is described the requirements for power quality, which are set by law no. 458/2000 Coll. and related regulations and standards. Another part is focused on the description of the problems that caused the operation of electric arc furnac. The last part deals with resources that can be used to improve the quality of electricity in the plant foundry Metallurgy Ltd. Chrudim.

Obsah

1 Úvod.....	14
2 Parametry pro posouzení kvality elektrické energie.....	15
2.1 Velikost napájecího napětí.....	15
2.1.1 <i>Definice a původ úbytků napětí.....</i>	<i>15</i>
2.1.2 <i>Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance.....</i>	<i>16</i>
2.1.3 <i>Definice poklesu napětí.....</i>	<i>17</i>
2.1.4 <i>Původ poklesu napětí a přepětí.....</i>	<i>17</i>
2.2 Harmonické zkreslení.....	18
2.2.1 <i>Původ vyšších harmonických.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Matematické vzorce pro vyšší harmonické.....</i>	<i>19</i>
2.2.3 <i>Fourierova transformace.....</i>	<i>22</i>
2.2.4 <i>Harmonické a jejich šíření v síti.....</i>	<i>23</i>
2.2.5 <i>Zdroje vyšších harmonických napětí.....</i>	<i>25</i>
2.2.6 <i>Zdroje vyšších harmonických proudů.....</i>	<i>25</i>
2.2.7 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy.....</i>	<i>27</i>
2.2.8 <i>Problémy způsobené harmonickými napětími.....</i>	<i>30</i>
2.2.9 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti.....</i>	<i>32</i>
2.2.10 <i>Mezní hodnoty vyšších harmonických.....</i>	<i>32</i>
2.2.11 <i>Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických.....</i>	<i>37</i>
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt.....	39

2.3.1	<i>Příčiny kolísání napětí.....</i>	40
2.3.2	<i>Účinky kolísání napětí na světelné zdroje.....</i>	40
3.	Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece.....	42
3.1	Elektrický oblouk.....	42
3.1.1	<i>Stejnoseměrný elektrický oblouk.....</i>	44
3.1.2	<i>Střídavý elektrický oblouk.....</i>	45
3.2	Elektrické obloukové pece.....	46
3.2.1	<i>Pece s přímým obloukem.....</i>	46
3.2.2	<i>Pece s vodivým dnem.....</i>	47
3.2.3	<i>Pece s nevodivým dnem.....</i>	48
3.2.4	<i>Pece s nepřímým obloukem.....</i>	48
3.2.5	<i>Pece se zakrytým obloukem.....</i>	49
3.3	Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece.....	50
3.3.1	<i>Napájecí síť obloukové pece.....</i>	52
3.3.2	<i>Pecní transformátor.....</i>	52
3.3.3	<i>Krátká cesta.....</i>	52
3.3.4	<i>Elektrody obloukových pecí.....</i>	55
3.4	Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí.....	56
3.4.1	<i>První typ změn proudového zatížení.....</i>	56
3.4.2	<i>Druhý typ změn proudového zatížení</i>	56
3.4.3	<i>Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn.....</i>	56
3.5	Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť.....	58

3.5.1 Omezení zkratových a velkých proudů.....	58
3.5.2 Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení.....	58
3.5.3 Nepřímá kompenzace.....	58
3.5.4 Přímá kompenzace.....	59
3.5.5 Sério-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece.....	60
4. Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie, s.r.o.	63
4.1 Naměřené průběhy ve “Slévárně TS2” v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim.....	63
4.2 Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim.....	70
5. Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece	75
5.1 Matematický model obloukové pece.....	75
5.2 Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě.....	76
6. Závěr.....	80
Seznam použité literatury.....	81

Seznam obrázků

Obr. č. 2.1 Definice poklesu napětí a přepětí.....	17
Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických.....	21
Obr. č. 2.3 3. a 5. harmonická proud.....	24
Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla.....	26
Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku	27
Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči.....	28
Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor.....	30
Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže.....	31
Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže.....	32
Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě.....	40
Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě.....	41
Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky.....	42
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku.....	43
Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích	44
Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk.....	44
Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem.....	45
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností.....	46
Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem.....	47
Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem.....	47
Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem.....	48
Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem.....	49
Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem.....	49
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí.....	50
Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť.....	51
Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece.....	53
Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty.....	54

Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace.....	59
Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem.....	59
Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem	59
Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece.....	60
Obr. č. 3.20 Vektorový diagram sério-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece	61
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1.....	64
Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2.....	64
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1.....	65
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází	65
Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází	66
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1.....	66
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické.....	71
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické.....	71
Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů.....	72
Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2.....	74
Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky	78
Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavbě.....	79

Seznam tabulek

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn	33
Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn	37
Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče	73
Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty.....	76

1. Úvod

Elektrická energie jakožto spotřební zboží musí podléhat mnoha parametrům, tak aby bylo možno posuzovat její kvalitu. V dřívějších dobách nám pro posouzení kvality elektrické energie stačily pouze dva základní ukazatele. Tím prvním je velikost napětí sítě a kmitočet. Postupem času se, ale díky masivnímu rozvoji v elektrotechnice a elektronice tyto dva základní parametry ukazují jako nedostatečné pro objektivní posouzení parametrů sítě. Postupem času díky ekologickým a hospodářským tlakům došlo k masivnějšímu rozšíření elektrických zařízení s úsporným provozem. Většina těchto zařízení má nelineární nebo proměnlivé provozní charakteristiky. S tímto vývojem jsou pak spjaty stále více se projevující zpětné vlivy na síť. Tyto zpětné vlivy pak následně mohou za určitých podmínek negativně ovlivňovat provoz jiných elektrických zařízení.

Kvalita elektrické energie je v poslední době velice diskutovaným tématem a to jak z energetických tak ekonomických důvodů. Z energetického pohledu jde převážně o dodržení dodávek elektrické energie odpovídajících parametrů a o dodržení směrnic o elektromagnetické kompatibilitě. Ekonomický dopad je pak dán hlavně nevhodným technickým řešením, které se následně projeví, jako zvýšení ztrát, přerušení dodávky nebo sankcí za porušení smluvních dohod.

Rostoucí úroveň energetického rušení je úzce spjatá s nárůstem moderních spotřebičů u odběratelů. V dřívějších dobách se u odběratelů nevyskytovali spotřebiče jako frekvenční měniče, spínané zdroje apod. a u odběratelů se většinou nacházely pouze asynchronní motory a spotřebiče s odporovým charakterem. Tento typ spotřebičů vyžadoval pouze paralelní kompenzaci odběru jalového výkonu. Pro paralelní kompenzaci se v dnešní době převážně využívají kompenzační kondenzátory. Tento typ kompenzace je v dnešní době stále hojně využíván, avšak s nárůstem energetického rušení už není v některých případech možné připojit pouze kompenzační kondenzátory, ale je nutné tyto kondenzátory chránit před účinky rušení sítě.

Tato práce práci se zabývá především kompenzací jalového odběru a úrovní flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí.

2. Parametry pro posouzení kvality elektrické energie

Dodávky elektrické energie se řídí dle PPDS (Pravidel provozování distribučních soustav), které vychází ze zákona č. 458/2000 Sb. a z vyhlášky č. 540/2005 Sb. Pro technické posouzení kvality elektrické energie se práce bude zabývat pouze těmi ukazateli, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160 a v PNE 33 3430. Norma ČSN EN 50160 uvádí hlavní parametry elektrické energie v místech připojení odběratelů z veřejné distribuční sítě. Tato norma platí jak pro síť NN tak i pro síť VN. Mezi tyto ukazatele patří:

- Velikost napájecího napětí (poklesy napětí a přepětí)
- Harmonické zkreslení
- Rychlé změny napětí (flicker efekt)
- Symetrie třífázového napětí

Podrobněji budu jednotlivé z těchto ukazatelů popisovat dále.

2.1 Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dle normy ČSN EN 50160 definována pro společný napájecí bod (PCC). Úbytky napětí jsou závislé na velikosti protékajícího proudu a na vzdálenosti spotřebitele. Tyto úbytky se se u různých spotřebitelů liší a mění se v závislosti na čase. Distribuční síť musí udržet napětí v rozmezí $U_n \pm 10\%$ a to bez ohledu na odběr spotřebitele.

2.1.1 Definice a původ úbytků napětí

Rozdíl mezi napětím ve společném napájecím bodě U_1 a napětím v místě odběru U můžeme definovat následujícím vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U \quad (2.1)$$

nebo v procentech

$$\Delta U_{\%} = \left[\frac{U_1 - U}{U_n} \right] * 100 \quad (2.2)$$

kde U_1 , U a U_n jsou absolutní hodnoty fázorů fázového napětí.

Dále může být úbytek napětí definován následovně (při zanedbání činného úbytku na reaktanci a jalového úbytku na odporu):

$$\Delta U = I_{\tilde{c}} R_s + I_j X_s \quad (2.3)$$

kde R_s a X_s je činná a induktivní část síťové impedance, I_c a I_j je činná a jalová (předpokládá se induktivní) část odběrového proudu. Pro výpočet úbytku napětí pro základní harmonickou by měla být brána v úvahu:

- pro jednofázové odběry impedance smyčky Z_f (impedance fázového vodiče) + Z_n (impedance středního vodiče)
- pro symetrické trojfázové odběry impedance Z_f

V normě ČSN EN 61000-3-1 se uvádí, že pro spotřebitelskou síť o frekvenci 50Hz mají být použity tyto impedance:

Impedance fázového vodiče:

$$Z_f = 0,24 + j0,15 \Omega \quad (2.4)$$

Impedance středního vodiče :

$$Z_n = 0,16 + j0,1 \Omega \quad (2.5)$$

Impedance související s úbytkem napětí se skládá ze dvou částí, a to induktivní části, která je dána zejména rozptylovou indukčností transformátoru a odporovou částí, kterou tvoří zejména odpor vodiče nízkého napětí. Vzhledem k poměru velikostí obou částí impedance je možné v síti nízkého napětí uvažovat, že pokles napětí mezi napájecím bodem sítě a spotřebitelem odpovídá ztrátám na odporu vedení ($\Delta U \approx RI^2$)

2.1.2 Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance

Pokud se napětí sítě bude pohybovat mimo vymezené tolerance může to způsobovat u spotřebitelů značné problémy:

vyšší než dovolené napětí

Pokud je hodnota napětí vyšší než dovolená bude to u spotřebitele způsobovat zkracování životnosti zařízení (např. žárovky) a bude docházet ke zkracování životnosti izolace. Dále se také zvýší ztráty a výrazně vzroste poruchovost zařízení.

nižší než dovolené

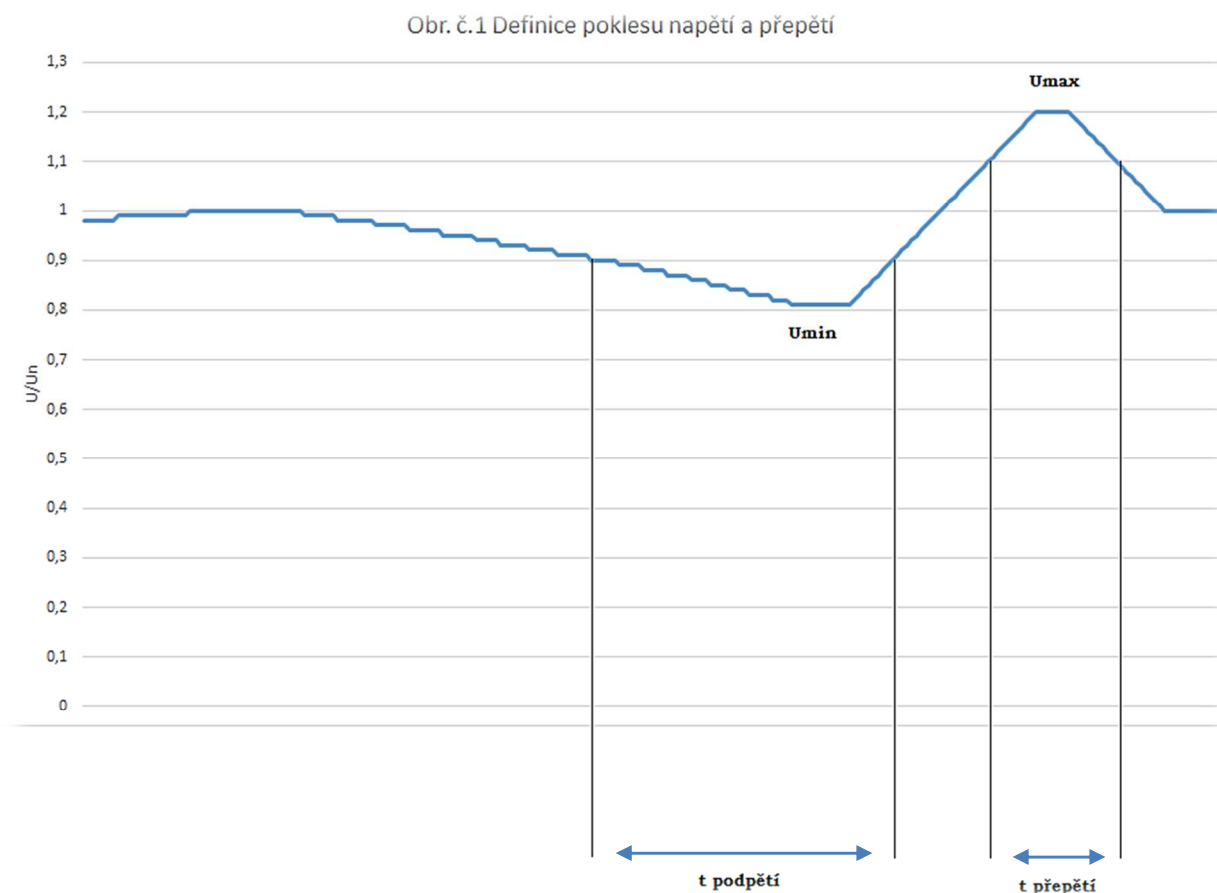
Pokud je hodnota napětí nižší než dovolená způsobí to pokles výkonu zařízení a to pak nedokáže udržet jmenovité parametry. Při dalším poklesu napětí se může začít projevovat nefunkčnost různých typů zařízení, nebo dokonce nemožnost jejich zapnutí.

2.1.3 Definice poklesu napětí

Změny napětí jsou definovány pomocí efektivní hodnoty napětí. Dle normy ČSN EN 61000-3-3 je změna napětí charakterizována těmito ukazateli:

- Trvání napěťového poklesu
- Nejmenší poměrné napětí v době poklesu napětí
- Trvání přepětí
- Poměrné napětí v době přepětí

Definice těchto ukazatelů je uvedena na obrázku č. 2.1



Obr. č.2.1 Definice poklesu napětí a přepětí

2.1.4 Původ poklesu napětí a přepětí

V běžném provozu se napětí pohybuje ve stanovených mezích. Dle specifikací uvedených v normě ČSN EN 50160 je měřené napětí v průběhu jakéhokoliv týdne v roce dáno 95% statistickou hodnotou zprůměrovaných 10 minutových měření hodnot efektivních hodnot napětí. Tato hodnota se pak musí pohybovat v mezích daných touto normou. V případě zbývajících 5% neexistuje žádné nařízení. To ale neznamená, že se napětí může pohybovat v libovolných mezích.

Původy poklesu napětí a přepětí se dají rozdělit na dva typy:

- Vytvářené nebo ovlivněné spotřebiteli
- Způsobené chybami sítě

Mezi první typ patří například náhlé odlehčení sítě po odepnutí zařízení většího výkonu. Mezi druhý typ patří například chyby způsobené zkratem nebo nedostatečně rychlým řízením elektrického systému (pomalé reakce na aktuální zatížení sítě).

Dále se tyto poklesy a přepětí dají rozdělit dle doby trvání:

- Krátké
- Dlouhé

Krátké poklesy nebo přerušení napětí mohou být eliminovány správným nastavením ochran a použitím záložních zdrojů UPS.

Dlouhé poklesy napětí se nazývají výpadky a jsou většinou způsobeny poruchami na vedení nebo u zdroje.

2.2 Harmonické zkreslení

V distribučních a průmyslových sítích se v dnešní době nevyskytují čistě sinusové průběhy napětí a proudu s frekvencí 50 Hz. Stále častěji se v sítích objevují i celé násobky základní harmonické (50 Hz) a těm říkáme vyšší harmonické. Zdrojem těchto vyšších harmonických jsou zařízení s nesinusovými proudy. Tyto zařízení lze rozdělit do dvou skupin:

- Elektrická zařízení s obsahem polovodičových prvků. Mezi tyto prvky patří například: usměrňovače, motory s frekvenčním měničem, pulzní zdroje, stmívače, apod.
- Elektrická zařízení, která ze svého principu funkce odebírají ze sítě nesinusové proudy a vykazují nelineární voltampérové charakteristiky. Mezi ně patří: středofrekvenční a obloukové pece, plynové výbojky, zářivky, indukčnosti, apod.

2.2.1 Původ vyšších harmonických

Překročení napětí, vyšší harmonické, přes hodnotu odolnosti proti rušení, se u připojeného zařízení, projeví následujícími způsoby:

- Snížení životnosti a tím způsobenými předčasnými výpadky zařízení citlivými na tepelné přetížení, jako jsou kondenzátory a motory
- Poruchami funkce elektronických zařízení
- Chybnou funkcí ochran
- Nesprávnou funkcí přijímačů HDO (Hromadné dálkové ovládání).
- Nepříznivé ovlivnění zhášení oblouku zemních spojení díky vyšším harmonickým

Z výše uvedených důvodů musí provozovatel distribuční sítě nucen dbát, aby napětí vyšších harmonických nepřekračovala stanovené meze.

Účinky vyšších harmonických se ještě násobí díky skinefektu. Činné odpory vodičů i vinutí strojů vzrůstají a tím rostou i jejich ztráty. Odpor roste rychleji u vícevrstvých vinutí (např. u transformátorů). Vodiče a vinutí strojů navržené na 50 Hz, často nevyhoví z hlediska ztrát od vyšších harmonických. Pokud se v síti vyskytnou proudy vyšších harmonických, vznikají ve vodičích přídavné činné ztráty. Tyto ztráty způsobené vyššími harmonickými se snažíme omezit na minimum a co nejlépe u zdroje těchto harmonických. Snížení podílu vyšších harmonických se provádí výměnou samotného zařízení (s jinou konstrukcí nebo jiným principem funkce) pokud je to možné po technické nebo ekonomické stránce, nebo filtrací vyšších harmonických pomocí filtrů.

2.2.2 Matematické vzorce pro vyšší harmonické

Nesinusové průběhy proudu a napětí se rozkládají na řadu sinusových průběhů pomocí Fourierova teorému. Napětí a proud je popsán dle vztahů (2.6) a (2.7).

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \quad [V] \quad (2.6)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^q I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{I,n}) \quad [A] \quad (2.7)$$

Efektivní hodnotu napětí určíme dle rovnice (2.8) vycházející z rovnice (2.6)

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^q U_n^2} \quad [V] \quad (2.8)$$

U_n pro $n = 1, 2, 3, \dots$ jsou efektivní hodnoty napětí jednotlivých harmonických

Následně podobně určíme rovnici pro efektivní hodnotu proudu (2.9), která vychází z rovnice (2.7)

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^q I_n^2} \quad [A] \quad (2.9)$$

pro $n = 1, 2, 3, \dots$

obsah základní harmonické (1. harmonické)

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{I} \quad [-] \quad (2.10)$$

nebo

$$g = \frac{I_1}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.11)$$

obsah vyšších harmonických proudů

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad [-] \quad (2.12)$$

nebo

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.13)$$

obdobné vztahy platí pro napětí.

Dle současných norem se pro posouzení celkového harmonického zkreslení používají koeficient zkreslení proudu k_{ZI} a koeficient zkreslení napětí k_{ZU} nebo častěji používaná zkratka THD (Total Harmonic Distorsion). Tyto koeficienty se určí z rovnic (2.14) a (2.15).

$$k_{ZI} = THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

$$k_{ZU} = THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U} * 100 \quad [\%] \quad (2.15)$$

Vztahy pro výkony:

Obecně platí pro střední hodnotu činného výkonu střídavého proudu rovnice (2.16)

$$P = \int_0^T u(t) * i(t) * dt \quad (2.16)$$

Po dosazení do rovnice (2.16) za $u(t)$ a $i(t)$ a při použití ortogonality goniometrických funkcí pro činný výkon platí rovnice (2.17).

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.17)$$

$$\text{Kde} \quad \varphi_n = \varphi_{U,n} - \varphi_{I,n}$$

Tedy

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 + P_1 + P_2 + \dots \quad (2.18)$$

Z rovnice (2.18) vyplývá, že střední hodnota výkonu obecně střídavého proudu se rovná součtu středních hodnot výkonů jednotlivých harmonických. To znamená, že napětí a proud dvou různých kmitočtů nedávají trvale žádný výkon.

Střední hodnota jalového výkonu je definována analogicky jako součet středních hodnot jalových výkonů jednotlivých harmonických:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.19)$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu je definována jako součin efektivních hodnot proudu a napětí:

$$S = U * I = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)} \quad (2.20)$$

Poměr činného a zdánlivého výkonu označujeme jako činitel výkonu, případně jako opravdový účinník:

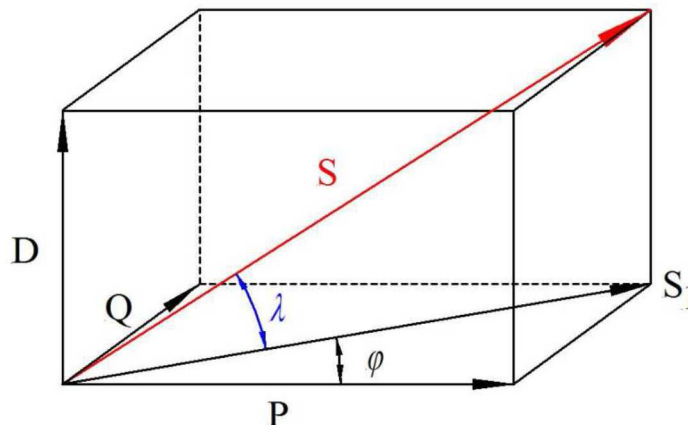
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n}{\sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)}} \quad (2.21)$$

Pro zdánlivý výkon také platí:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.22)$$

Kde D je tzv. deformační výkon, který je produktem efektivních hodnot harmonických různého řádu včetně jejich součinů se stejnosměrnými složkami napětí a proudu. Deformační výkon způsobuje, že není-li mezi harmonickými proudy a napětí fázový posuv, je přesto činitel výkonu $\lambda < 1$.

Geometricky lze vztahy mezi činným, jalovým, zdánlivým a deformačním výkonem vyjádřit pomocí obrázku č. 2.2.



Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických [4]

2.2.3 Fourierova transformace

Analytická metoda

Rozklad libovolné periodické funkce na konečnou nebo nekonečnou řadu harmonických funkcí řeší harmonická analýza na základě tzv. Fourierova teorému.

Periodická funkce $f(v)$, kterou budeme dále analyzovat, musí splňovat Dirichletovy podmínky:

1. funkce $f(v)$ je v konečném počtu intervalů spojitá a monotónní
2. má konečný počet extrémů

Řadu vzniklou rozkladem periodické funkce nazýváme Fourierovou řadou. Jejimi členy jsou jednotlivé harmonické. Dále budeme používat trigonometrické vyjádření Fourierovy řady.

Podle Fourierova teorému je možné periodickou funkci rozložit v řadu:

$$f(\vartheta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega_1 t) + B_n \sin(n\omega_1 t)) \quad (2.23)$$

$$f(v) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2.24)$$

kde nové konstanty řady pro n -tou harmonickou jsou:

$$A_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \cos(n\omega_1 t) dt \quad (2.25)$$

pro $n=0, 1, 2, \dots$

$$B_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \sin(n\omega_1 t) dt \quad (2.26)$$

pro $n=1, 2, \dots$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.27)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (2.28)$$

Numerická metoda

Numerické metody harmonické analýzy nahrazují integrály rovnice přibližnými součty (numerická integrace), které lze pro různé případy upravit. Pro výpočet koeficientů Fourierovy řady periodického signálu můžeme rovněž vyjít z klasické definice diskrétní Fourierovy transformace:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT)e^{-jn\omega T} \quad (2.29)$$

kde:	T	je vzdálenost mezi vzorky
	K	je počet vzorků za periodu
	$T_1=T \cdot K$	je délka periody
	S(kT)	je hodnota vzorku

Po úpravách dostaneme:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right] \quad (2.30)$$

Při porovnání se vztahem dostaneme:

$$\hat{c} = \frac{\hat{S}(n\omega_1)}{K} \quad \hat{C}_n = 2\hat{c} \quad C_0 = \frac{S_0}{K} \quad (2.31)$$

$$\hat{C}_n = \operatorname{Re}\{\hat{C}_n\} + j\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\} \quad (2.32)$$

$$C_n = \sqrt{(\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\})^2 + (\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\})^2} \quad (2.33)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\}}{\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\}} \quad (2.34)$$

2.2.4 Harmonické a jejich šíření v síti

V trojfázovém systému jsou harmonické ve třech fázích, ale s frekvencí odpovídající jejich řádu. Harmonické mohou být reprezentovány fázory v kruhovém diagramu, stejně jako fázory základní harmonické, a jejich fázový posun je definován symetrickými složkami. Obecně pro k-tou harmonickou platí rovnice (2.35).

$$I_k^b = I_k^a e^{-jk120^\circ} \quad a \quad I_k^c = I_k^a e^{-jk240^\circ} \quad (2.35)$$

Souměrný trojfázový systém sousledné, zpětné a netočivé (nulové) složky je následující:

Netočivá harmonická složka:

$$k = 3n \quad (2.36)$$

Sousledná harmonická složka:

$$k = 3n + 1 \quad (2.37)$$

Zpětná harmonická složka:

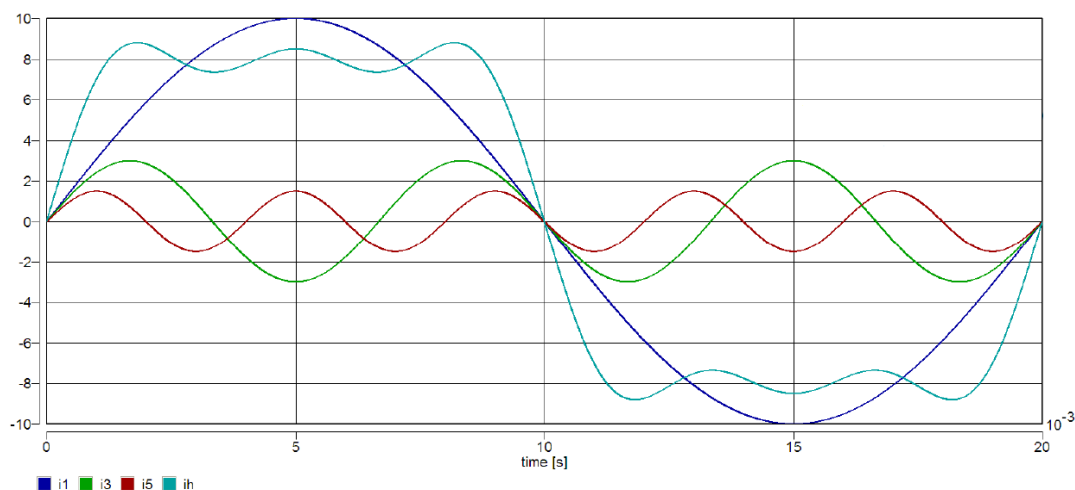
$$k = 3n - 1 \quad (2.38)$$

Kde:

k je řád harmonické

n=1, 2, 3, ...

Z předešlého vyplývá, že třetí harmonické proudy se přidávají k netočivým složkám proudu, příspěvek proudu ve střední vodiči tedy potom odpovídá trojnásobku proudu třetí harmonické. Pokud je amplituda třetí harmonické proudu téměř rovna amplitudě základní harmonické, potom ve středním vodiči trojfázového systému poteče okolo dvoj až trojnásobku proudu fázového vodiči. V případě symetrické zátěže přispívá pátá harmonická do zpětné složky proudu. Středním vodičem tedy tečou pouze asymetrické složky proudu – ty, které přispívají do netočivé složky harmonických proudů, můžeme harmonické proudy generované nelineární zátěží sčítat také v asymetrickém případě. Jednotlivé harmonické proudy zátěží lze počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů zátěží potom vede k výsledkům pro každou větev a vektorový součet proudů jednotlivých větví dává výsledný proud transformátoru.



Obr. 2.3 3. a 5. harmonická proudu [4]

2.2.5 Zdroje vyšších harmonických napětí

Alternátory

Vznik vyšších harmonických je dán drážkováním ve statoru a lze jej omezit použitím zlomkového vinutí. Druhým důvodem vzniku vyšších harmonických je nesinusové rozdělení magnetického pole v rotoru, zapříčiněné drážkami v rotoru turboalternátorů, resp. Vyniklými póly u hydroalternátorů.

Asynchronní motory

Vyšší harmonické zde vznikají vlivem drážkování statoru a rotoru. Zlomkové vinutí nepřináší požadované snížení vyšších harmonických. Možným opatřením je použití sešikmení drážek.

2.2.6 Zdroje vyšších harmonických proudů

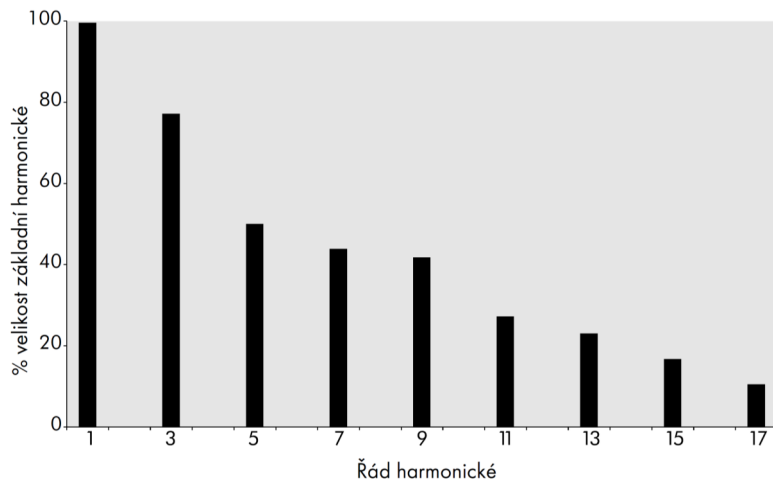
Korona

Korona je zdrojem 5. a 7. harmonické a v případě uzemněného uzlu 3. a 9. harmonického proudu.

Zářivky, plynové výbojky a domácí spotřebiče

Problematiku rušení těchto spotřebičů řeší ČSN EN 61000-3-2. V této normě stanoveny jak všeobecné požadavky a mezní hodnoty pro zařízení, ale také praktické metody typových zkoušek. Norma pokrývá oblast spotřebičů 50 Hz a napětí 230/400V způsobující generaci harmonických nízkých řádů do 40. harmonické.

Elektronické předřadníky svítidel se v posledních letech staly velmi populárními, protože se díky nim vylepšila účinnost svítidel. Jejich největší nevýhodou je, že generují harmonické v odebíraném proudu. Typy s kompenzací účinníku jsou díky své vysoké ceně dostupné pouze pro výkonově větší svítidla. Malé jednotky jsou většinou bez kompenzace. Typické spektrum kompaktního svítidla ukazuje obr. č. 2.4



Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla [8]

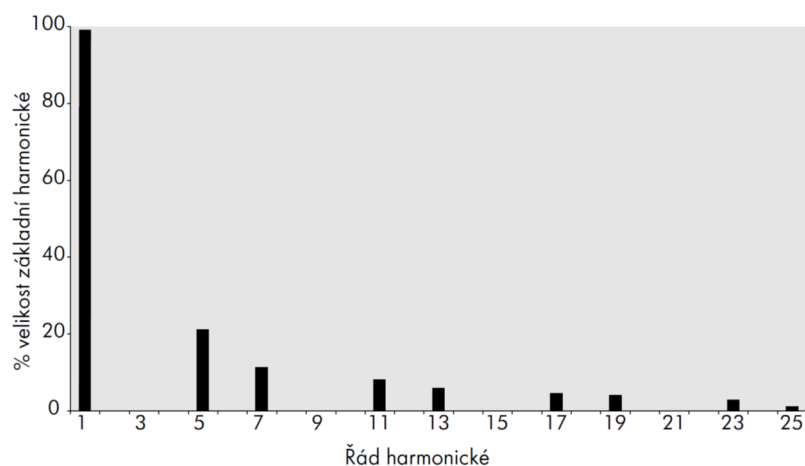
Transformátory

U transformátorů je vznik vyšších harmonických způsoben nelineární charakteristikou magnetizačního proudu a toku.

Usměrňovače a měniče

Elektronické regulátory otáček, UPS jednotky a usměrňovače jsou obecně založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako tzv. šestipulsní můstek, protože se zde vyskytuje 6 pulsů za jednu periodu na jeho stejnosměrném výstupu.

Šestipulsní můstek generuje harmonické v řádu $6n \pm 1$, tzv. v řádu o jeden vyšší a o jeden nižší než je šestinásobek základní harmonické. Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické, takže může být 20% páté harmonické a 9% jedenácté harmonické, atd. Typické spektrum šestipulsního můstku je na obr. č. 2.5.



Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku [8]

Velikost harmonických se výrazně redukuje použitím vícepulsních můstků jako je například 12-ti pulsni můstek, jehož napájení je z transformátorového vinutím zapojeného hvězda/trojúhelník s 30-ti stupňovým fázovým posuvem mezi těmito vinutími.

Teoreticky jsou u tohoto můstku harmonické řádu $6n$ odstraněny, ale v praxi hodnota jejich omezení závisí na „přizpůsobení“ střídače, které je často s faktorem mezi 20 a 50. Harmonické řádu $12n$ zůstávají nezměněny. Při tomto zapojení není redukován jen celkový harmonický proud, ale zůstávají pouze harmonické proudy vyšších řádů, pro které je návrh filtru mnohem snadnější.

Často jsou kroky k omezení vyšších harmonických již provedeny od výrobce např. přidáním filtrů nebo sériových indukčností.

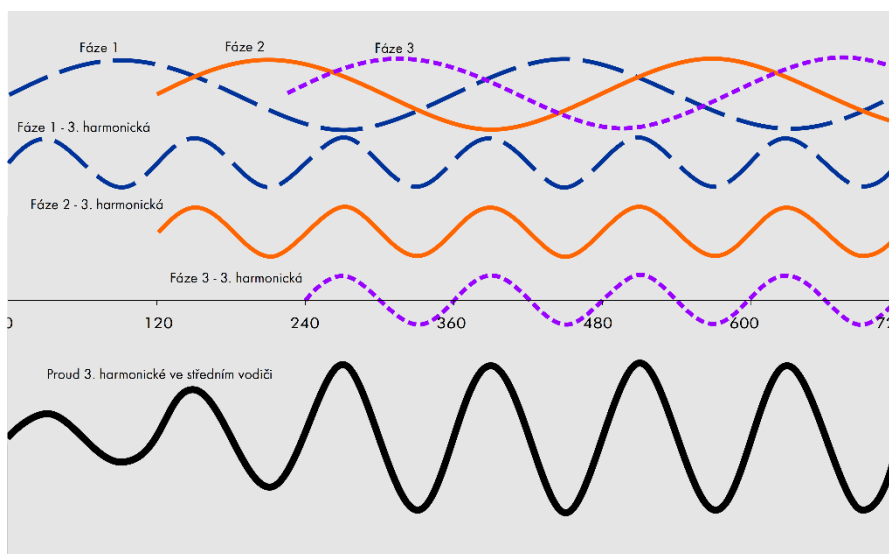
Další zvýšení počtu pulsů na 24 dosáhneme použitím dvou paralelních 12-ti pulsních jednotek s fázovým posuvem 15 stupňů. Toto řešení vede k omezení vyšších harmonických o cca 4,5%.

2.2.7 Problémy způsobené harmonickými proudy

Přetížení (přehřívání) středního vodiče

Při symetrickém zatížení v trojfázové síti, kde jsou napětí vzájemně posunuta o 120° , je výsledný proud středními vodiči nulový. Pokud je ale zatížení nesymetrické, pak ve středním vodiči protéká proud, který je dán výsledkem vektorového součtu jednotlivých fázových proudů.

I pokud je zatížení jednotlivých fází rovnoměrné a středním vodičem neteče proud základní harmonické neplatí to pro proudy vyšších harmonických a to hlavně pro proudy třetí harmonické a její násobky, které se naopak ve středním vodiči sčítají viz. obr. č. 2.6.



Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči. [8]

Vlivy na transformátory

Transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem. Za prvé, ztráty vířivými proudy, které jsou normálně na úrovni kolem 10% ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Ve skutečnosti u transformátoru plně zatíženého nelineárně zátěží IT technologií budou celkové ztráty dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěží. Výsledkem toho je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost. Prakticky za těchto okolností může být snížena životnost transformátoru ze 40 let až na 40 dní! Naštěstí jen málo transformátorů je plně zatíženo, ale tento jev musí být uvažován při volbě zařízení.

Druhý vliv je spojen s 3n harmonickými. U vinutí zapojeného do trojúhelníka jsou tyto harmonické ve fázi, takže se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tedy pro 3n harmonické je transformátor zapojený do trojúhelníka jako izolační, přičemž harmonické jiných řad transformátorem procházejí. Cirkulující 3n harmonické proudy musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru.

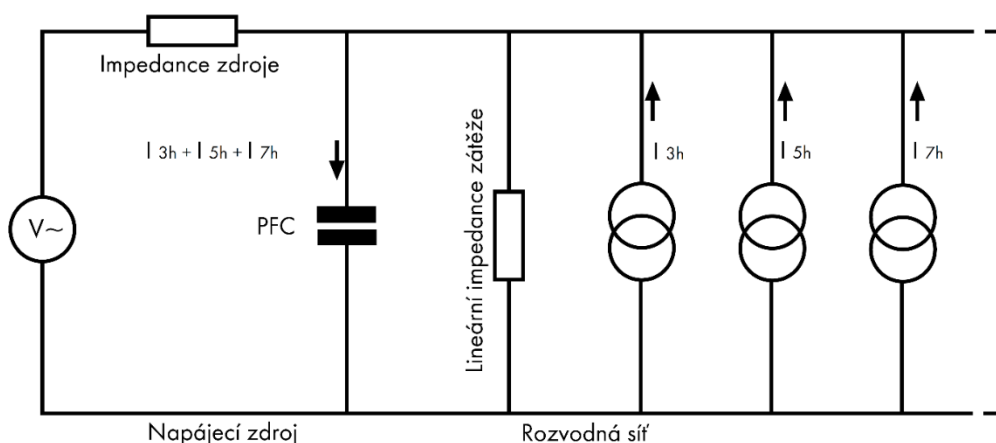
Rušení při spínání vypínačů

Proudové chrániče vypínají, jestliže je součet proudů ve fázových vodičích a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Rušení při spínání těchto vypínačů může být způsobeno harmonickými ze dvou důvodů. Za prvé tyto vypínače jako elektromechanická zařízení nemusí sčítat harmonické složky proudu korektně a proto vypínají chybně. Za druhé, některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které musí být filtrovány v napájecím obvodu zařízení. Filtry, které se normálně k tomuto účelu užívají, mají zapojeny kondenzátory mezi fázemi, středním vodičem a zemí, a díky tomu teče malý proud do země (svodový proud). Velikost tohoto proudu je limitována normami, dle kterých musí být menší než 3,5 mA, a obvykle je mnohem menší, ale je-li zařízení připojeno pouze do jednoho obvodu, může tento svodový proud způsobit vypnutí. Tuto situaci lze jednoduše řešit využitím více obvodů, z nichž každý napájí několik zátěží.

Rušení při spínání miniaturních vypínačů je vesměs způsobeno tím, že protékající proud je větší, než očekávaný dle výpočtů nebo jednoduchých měření, právě vlivem harmonických. Mnoho přenosných měřících přístrojů neměří správně efektivní hodnoty a pak mohou být podhodnoceny nesinusové proudy až o 40%.

Přetěžování kompenzačních kondenzátorů

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při induktivní zátěži (jako jsou např. indukční motory). Na obr. 2.7 je uvedeno náhradní schéma pro kompenzační kondenzátor s nelineární zátěží. Impedance kondenzátoru klesá s kmitočtem, zatímco impedance sítě, která je obecně induktivní, se stoupajícím kmitočtem roste. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudu vyšších řádů, a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k poškození kondenzátoru.



Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor [8]

Váženějším problémem je rezonance kapacity kondenzátoru s indukčností napájecí sítě v blízkosti harmonických kmitočtů (které se vyskytují ve 100 Hz intervalech). V takových případech se mohou objevit velké hodnoty napětí nebo proudů, které často vedou k haváriím kompenzačních jednotek.

Rezonancím se můžeme vyvarovat tak, že ke kondenzátorům přidáme do série takovou tlumivku (indukčnost), aby celková impedance byla induktivní pro nejmenší výraznou harmonickou. Toto řešení omezuje harmonický proud tekoucí do kondenzátoru. Velikost sériové tlumivky může být problém zejména, jsou-li přítomny harmonické nízkých řádů. Toto zapojení se užívá v případě hrazené kompenzace jalového výkonu.

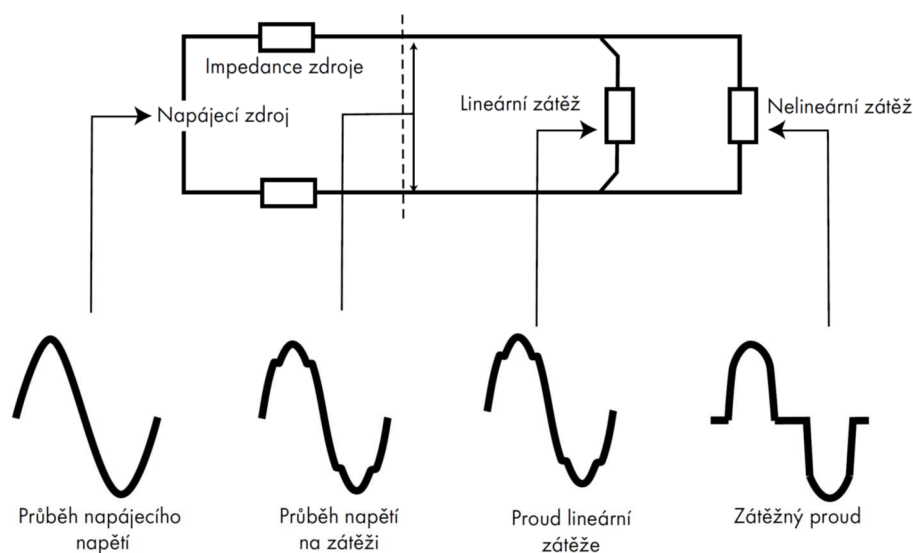
Skin efekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev je znám jako skin efekt, který se více projevuje na vyšších kmitočtech. Skin efekt je obvykle zanedbáván, protože při základním kmitočtu se projevuje velmi málo, ale u kmitočtů nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše, se stává skin efekt významným, protože způsobuje případné ztráty a oteplení. Tam, kde se vyskytují proudové harmonické musí projektanti uvažovat skin efekt při

návrhu kabelů. Mnohožilové kabely a vrstvené přípojnice mohou být využity při řešení tohoto problému. Je ale nutno dávat pozor, aby použitý systém přípojníc zamezil mechanickým rezonancím na harmonických kmitočtech.

2.2.8 Problémy způsobené harmonickými napětími

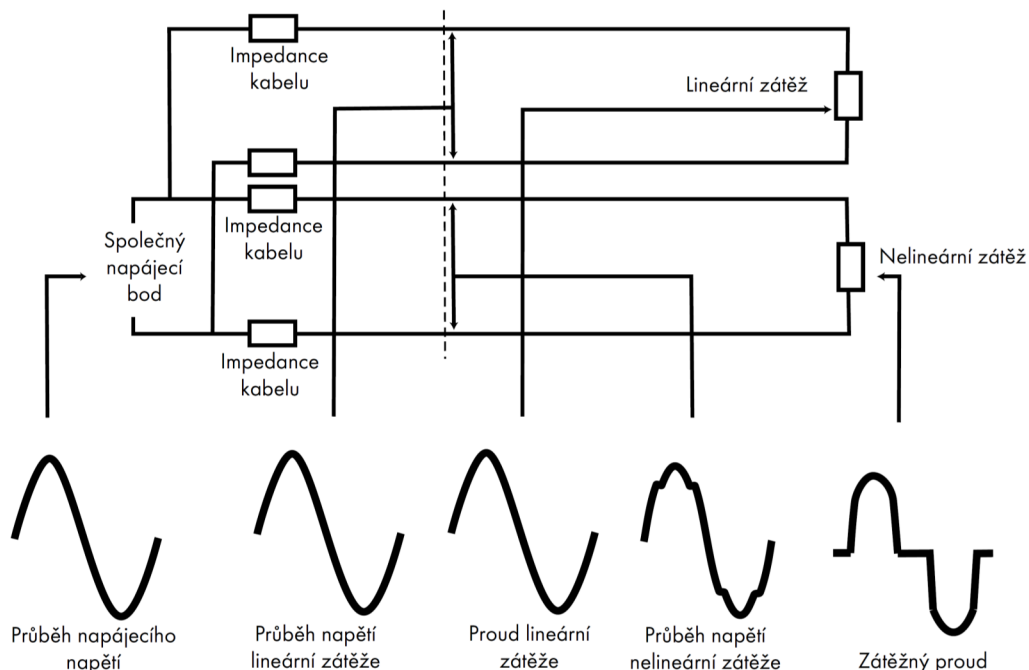
Harmonický proud zátěže způsobuje napěťové zkreslení na impedanci napájecí sítě (to je důvod „ploché křivky“). Jsou zde dvě části impedance, impedance vnitřních kabelů od společného napájecího bodu (PCC) a základní impedance napájecí sítě k PCC, např. lokálního napájecího transformátoru. Situace je uvedena na obr. 2.8.



Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže [8]

Deformovaný odběrový proud nelineární zátěže způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedanci kabelů. Výsledné zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu a to i v případě lineárních zátěží.

Řešením je oddělení obvodů se zátěžemi generujícími harmonické proudy od obvodů se zátěžemi citlivými na harmonické, jak je ukázáno na obr. č. 2.9. Zde jsou samostatné obvody, které z PCC napájejí lineární a nelineární zátěže. Napěťové zkreslení vlivem nelineární zátěže pak nemá vliv na napájení lineární zátěže.



Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže [8]

Při posouzení harmonického zkreslení je nutno připomenout, že při napájení zátěže přes UPS nebo při využití záložního generátoru při poruše, může být impedance napájecí sítě a tím i napěťové zkreslení mnohem větší.

Jsou-li instalovány lokální transformátory, pak mohou být voleny tak, aby měly dostatečně nízkou výstupní impedanci a dostatečnou schopnost odolávat přídavnému ohřívání, jinými slovy dostatečně předimenzované transformátory.

Indukční motory

Napěťové zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudů indukovaných do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty. Pokud je očekávat výskyt harmonicky zkresleného napětí, pak by měly být motory dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát.

Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání indukivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukuje elektromagnetické interference (EMI) a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidelnostem v provozu regulátorů. Může zde být dokonce i několik průchodů nulou během jedné půlperrody.

2.2.9 Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

Jestliže má harmonický proud původ v napájecí síti, pak roste harmonické zkreslení napětí úměrně impedanci napájecí sítě ve společném napájecím bodě (PCC) a harmonickému proudu. Jelikož impedance napájecí sítě je obecně indukivního charakteru, její amplituda roste se zvyšujícím se kmitočtem. Samozřejmě, pokud je napětí deformováno harmonickými proudy z jiných nelineárních spotřebičů a zkreslením příslušícím transformátoru, každý další spotřebič přispívá k tomuto deformování. Teda zákazníkům nemůže být dovoleno zvyšovat znečištění sítě tak, aby způsobovali újmu jiným zákazníkům. Proto jsou v mnoha zemích stanoveny limity pro generování harmonických proudů do napájecí sítě.

2.2.10 Mezní hodnoty vyšších harmonických

Základem pro určení mezních hodnot vyšších harmonických je hladina nízkého napětí (dále nn). Pro hladinu nn jsou velikosti kompatibilní úrovně stanoveny s ohledem na možnost vzniku rušení připojených zařízení (asynchronní motory, TV přijímače, výpočetní techniku, ostatní elektroniku). Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí, která se mohou vyskytovat ve veřejné napájecí síti nn, jsou uvedeny ve středním sloupci v tab. č. 2.1, která byla získána dlouhodobým pozorováním a je součástí normy ČSN IEC 1000-2-2. V podstatě se jedná o hodnoty odpovídající třídě II. Kompatibilní úrovně tříd I. a III. byly odvozeny později a jsou výsledkem optimalizace kompatibilních úrovní v elektroenergetickém systému a především v průmyslových sítích a hodnoty jsou v souladu s IEC 1000-2-4 (ČSN EN 61000-2-4).

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn [4]

Řád harmonické n	Přípustná hodnota u_{nVT} v % U_1		
	tř. I	tř. II	tř. III
Liché hodnoty harmonických nedělitelné třemi			
5	3,0	6,0	8,0
7	3,0	5,0	7,0
11	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	4,5
17	2,0	2,0	4,0
19	1,5	1,5	4,0
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	$0,2+12,5/n$	$0,2+12,5/n$	$5 \times \text{SQR}(11/n)$
Liché hodnoty harmonických dělitelné třemi			
3	3,0	5,0	6,0
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	2,0
21	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	1,0
Sudé harmonické			
2	2,0	2,0	3,0
4	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	1,0
8	0,5	0,5	1,0
10	0,5	0,5	1,0
>10	0,2	0,2	1,0

Celkové harmonické zkreslení napětí je dáno ČSN EN 61000-2-4

třída I	5%
třída II	8%
třída III	10%

Problematika stanovení kompatibilních mezí v sítích vn a vvn je řešena v normách PNE 33 3430, existují dva základní přístupy. Prvý přístup vychází z materiálu VDEW "Zásady pro posuzování zpětných vlivů", druhý pak z materiálů a návrhů IEC. Obě metodiky stanovují příspěvky rušení od jednotlivých odběratelů připojených ve společném napájecím bodě (PCC) tak, aby mohl dodavatel garantovat všem odběratelům elektrickou energii předepsané kvality.

Stanovení příspěvku odběratele k znečištění sítě vyššími harmonickými

Příspěvek odběratele je možné zanedbat (připojení vždy přípustné), pokud je splněna podmínka dle (2.39).

$$\frac{S_{odb}}{S_{kV}} \leq \frac{1}{1000} \quad (2.39)$$

S_{odb} zdánlivý výkon připojovaného zařízení

S_{kV} zkratový výkon ve společném napájecím bodě (PCC)

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430 (metodika VDEW)

V případě, že není podmínka (vzorec 2.39) splněna, je nutná podrobnější analýza. Pokud je již zařízení instalované je vhodné provést měření.

Výpočet B_n

$$B_n = \frac{Z_n * k_{pn} * \sqrt{3} * I_n}{u_{nVT} * U_1} * 100 \quad (2.40)$$

kde Z_n je impedance sítě při kmitočtu n-té harmonické [Ω]

k_{pv} je činitel soufáznosti 0,3-1

u_{nVT} je kompatibilní mez nn viz. tab. 2 [%] pro třídu II

U_1 je jmenovité sdružené napětí v odběrovém bodě pro $n=1$ [V]

I_n můžeme určit měřením, nebo z následující rovnice (2.41).

$$I_n = \frac{S_{odb}}{\sqrt{3} * U_1} * \frac{i_{np}}{100} \quad (2.41)$$

kde S_{odb} je zdánlivý výkon zařízení (měniče frekvence)

i_{np} je proud dané harmonické

Určení B_{max}

B_{max} je největší hodnota ze všech B_n (kde n je řád harmonické $n=2...25$)

Napětí vyšších harmonických v síti vznikají spolupůsobením všech zařízení na hladinách nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Z předchozí věty je zřejmé, že jedno zařízení se smí na celkové hodnotě rušení podílet pouze částečně.

Nejvyšší hodnoty harmonických napětí se zpravidla vyskytují v sítích nízkého napětí, neboť zde se sčítají podíly příslušných úbytků napětí vzniklé ve všech napěťových hladinách.

$$u_{nvvn} + u_{nvn} + u_{nnn} \quad (2.42)$$

Výsledné napětí vyšší harmonické v příslušné napěťové hladině musí být s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu rovno a nebo menší než je přípustná hladina pro danou napěťovou úroveň. Proto může každý ze tří zdrojů v jednotlivých napěťových úrovních přispívat podílem vyplívající z rovnice (2.43).

$$u_n = k_N * u_{nVT} \quad (2.43)$$

kde k_N je činitel napěťové úrovně

nízké napětí k_{Nnn}	0,2 až 0,3
vysoké napětí k_{Nvn}	0,4 až 0,7
velmi vysoké napětí k_{Nvvn}	0,1 až 0,3

Celkový součet součinitelů pro všechny tři úrovně bývá roven jedné. Velikost jednotlivých součinitelů se volí podle zkušeností. U harmonických, jejichž řád je násobkem tří nedochází ke sčítání v různých napěťových hladinách koeficient pro nízké napětí $k_{Nnn}=1$.

Rozdělení přístupných úrovní mezi jednotlivé odběratele vychází ze vztahu:

$$k_A = \frac{S_0}{S_T} \quad (2.44)$$

- S_0 sjednaný výkon odběratele
- S_T vztažná hodnota výkonu rovná 70% zdánlivého výkonu transformátoru napájecího danou sítí
- k_A činitel připojení

Činitel k_A se využije při vyhodnocování velikosti maximálního činitele rušení B_{max}

$B_{max} < 0,02$	Produkce vyšších harmonických je jen nepatrná, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_A * k_N$	Produkce vyšších harmonických leží z hlediska poměru výkonů pod přípustnou hodnotou, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_N$	Produkce vyšších harmonických leží pod hodnotou přípustnou pro síťovou úroveň. Pokud určitý počet zákazníků plně nevyžaduje celé své podíly, je možné i v tomto případě souhlasit s připojením
$B_{max} > k_N$	Zařízení produkuje nepřipustně vysoké harmonické proudy

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430-1 (metodika IEC)

V sítích vysokého a velmi vysokého napětí:

Mezní hodnota příspěvku i -tého odběratele E_{ni} se stanoví z rovnice (2.45)

$$E_{ni} = G_{ns} \left(\frac{P_i}{P_t} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (2.45)$$

Kde: E_{ni} je přístupný příspěvek i -tého odběratele k n -té harmonické napětí v PCC, vyjádřených v procentech jmenovitého napětí sítě

G_{ns} je mezní hodnota n -té harmonické napětí (v procentech jmenovitého napětí) ve vyšetřované síti viz. tab 3.9

P_i je sjednaný maximální příkon i -tého odběratele

P_t je výkon, který je možno odebírat z distribuční sítě při daném provozu

a koeficient určující soufáznost

$$a = 1 \in \{n < 11\} \quad (2.46)$$

$$a = 1,4 \in \{11 < n < 13\} \quad (2.47)$$

$$a = 2 \in \{n > 13\} \quad (2.48)$$

Řád harmonické n	Mezní hodnota	
	sítě vn	sítě vvn
liché harmonické		
3	3	2
5	4	2
7	3	2
9	0,9	0,9
11	2,7	1,5
13	2,1	1,5
15	0,3	0,3
17	1,7	1
19	1,3	1
21	0,2	0,2
23	1,3	0,7
25	1,3	0,7
>25	$0,2+5/n$	$0,1+2,5/n$
sudé harmonické		
2	1,5	1
4	0,7	0,7
6	0,5	0,5
8	0,3	0,2
>8	0,2	0,2

Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn [4]

2.2.11 Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických

Z definice impedance jednotlivých prvků elektrických sítí vyplývá, že její velikost je při různých kmitočtech podstatně odlišná od impedance při 50 Hz, pro kterou je navržena. Při jejich určování je nutné věnovat zvláštní pozornost rezonančním jevům. Pokud nastanou rezonance sítě na frekvenci některé harmonické může její napětí nabývat obzvláště vysoké hodnoty, čímž se nebezpečně zvyšuje možnost rušení dalších odběratelů. Při určování impedance sítě ve společném napájecím bodě (PCC) se vychází z náhradního schématu na obr. 3.8., ve kterém je celková kapacita sítě složená z kapacit vedení a případně z kapacit kondenzátorových baterií pro kompenzaci účinníku, reprezentována kondenzátorem připojeným na přípojnicí sítě a chová se jako paralelní rezonanční obvod. Induktivní reaktance je tvořena převážně reaktancí napájecího transformátoru a reaktancí vedení, s níž je dále v sérii reaktance v nadřazeném síťovém bodě Q vypočtená ze ztrátového výkonu. Tlumicí odpor obvodu je tvořen především činným zatížením sítě.

Rezonanční frekvence obvodu je dána vztahem (2.49).

$$f_{rez} = 50 \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (2.49)$$

Kde Q_c je nabíjecí výkon sítě

S_k je zkratový výkon na přípojnicích

Impedance v nadřazeném síťovém bodě Q:

$$Z_{kQv} = \frac{f_n}{50} * \frac{U_n^2}{S_{kQ}} \quad (2.50)$$

Pro další výpočty je možné uvažovat pouze induktivní složku impedance

Impedance transformátorů:

Impedance transformátorů pro vyšší harmonické je přibližně rovna jeho reaktanci

Podélná impedance vedení:

Neuvažujeme vliv skinefektu. Reaktance je dána vztahem:

$$X_{Vv} = \frac{f}{50} * X_V \quad (2.51)$$

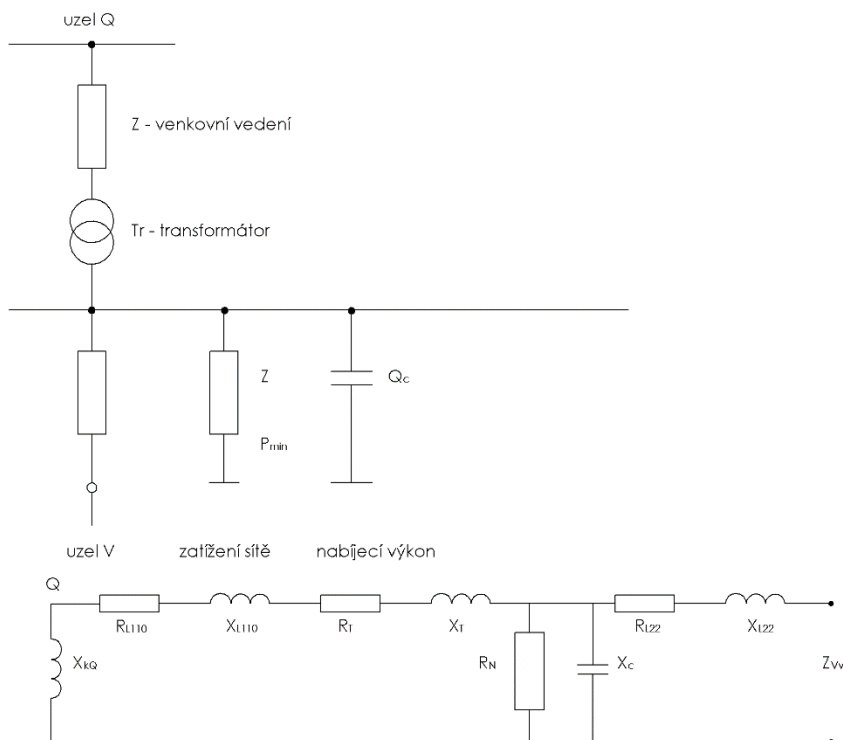
Příčná impedance vedení a kondenzátorů:

Kapacitní jalové výkony sítě Q_c jsou určeny především jalovými výkony vedení a jalovými výkony nehrazených kondenzátorů pro kompenzaci účinníku. Výsledná impedance je dána vztahem:

$$Z_c \cong X_c = \frac{50}{f} * \frac{U_n^2}{Q_c} \quad (2.52)$$

Impedance zátěže sítě:

Velikost impedance sítě na frekvenci blízké první paralelní rezonanci závisí na tlumícím účinníku ohmické zátěže. Činnou složkou rozběhové impedance motorů můžeme zanedbat. Impedance sítě dosahuje nejvyšší hodnoty při minimální činné zátěži $P_{\text{čmin}}$. V energetických sítích je $P_{\text{čmin}}$ rovno asi 2/3 slabého zatížení sítě.



Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě

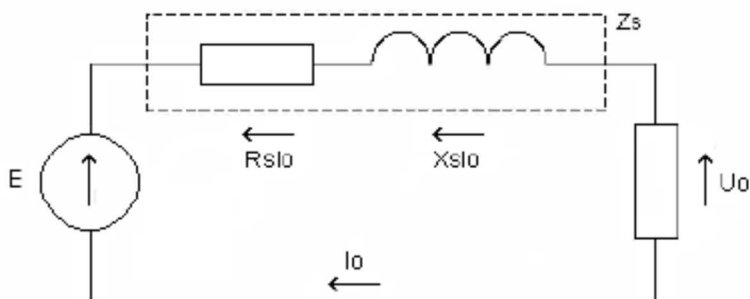
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt

Elektrické spotřebiče jsou více či méně citlivé na kolísání úrovně napětí v distribuční síti. Mezi tyto spotřebiče patří například světelné zdroje (žárovky). Tyto spotřebiče vyžadují pro správnou funkci konstantní úroveň napětí. Odběratelé s proměnlivým odběrem elektrické energie však bohužel způsobují měnící se úbytky napětí. Rychlé periodické změny napětí, které nazýváme kolísání napětí, způsobují jev zvaný flicker efekt. Toto kolísání napětí způsobuje změny světelného toku, které má za následek změny ve zrakovém vnímání člověka a tak ho omezuje při jeho činnostech.

2.3.1 Příčiny kolísání napětí

Pro každé vedení je napětí na zátěži odlišné od napětí na začátku při zdroji. To je demonstrováno na jednofázovém náhradním obvodu dle obr. 2.11. Rovnice (2.53) ukazuje, jak může být rozdíl napětí ΔU odvozen z fázorového diagramu a jednoduchých geometrických pravidel.

$$\frac{E-U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U}{U_0} = R_S * \frac{P}{U_0^2} + X_S * \frac{Q}{U_0^2} \cong R_S * \frac{\Delta U}{U_0} + \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.53)$$



Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě

Náhradní odpor vedení je v praxi poměrně malý ve srovnání s jeho reaktancí ($X_S > 10 * R_S$). Takže uvedená rovnice přejde na následující tvar, který definuje poměrnou hodnotu změny napětí na koncové zátěži:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.54)$$

Vidíme, že primární příčinou fluktuace napětí je časová změna jalového výkonu na proměnlivé zátěži. Takové zátěže jsou obloukové pece, pohony válcovacích stolic, navíječky, atp. Obecně řečeno, jsou to zátěže s velkým počtem změn výkonu. Také malé výkonové zátěže jako rozběh indukčních motorů, svářečky, ohříváče vody, regulátory výkonu, elektrické pily a kladiva, pumpy a kompresory, jeřáby a výtahy také mohou být zdroji flicker efektu. Velikost úbytku napětí závisí na velikosti proudu, který protéká danou reaktancí a úbytek je tedy způsoben i činnou složkou odběru zátěže.

2.3.2 Účinky kolísání napětí na světelné zdroje

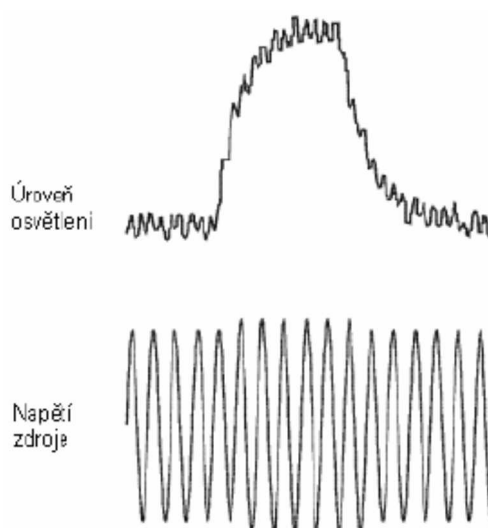
Jakékoliv změny amplitudy napájecího napětí vedou k změnám světelného toku světelného zdroje. Tento jev je znám jako flicker efekt, což je subjektivní nepříznivý vizuální dojem při nestabilním světelném toku, jehož jas nebo spektrální rozdělení se mění v čase. Přenos kolísání napájecího napětí na kolísání výstupního záření světelných zdrojů je velice komplexní problém závislý na principu funkce světelného zdroje, jeho konstrukci, dimenzování, napájení, ale i provozních podmínkách.

Odezva světelného zdroje na kolísání napětí může být vyjádřena jeho přenosovou funkcí, kterou je popsána změna výstupního parametru na základě změny parametru vstupního, vstupním parametrem je relativní velikost změny velikosti napětí $\Delta U/U$ a výstupním parametrem relativní velikost změny velikosti světelného toku $\Delta \Phi/\Phi$. Jejich podíl definuje zesílení přenosu (2.55).

$$G.F. = \frac{\Delta\phi/\phi}{\Delta U/U} \quad (2.55)$$

Každý světelný zdroj má svou vlastní přenosovou funkci, kterou lze získat vyhodnocením odezvy zdroje na periodickou amplitudovou modulaci napětí v rozsahu modulačních frekvencí (0; 50) Hz. Odezvu je přitom možné měřit, nebo i simulovat na modelu světelného zdroje.

Žárovky jsou zvláště citlivé na změny v napájecím napětí, jejich světelný tok Φ je úměrný přiloženému napětí podle vztahu $\Phi \sim U^y$, kde y se mění mezi 3,1 a 3,7. Obr. 2.12 ilustruje změny světelného toku žárovky 60 W, 230 V vlivem kolísání napětí napájecího napětí.



Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky

Kolísavé změny proudu (v případě této práce způsobené obloukovou pecí) způsobují nízkofrekvenční kolísání napětí, které má za následek blikání světelných zdrojů (flicker efekt). Ten významně narušuje vidění a obecně způsobuje neklid, nepohodlí, psychickou a psychologickou únavu a dokonce má i patologické vlivy na lidské bytosti. Fyziologie tohoto jevu je komplexní. Flicker efekt ovlivňuje proces vidění a reakce lidského mozku. Blikající světelné zdroje vytvářejí nepohodlí a zhoršení kvality práce – v některých případech mohou způsobit nehody na pracovišti.

Proto byly stanoveny předpisy pro bezpečnost a ochranu zdraví pracujících (BOZP), které jsou kontrolované místními hygienickými organizacemi. Jedná se zejména o nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kde se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci a právě zde v § 45 jsou uvedeny bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště.

Aby se minimalizovaly příčiny vzniku flicker efektu, jsou stanoveny v normě ČSN EN 61000-3-3 ed. 3 přípustné meze krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{st} = 1,0$ (vzorkování po 10 minutách) a dlouhodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{It} = 0,65$ (vzorkování po 2 hodinách).

3. Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece patří mezi velmi důležitá zařízení při zpracování kovů. Jejich historie sahá až na konec 19. století, kdy Paul Héroult sestrojil první průmyslově použitelnou elektrickou obloukovou pec. Tyto pece jsou využívány v metalurgii a díky jejich použití se v této oblasti dosáhlo významného pokroku.

Teoretické poznatky a praktické zkušenosti potřebné k úspěšné stavbě a k dobrému provozu pece jsou velmi obsáhlé. Kvůli těmto důvodům se občas stává, že oblouková pec nevyhovuje danému účelu. Může se například stát, že síť do které je elektrická oblouková pec zapojena nedosahuje takových parametrů, aby zpětný vliv této pece neovlivňoval ostatní provozy v síti.

3.1. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je výboj plynu, který vzniká za normálních nebo vyšších tlaků, jenž je schopný samostatně existovat po určitou dobu. Mezi charakteristické vlastnosti oblouku patří:

- Vysoká proudová hustota katodové skvrny
- Vysoká teplota katodové skvrny nebo celé katody
- Malé úbytky napětí v katodové a anodové oblasti
- Malé napětí na elektrodách
- Vysoká teplota obloukového plazmatu
- Intenzivní vyzařování světla z oblouku

Podle druhu napájení lze oblouky rozdělit podle způsobu napájení na:

- Střídavé oblouky
- Stejnoseměrné oblouky

Nebo podle druhu použitých elektrod na:

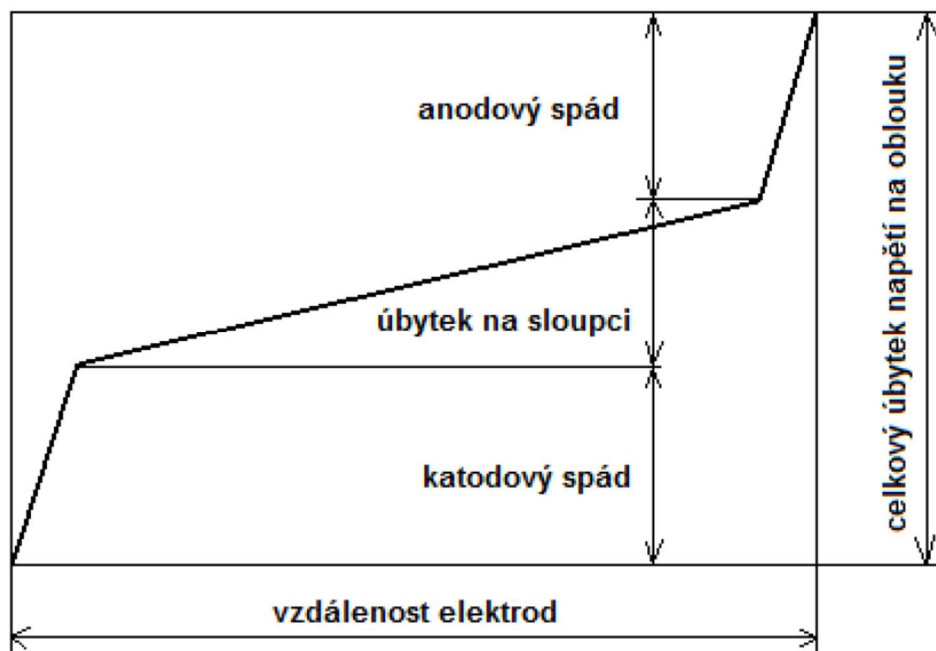
- Obloukové pece s uhlíkovými elektrodami
- Obloukové pece s kovovými elektrodami

Nebo podle tvaru výbojové dráhy na:

- Oblouky volně hořící
- Oblouky stabilizované

Stabilizovaný oblouk znamená, že oblouk hoří jen ve vymezeném prostředí.

Průběh úbytku napětí na oblouku je znázorněn na obr. č. 3.1. Na tomto obrázku si můžeme všimnout třech různých oblastí. Jsou to: katodová oblast, úbytek na sloupci a anodová oblast. Velikost anodového a katodového úbytku napětí závisí na materiálu elektrod. Všechny oblasti jsou závislé na procházejícím proudu obloukem a na prostředí, ve kterém oblouk hoří.



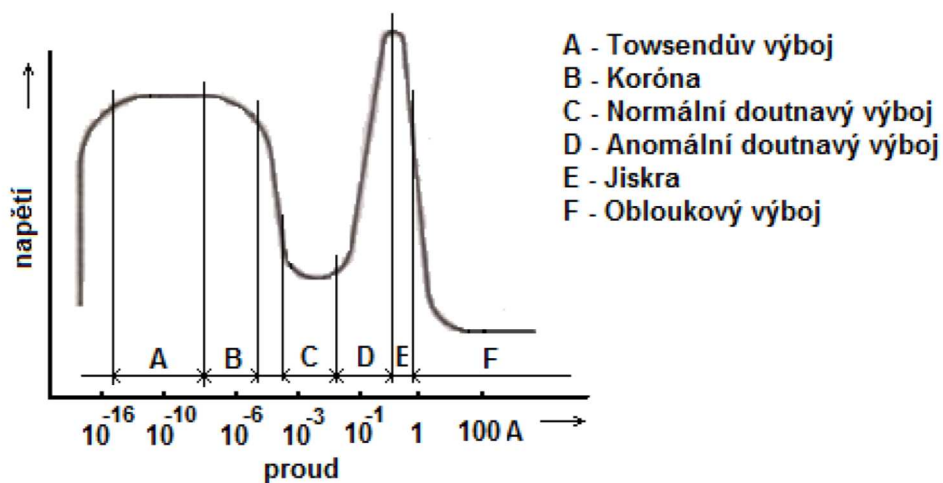
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku [3]

Vznik a vývoj tepla je důsledkem fyzikálních dějů, probíhajících v ohraničeném plynném prostředí, který je za normálních podmínek nevodivý. Toto prostředí stává vodivým až díky působení ionizačních faktorů:

- Vysoká teplota
- Elektrické pole
- Radioaktivní záření, rentgenové záření, krátkovlnné elektromagnetické záření

Ionizace plynu je fyzikální proces, jehož výsledkem je vznik nových nábojů z atomů a molekul plynu. Dalším využívaným dějem je rekombinace částic. Vytváří se v plynu, ve kterém existují částice s opačným nábojem. Při rekombinaci se uvolňuje energie, která se může využít.

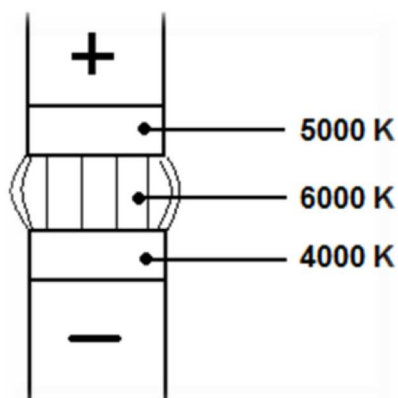
Charakteristiky různých typů výbojů jsou znázorněny na obr. 3.2. Na voltampérové charakteristice můžeme vidět klesající napětí obloukového výboje s rostoucím proudem.



Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích [3]

3.1.1 Stejnoseměrný elektrický oblouk

Stejnoseměrný elektrický oblouk vznikne tak, že necháme protékat stejnoseměrný proud přes spojené elektrody. V místě spojení elektrod dojde k jejich přehřátí a k následné ionizaci okolních par. Při následném oddálení elektrod bude stejnoseměrný elektrický oblouk protékat přes vzniklé vodivé prostředí. Stejnoseměrný elektrický oblouk je znázorněn na obr. 3.3.



Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk [3]

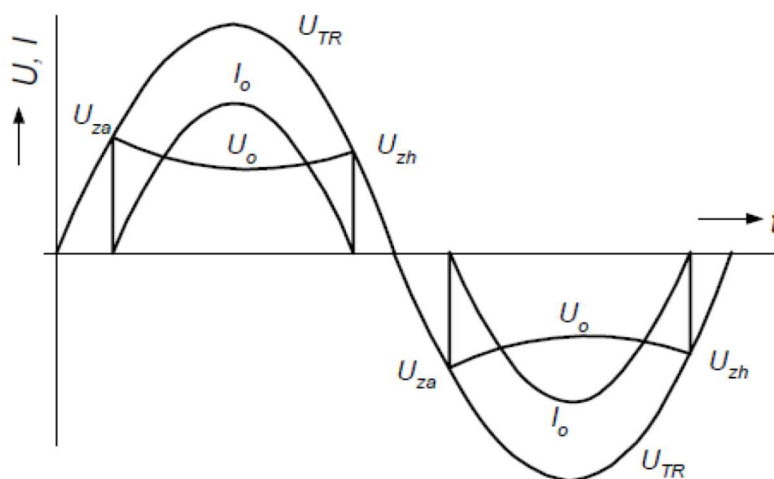
3.1.2 Střídavý elektrický oblouk

Střídavý elektrický oblouk se vytváří obdobně jako oblouk stejnosměrný. Hlavní změnou jsou periodické změny polarity napětí a proudu. Při změně polarity stejnosměrného proudu začne v určitém okamžiku oblouk zhasínat. Pokud se udržela anoda (v předcházející půlperiodě katoda) žhavá, dojde k opětovnému zapálení oblouku i při malých hodnotách napětí. Z tohoto vyplývá, že pokud se na obou elektrodách udrží žhavá místa, může oblouk hořet v obou periodách i při napájení střídavým proudem a vzniká střídavý elektrický oblouk. Střídavý elektrický oblouk je velmi nestabilní a proto se musí k jeho stabilizaci využívat stabilizační člen. Podmínky pro hoření střídavého elektrického oblouku jsou:

- žhavost obou elektrod
- po změně polarity musí být k dispozici napětí pro zapálení oblouku

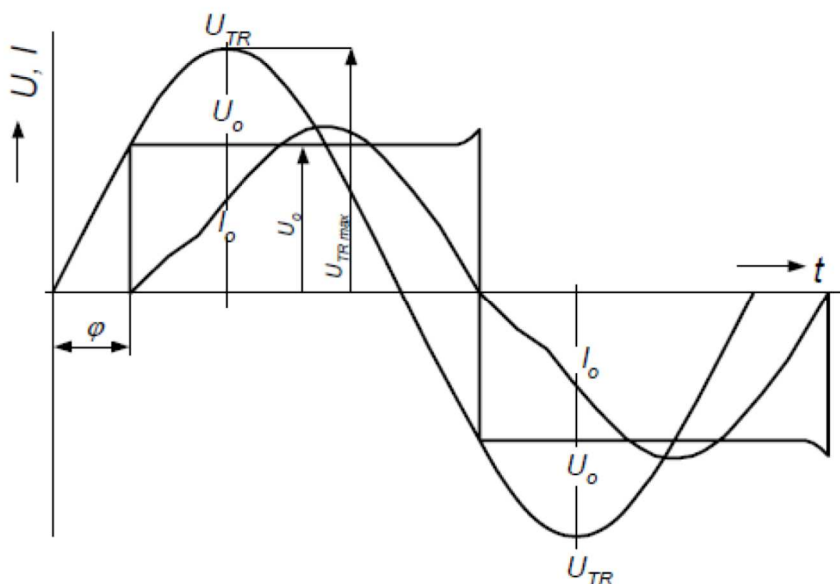
Pro stabilizaci hoření oblouku musíme do obvodu zařadit vhodnou indukčnost. Zařazením indukčnosti do obvodu se nám zhorší účinnost, a proto její velikost nesmí být příliš velká. Optimální velikost indukčnosti by měla být taková, aby se hodnota pohybovala okolo $\cos\varphi = 0,85$. Nejčastěji se volí tlumivka na železném jádře a ve výjimečných případech bez jádra.

Na obr. 3.4 je znázorněn průběh napětí a proudu u oblouku v jehož obvodě je zapojen pouze rezistor. Na obr. 3.4 jsou: U_{TR} napětí zdroje (transformátoru), U_o napětí na oblouku, I_o proud oblouku, U_{ZA} zapalovací napětí, U_{ZH} zhasíací napětí oblouku. Zapalovací napětí oblouku je o trochu vyšší než napětí zhasíací. Proud oblouku způsobuje prohnutý tvar napětí oblouku U_o . S rostoucím proudem oblouku napětí oblouku klesá. Průběh proudu oblouku má tvar podobný sinusovce, ale na začátku a na konci každé půlperiody má nulovou hodnotu.



Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem [3]

Pokud se do obvodu oblouku sériově zapojí indukčnost (obr. 3.5), nastává fázový posuv mezi napětím a proudem, ale i prodloužení doby hoření oblouku vlivem indukčnosti tlumivky. Pro docílení trvalého hoření oblouku je nutné do obvodu zapojit takovou tlumivku, aby bylo docíleno fázového posuvu minimálně $\cos\varphi = 0,85$. Napětí na oblouku má obdélníkový tvar, což je charakteristické pro oblouky s vysokými proudy.



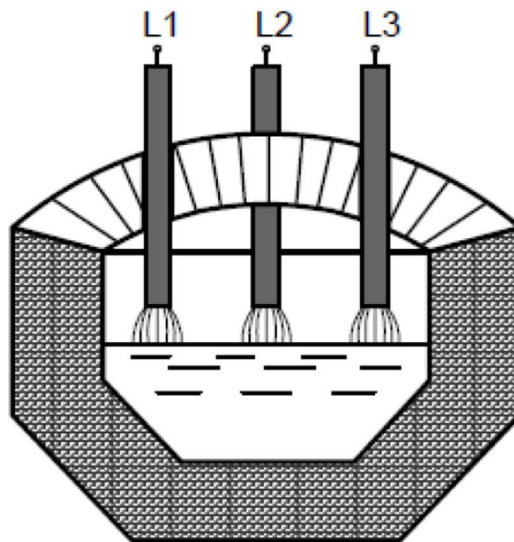
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností [3]

3.2 Elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece rozdělujeme podle způsobu hoření oblouku na pece s přímým obloukem, nepřímým obloukem a se zakrytým obloukem.

3.2.1 Pece s přímým obloukem

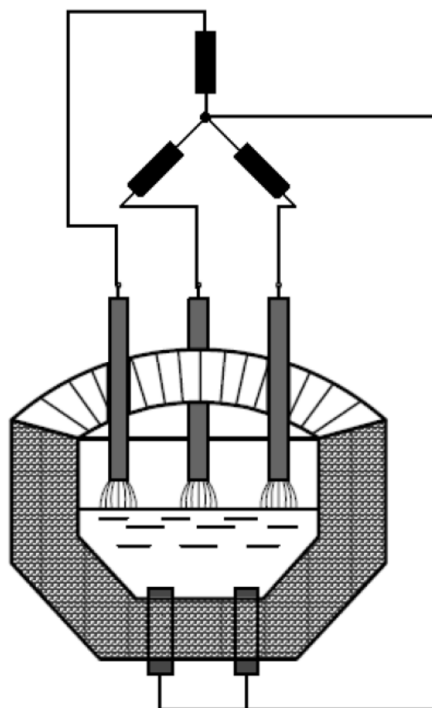
U pecí s přímým obloukem (obr. 3.6) hoří oblouk mezi elektrodou (většinou grafitovou) a vsázkou. Proudový obvod se uzavírá přes taveninu. Tyto pece se také nazývají pece se závislým obloukem. Přenos tepla do lázně je přímý, což urychluje tavení. Tento typ pecí se také vyznačuje delší životností. Tento typ pecí se využívá především k výrobě oceli a litiny.



Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem [3]

3.2.2 Pece s vodivým dnem

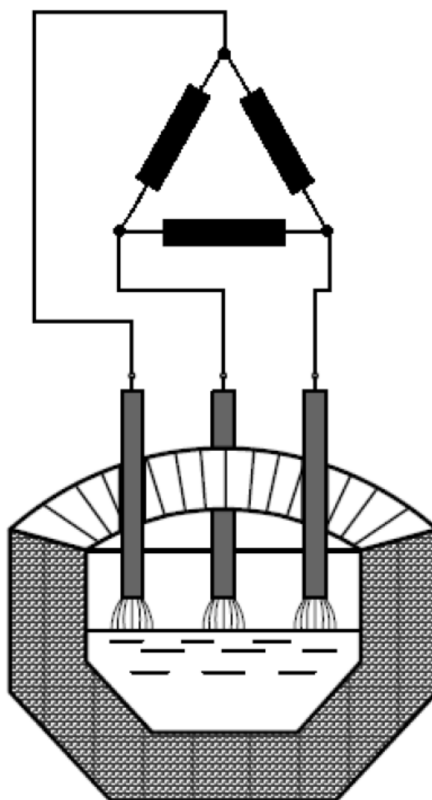
Pece s vodivým dnem (obr. 3.7) patří mezi starší typy obloukových pecí. Byly konstruovány tak, že sekundární strana pecního transformátoru byla zapojena do hvězdy s fázovým vývodem jednotlivých bodů hvězdy na elektrody. Pro zlepšení symetrie byl nulový bod spojen se dnem nádoby. Mezi výhody těchto pecí patří rovnoměrnější ohřev taveniny v celém jejím objemu. Tyto pece se již v dnešní době nevyrábějí.



Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem [3]

3.2.3 Pece s nevodivým dnem

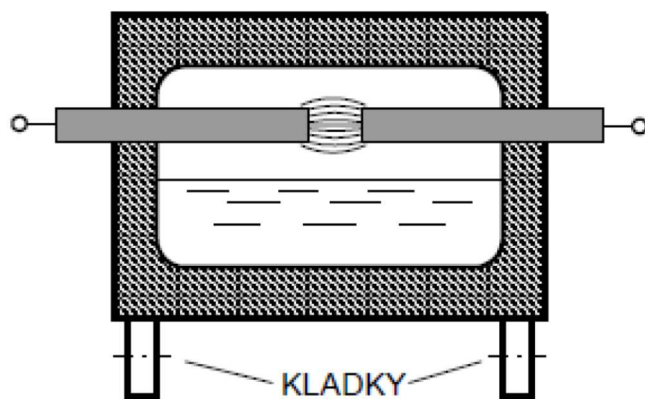
U pecí s nevodivým dnem (obr. 3.8) je sekundární vinutí pecního transformátoru zapojeno do trojúhelníka. Proud u tohoto druhu pecí prochází z elektrody přes strusku do taveniny a zpět přes strusku obloukem do druhé elektrody. Proud tedy neprochází dnem pece. Většina moderních elektrických obloukových pecí je tohoto typu.



Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem [3]

3.2.4 Pece s nepřímým obloukem

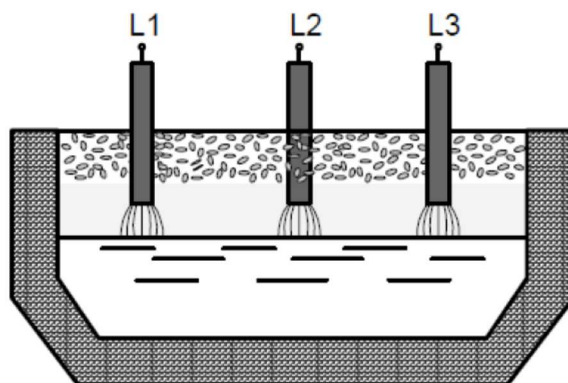
U pecí s nepřímým obloukem (obr. 3.9) hoří oblouk mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výhradně sáláním (zářením). Oblouk hoří mezi elektrodami nezávisle na vsázce. Mezi výhody těchto pecí patří jednoduchá obsluha a menší investiční náklady. Používají se k tavení neželezných kovů, šedé litiny a k výrobě ocelolitiny. Jejich velikost se pohybuje maximálně o objemu vsázky 3 tuny.



Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem [3]

3.2.5 Pece se zakrytým obloukem

U tohoto typu pece (obr. 3.10) hoří oblouk mezi vsázkou a elektrodami, které jsou ponořené do roztavené strusky a obsypány zavázkou rud a příměsí. Oblouk tedy hoří zcela zakrytý. Důsledkem průchodu proudu mezi elektrodami, struskou a zavázkou vzniká odporový ohřev strusky a zavátky, a proto se tyto pece také někdy nazývají oblouk-odporové. Elektrody jsou svisle uloženy, a jsou buď to amorfní, nebo samospékavé. Bývají vybaveny automatickou regulací elektrod. Tyto pece pracují většinou trvale bez přestávek. Hlavním problémem pecí se zakrytým obloukem jsou elektrické přívody, jelikož pracují s malým napětím a velkým proudem. Systém přívodů je řešen jako bifilární. Pece se používají jako redukční k výrobě surového železa a feroslitin, kde je potřeba dosahovat vysokých teplot.



Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem [3]

3.3 Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece

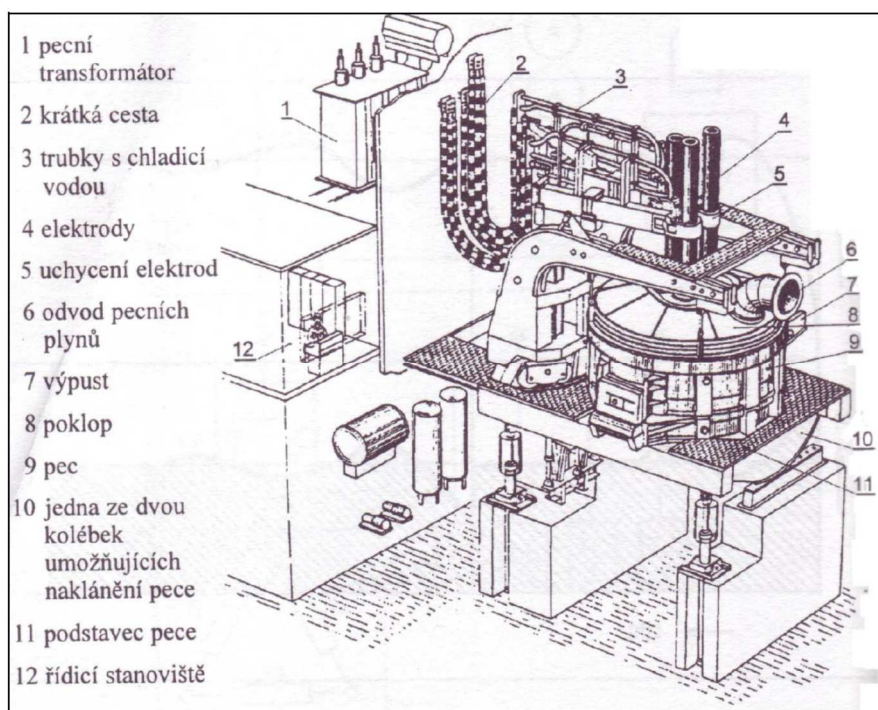
Elektrické zařízení obloukových pecí je velmi nákladné a značně ovlivňuje celkové pořizovací náklady. Podle funkce lze elektrické zařízení obloukové pece rozdělit na:

- silnoproudý elektrický obvod
- obvod automatické regulace pohybu elektrod
- měřicí přístroje, ochrany, blokování a signalizace
- řídicí počítač

Elektrické zařízení obloukové pece je znázorněno na obr. 3.11. Nejdůležitější část tvoří silnoproudý obvod, který má zásadní vliv na chod pece. Hlavním úkolem silnoproudého obvodu je dovést elektrickou energii do pracovního prostoru pece a tam ji přeměnit na teplo. Nedílnou součástí elektrického obvodu pece je také automatická regulace polohy elektrod.

Silnoproudý elektrický obvod pece tvoří:

- napájecí síť
- pecní transformátor
- krátká síť
- elektrody



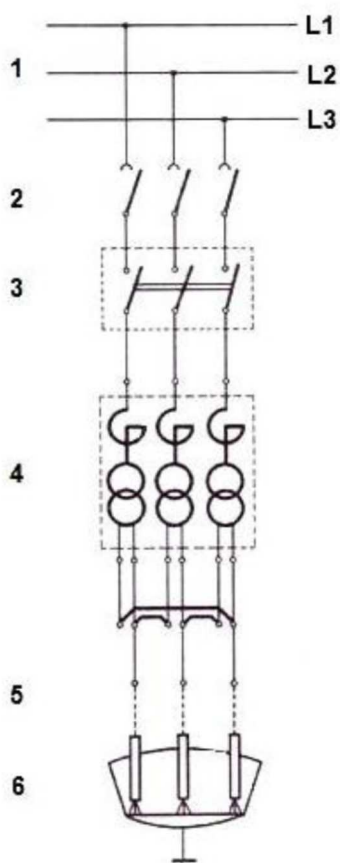
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí [3]

Na dalším obrázku č. 3.12 je znázorněno typické schéma zapojení elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí kde:

1. Napájecí síť 22kV
2. Odpojovač
3. Vysokonapěťový výkonový vypínač
4. Pecní transformátor a tlumivky
5. Krátká síť
6. Elektrody obloukové pece

Vysokonapěťový výkonový vypínač a odpojovač jsou elektricky ovládány pomocí řídicího panelu pecního zařízení. Mezi další možnosti řídicího panelu patří nastavování odboček pecního transformátoru, kterými se reguluje napětí a následně i proud pece.

Samotné ovládání a regulace pece není jednoduchou záležitostí a proto takovou pec může ovládat pouze pověřený pracovník.



Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť [3]

3.3.1 Napájecí síť obloukové pece

Vzhledem k výkonům elektrických obloukových pecí patří tato zařízení mezi největší odběratele elektrické energie. Pec má na síť vysokého napětí nežádoucí vliv, protože ji zahrnuje proměnlivými proudy. Rozsah těchto proudů může být mezi nulou a několikanásobkem jmenovité hodnoty. Tyto proměnlivé proudy způsobují kolísání napětí na impedancích. Tyto vyvolávané poklesy napětí mají negativní vliv na ostatní elektrické zařízení připojené na téže síti, především na výpočetní techniku.

Zkratový výkon elektrické sítě patří mezi nejdůležitější ukazatele pro posouzení připojitelnosti elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí. Podle výpočtu zkratového výkonu lze posoudit, zda se vliv rušivých účinků pohybuje v přijatelných mezích.

Do napájecí sítě elektrické obloukové pece patří i odpojovač a výkonový vypínač. Odpojovač slouží k bezpečnému odpojení pece od sítě vysokého napětí v době, kdy pec není využívána.

Vysokonapěťový vypínač slouží ke spínání a rozpínání silnoproudého obvodu během tavení, na začátku a konci tavení, nebo při poruchových stavech. Tento vypínač je velice namáhán, protože často spíná a vypíná vysoké proudy pece. Ve většině případů se provádí jako tlakovzdušný.

3.3.2 Pecní transformátor

Pecní transformátor je nejdůležitější částí elektrického obvodu pece. Výkon pecního transformátoru určuje kapacitu obloukové pece. Tyto transformátory jsou většinou trojfázové, olejové a regulační. U větších výkonů transformátorů se ještě navíc k chlazení oleje využívá vodní chlazení. Charakteristika zatížení pecních transformátorů je značně odlišná od zatížení běžných transformátorů, kde je zatížení trvalé a velmi málo se mění. Primární vinutí pecních transformátorů je zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníka, přepínání je umožněné zdvojnásobením napěťových stupňů. Sekundární vinutí je zapojeno do otevřeného trojúhelníka a všechny začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na víko transformátoru. Sekundární vinutí nelze měnit, protože je napojeno přímo na krátkou cestu. Výkony pecních transformátorů jsou až 120MVA.

Ve společné nádobě s transformátorem se nachází i tlumivka, která je zařazena mezi pecním transformátorem a vysokonapěťovým výkonovým vypínačem viz. obr. 3.13. Tlumivka není zapojena po celou dobu provozu pece, ale je připojena pouze při zapojení primárního vynutí do hvězdy. Hlavním úkolem této tlumivky je omezení zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou. Hlavní nevýhodou použití tlumivky je omezení celkové účinnosti obloukové pece.

3.3.3 Krátká cesta

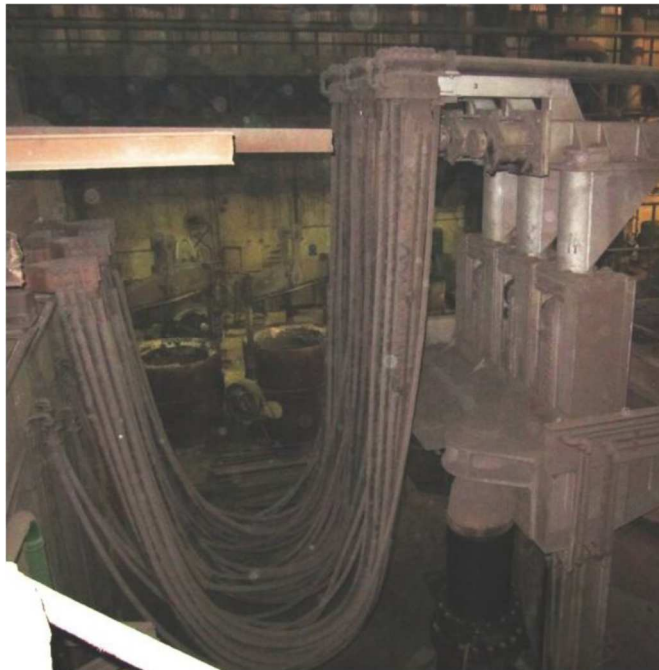
Krátká cesta je důležitou částí elektrické obloukové pece, která spojuje sekundární vývody pecního transformátoru s elektrodami obloukové pece. Z konstrukčního hlediska je krátká síť tvořena paralelním zapojením několika vodičů a to z důvodů vysokých proudů a z důvodu omezení skinefektu. Krátká síť má relativně vysokou indukčnost a pro její snížení se používá bifilárního zapojení, díky kterému dojde ke zlepšení účinnosti celé obloukové pece.

Krátkou cestu lze rozdělit na několik částí:

- Pásová část
- Ohebná lana
- Vodiče ramen držáku elektrod
- Držák elektrod
- Elektrody a spojky

K dosažení nízkých ztrát a celkové dobré účinnosti pece musí mít krátká cesta tyto vlastnosti:

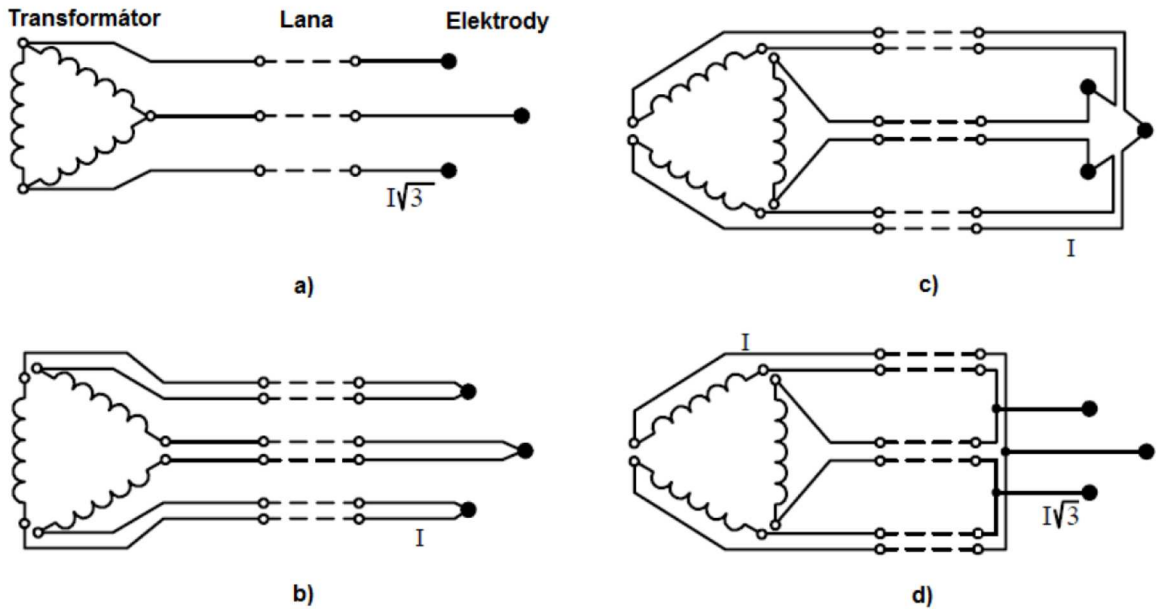
- Co nejkratší délku, aby se snížili elektrické ztráty všech druhů
- Nízká indukčnost
- Nízký ohmický odpor
- Nízkou vzájemnou indukčnost
- Dostatečnou mechanickou pevnost



Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece [3]

Způsoby zapojení krátké cesty:

Různé způsoby zapojení krátké cesty jsou vidět na obr. 3.15. Hlavní rozdíl mezi těmito zapojeními je to kde se skutečně nachází spojení vinutí do trojúhelníka.



Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty [3]

- Na tomto obrázku je vinutí spojeno uvnitř nebo na víku transformátoru
- Na tomto obrázku je vidět bifilární vinutí které je spojeno až na elektrodách. Bifilární přívody jsou náročnější na materiál a tedy i na cenu, ale zato mají menší reaktanční úbytky. Toto zapojení se používá u velkých výkonů obloukových pecí.
- Viz. b.
- Při tomto zapojení je vinutí spojeno až za ohebnými lany. Při tomto zapojení prochází sdružený proud pouze třemi vodiči.

Na obrázcích je také uvedena velikost proudu I přicházející na elektrody. Jelikož prochází při symetrickém stavu vinutím transformátoru proud I , pak na elektrodách v zapojení a. a d. přichází proud sdružený. V zapojení b. a c. přichází na elektrody proud stejný, jako je na vinutí transformátoru.

3.3.4 Elektrody obloukových pecí

Úlohou elektrod je přivést elektrickou energii do pracovního prostoru pece. Způsob jakým se k elektrodám přivádí proud, má velký význam, protože se v elektrodách a kontaktech ztrácí až 10% energie. Hlavními požadavky, které jsou kladeny na elektrody jsou:

- Nízká tepelná vodivost
- Vysoká elektrická vodivost
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká teplota oxidace
- Malý obsah popela a síry

Elektrody jsou prostorově umístěny do rovnostranného trojúhelníku. U obloukových pecí se používají elektrody:

- Uhlíkové
- Grafitové
- Samospékavé

Uhlíkové elektrody

Tyto elektrody se vyrábějí z retortového uhlí, směsí antracitu, koksu, pryskyřice a přírodního grafitu. Polotovary se později zbaví nečistot a lisuje se na požadované průměry a délky. Posléze se elektrody vypalují při teplotě až 1600 °C. Tyto elektrody se používají při výrobě feroslitin a uhlíkových ocelí.

Grafitové elektrody

Tyto elektrody jsou vyráběny stejně jako uhlíkové, akorát se vypalují až teplotou 2700 °C, čímž se uhlík přemění v grafit. Tyto elektrody jsou nejvíce používanými, protože mají větší dovolenou proudovou hustotu než elektrody uhlíkové.

Samospékavé elektrody

Tyto elektrody jsou složeny z ocelového pláště, opatřeného dovnitř žebry, které se vyplňují elektrovodným polotovarem. Tyto elektrody mají stejné složení jako uhlíkové. Výhodou těchto elektrod je nízká cena, protože se vyrábějí přímo na provozované peci.

3.4 Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí

Energetická soustava, která napájí závody s provozem elektrických obloukových pecí je často vystavena rušivým účinkům nepravidelně kolísajícího napětí. Původ tohoto nepravidelného kolísání napětí musíme hledat v nepravidelně proměnlivém proudovém zatížení obloukové pece. Při tomto proměnlivém proudovém zatížení vznikají na impedancích sítě poklesy napětí, jež vedou ke kolísání napětí a ke zpětnému vlivu elektrických obloukových pecí na energetickou soustavu. Kolísání napětí jsou v podstatě vyvolány dvěma typy proudových impulsů.

3.4.1 První typ změn proudového zatížení

Tento první typ proudových zatížení vzniká s četností 0,5krát až jednou za sekundu a to především v prvních 30ti minutách tavby. Zkratový proud při zapálení oblouku mezi elektrodou a vsázkou je tak velký, jako ustálený střední proud pece. Pokud je vsázka studená, neustále se tento zkratový stav opakuje. Mezi další příčiny vzniku průtoku zkratového proudu patří například stav, kdy se elektroda dotkne vsázky, což se stává například při sesednutí vsázky.

3.4.2 Druhý typ změn proudového zatížení

Tento typ změn se vyskytuje 2 až 20krát za sekundu. Intenzita proudu při tomto ději kolísá mezi ± 15 až ± 50 % své jmenovité hodnoty. Tyto změny proudu zřejmě souvisí s kolísání napětí v primárních obvodech obloukové pece. Změny proudu tohoto druhu leží u pásma necitlivosti automatické regulace posuvu elektrod, takže jsou při tradičním vybavení automatické regulace elektrické obloukové pece nepostizitelné.

3.4.3 Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn

Soubor rušivých účinků nepravidelně kolísajícího napětí, které má svoji podstatu zejména v proudových změnách druhého typu, nazýváme „flicker efektem“. Na základě výzkumu kolísání napětí v napájecí síti vn elektrických obloukových pecí je možno říci, že rušivý účinek kmitání napětí pozorovatelný při odchylkách 0,5 % jmenovité hodnoty napětí a četnosti výskytu 6 – 8 kmitů za sekundu. Tento rušivý účinek způsobuje blikání světla žárovkových svítidel, nepříznivě ovlivňuje rentgenová zařízení, televizi a počítače napájené z téže soustavy.

První příčina vzniku kolísání

Tato příčina kolísání napětí vychází z teorie oblouku. Intenzita proudu elektrického oblouku se mění od jedné půlvlny ke druhé vlivem rozdílné ionizace zóny elektrického oblouku, aniž by se měnila samotná délka oblouku.

Rozdílná ionizace zóny elektrického oblouku je způsobena nehomogenitou vsázky, která zrovna v danou chvíli je tavena obloukem. Vlivem vysokých teplot je kus vsázky pod elektrodou taven a mění se z pevného skupenství v kapalné a částečně se i vypařuje. Tyto výpary vlivem vysoké teploty ionizují a podílejí se tak na zvýšení koncentrace nosičů náboje v elektrickém oblouku, který nyní může přenést vyšší proud. Tato příčina vzniku kolísání napětí se projevuje především na začátku tavby a postupem času se stoupající teplotou taveniny její vliv klesá.

Druhá příčina vzniku kolísání

Tato příčina vzniku kolísání vzniká, když elektrický oblouk přeskakuje z jednoho kusu vsázky na druhý. Toto se děje přibližně v pěti až dvaceti periodách což odpovídá zhruba 0,1 až 0,4 krát za sekundu. Přeskočení elektrického oblouku se uskuteční tehdy, když špička nebo hrana kusu vsázky se pod vlivem vysoké teploty elektrického oblouku zaoblí a oblouk přeskočí na jinou špičku. Tímto se mění délka oblouku a tedy i proud oblouku.

Třetí příčina vzniku kolísání

Třetí příčinou je smyčkový pohyb oblouku, při kterém se oblouk prodlužuje. Tímto prodlužováním a zkracováním oblouku se mění amplituda proudu oblouku. Vychýlení oblouku je důsledkem zesíleného magnetického pole sousední fáze. Toto zesílení magnetického pole je důsledkem rozdílného proudu fází. Každá elektroda pracuje samostatně podle okolností vyskytujících se v bezprostředním okolí hoření jejího oblouku. Hodnota proudu může při počátku natavování dosáhnout až zkratové hodnoty proudu, zatímco sousední elektroda pracuje se střední hodnotou proudu. Tento provozní stav trvá tak dlouho, až kus působící zkrat na elektrodě je opálen, nebo až regulace elektrodu zvedne.

Všechny tři popsané vlivy kolísání proudu se libovolně překrývají (superponují) a vedou k takovému kolísání proudu, které co do velikosti amplitudy a četnosti nelze přesně definovat. Všechny popsané vlivy se nejsilněji projevují v počátku natavování a jsou tím slabší, čím je vsázka více natavena.

Elektrická oblouková pec patří mezi velké generátory harmonických do napájecí sítě. Jedná se především o 3. a 5. harmonickou. Celkově elektrické obloukové pece zatěžují napájecí síť hlavně nepravidelně proměnlivým kolísáním napětí, velkou proudovou nesymetrií a špatným účinníkem (zhruba $\cos\varphi=0,7$).

3.5 Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť

3.5.1 Omezení zkratových a velkých proudů

Omezení zkratových a velkých proudů se provádí pomocí zapojení tlumivky do série s pecním transformátorem. Tímto zapojením se snažíme omezit proudové špičky, protože právě při těchto proudových špičkách dochází k nejvyšším úbytkům napětí. Toto zapojení přispívá také ke stabilizaci oblouku. K těmto zkratovým a velkým proudům dochází především při natavování vsázky. Po natavení vsázky se předřadná tlumivka z obvodu vyřadí. Zároveň je nutné provést tuto tlumivku několika stupňovou.

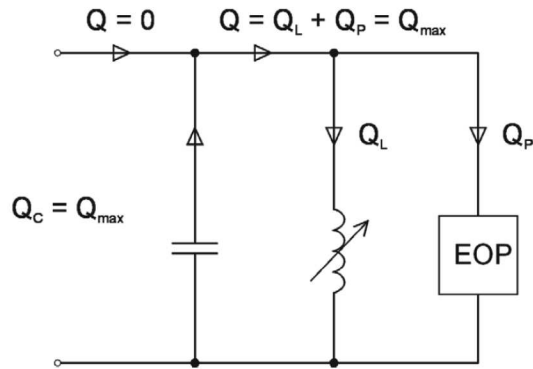
3.5.2 Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení

Zkratový výkon má zásadní vliv na velikost kolísání napětí v síti. Požadovaný zkratový výkon sítě lze odvodit od výkonu pecního transformátoru. Zvýšení zkratového výkonu v místě připojení se provádí:

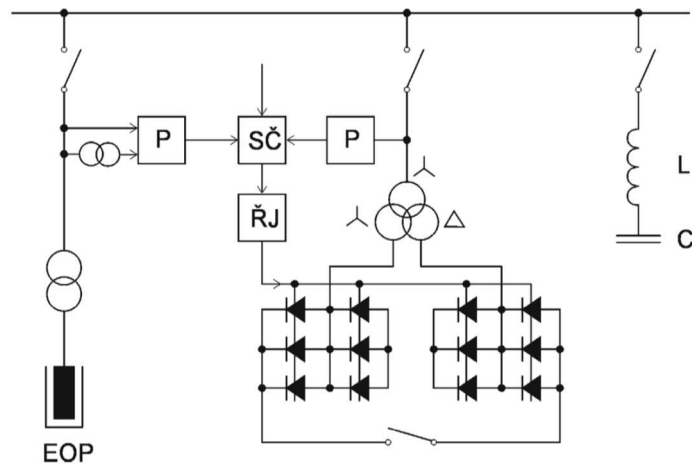
- zesílení sítě se provádí například zdvojením přívodů, zvětšením transformátorů a podobnými úpravami. Tato řešení jsou nákladná a většinou je nutno celou síť rekonstruovat.
- Připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě
- sériovou kompenzací
- paralelní kompenzací

3.5.3 Nepřímá kompenzace

Tímto způsobem udržujeme odběr jalové energie konstantní při maximální hodnotě. V tomto případě omezíme kolísání napětí, ale účinnost je trvale velmi špatná (obr. 3.16). Pro nepřímou kompenzaci se nabízí možnost využít řízený statický usměrňovač jako spotřebič proměnného induktivního výkonu (viz. obr. 3.17). Funkce spočívá v tom, že součet spotřeby pece a usměrňovače je konstantní a tento je kompenzován statickým kondenzátorem. Nevýhodou tohoto řešení je produkce vyšších harmonických. Dále je třeba poznamenat, že i tato koncepce kompenzuje pouze souslednou složku.

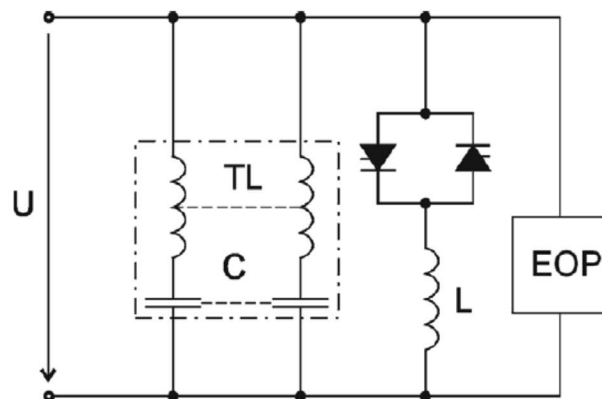


Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace [3]



Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměřňovačem [3]

Jako další možnost se jeví použití jedné tlumivky řízené tyristory pro každou fázi, jejichž proud základní harmonické je měněn antiparalelně zapojenými tyristory (viz. obr. 3.18). I toto zapojení je však zdrojem vyšších harmonických.



Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměřňovačem [3]

3.5.4 Přímá kompenzace

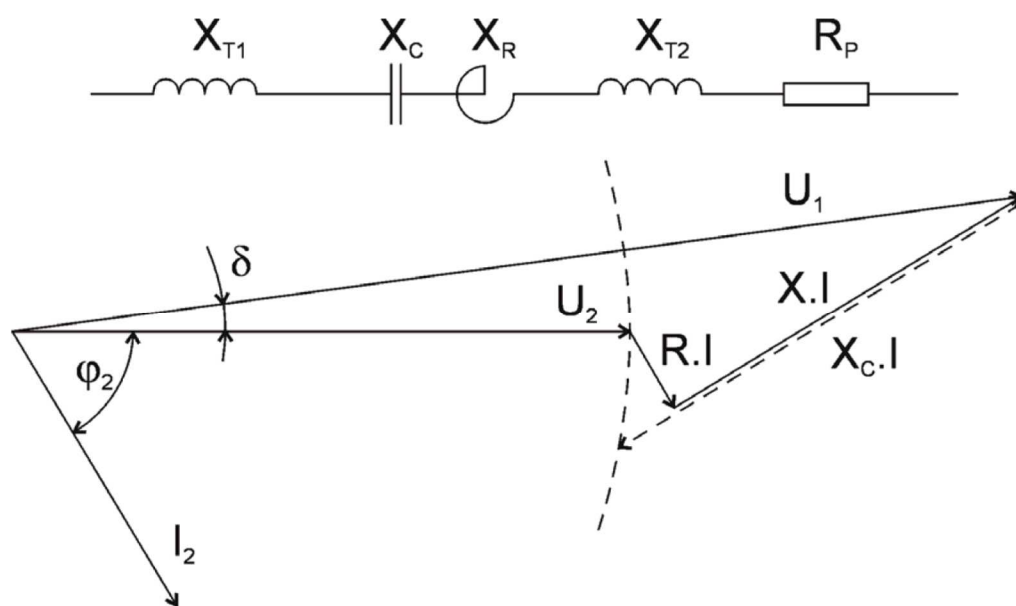
Přímou kompenzací je možno měnit výrobu induktivní energie v kompenzátoru v synchronizmu se spotřebou elektrické obloukové pece. Připojení pevné kondenzátorové baterie není příliš vhodné

řešení, protože takto zapojená kondenzátorová baterie nedokáže reagovat na potřeby proměnlivého induktivního proudu pece. Pevnou kompenzaci lze tedy využít především při kompenzaci proudu na prázdnou pecního transformátoru, případně ke kompenzaci tzv. stálé složky spotřeby Q_c . Vhodnějším způsobem kompenzace je použití více stupňovitého spínání kompenzační baterie pomocí tyristoru. Ke spínání je použito antiparalelní zapojení dvou tyristorů. Díky použití tyristorových spínačů je spínání kompenzačních stupňů velice rychlé. Tyto tyristorové spínače neobsahují žádné pohyblivé části, a proto dosahují dlouhé životnosti. Kompenzační zařízení je možno realizovat jako symetrické nebo i pro kompenzaci nesouměrného zatížení. Doba reakce na změny induktivního proudu a sepnutí tyristorového spínače se pohybuje okolo 30ms.

3.5.5 Serio-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece

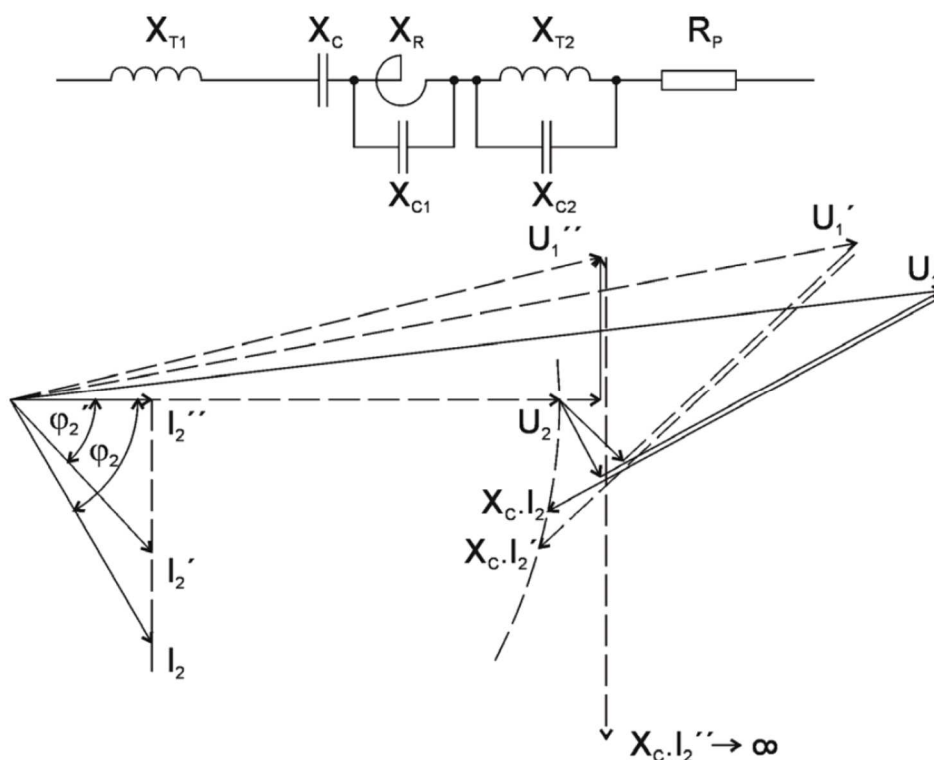
Sériová kompenzace řeší zejména zvýšení a stabilizaci napětí v síti, zatímco paralelní kompenzací dosáhneme zlepšení účinníku omezením zdánlivého proudu o příslušnou složku jalového proudu, dodaného kondenzátorovou baterií přímo v místě spotřeby. Na obr. 3.19 je nakreslen vektorový diagram napětí a proudu elektrické obloukové pece.

Čárkovaně je vynesena vektor napětí $X_c \cdot I$, tedy velikost napětí, které by bylo nutno vykompenzovat sériově zařazeným kondenzátorem, aby byla splněna podmínka $\Delta U = 0$.



Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece [3]

Jestliže zařadíme do obvodu v horní částí paralelní kondenzátor C_1 , kompenzující spotřebu jalové energie tlumivky X_R , pak vektorový diagram napětí a proudů se změní následovně (viz. obr. 3.20).



Obr. č. 3.20 Vektorový diagram serio-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece [3]

Zdánlivý proud I_2 zmenší svoji hodnotu na I_2' a rovněž úhel φ_2 se zmenší na φ_2' . Vektorový diagram úbytků napětí, odpovídající činnému odporu pecní obvodu a jeho reaktanci, je znázorněn plnou čarou dochází tedy proti původnímu stavu k zmenšení obou složek úbytků napětí.

Jestliže teoreticky vykompenzujeme účinník pece až na $\cos\varphi=0$, pak při nulovém úhlu bude vektor reaktančního úbytku napětí kolmý k vektoru napětí U_2 . Obě složky reaktančního napětí i činného úbytku napětí ΔU budou mít v tomto případě nejmenší hodnotu. Přesto však vektor $X_C \cdot I_2''$ neprotíná kružnici označující geometrické místo bodů o napětí U_2 a tedy konverguje k nekonečnu.

$$X_C * I_2'' \rightarrow \infty \quad (2.56)$$

V případě, kdy $\varphi_2''=0$, není možno splnit podmínku $\Delta U=0$. Lze tedy konstatovat, že činná složka úbytku napětí podstatně ovlivňuje svojí hodnotou velikost kompenzačního výkonu sériového kondenzátoru stejně tak, jako úhel φ_2 mezi proudem a napětím pecního obvodu. Můžeme tedy napomáhat celkovému efektu sériové kompenzace napětí paralelní kompenzací účinníku jen za toho předpokladu, že činná složka úbytku napětí je mnohem menší než složka reaktančního úbytku napětí. Potom stačí vykompenzovat reaktanční úbytek napětí podle zvoleného stupně kompenzace a malý činný úbytek napětí ponecháme nevykompenzován.

Při velmi malém činném úbytku napětí kompenzované sítě s elektrickými obloukovými pecemi je současná paralelní kompenzace účiníku velmi výhodná a poskytuje značné velké nákladů na kompenzační výkon sériových kondenzátorů.

Závěrem lze tedy říci, že sériová kompenzace je tím účinnější, čím je větší úhel mezi vektory napětí a proudu, tedy horší účiník.

4. Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie s.r.o.

4.1. Naměřené průběhy ve „Slévárně TS2“ v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim

Poprvé se měření odehrálo dne 15.5.2014 v rozvodně TS 20 na straně VN přes proudový transformátor s převodem 1200/5A a přes napěťový transformátor 6000/100V. Měření probíhalo při 2 tavných obloukové pece s výkonem 3MVA. Cílem měření bylo zjištění úrovně flickeru na straně VN a následný návrh opatření pro snížení úrovně flicker efektu a pro udržení neutrálního účinníku obloukové pece.

Výkon pecního transformátoru je 3 MVA a tonáž pece je 5 tun/vsázka. Celý tavíci cyklus trvá okolo 90 minut.

Z provedených měření vyplívá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přívodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecních transformátorů je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

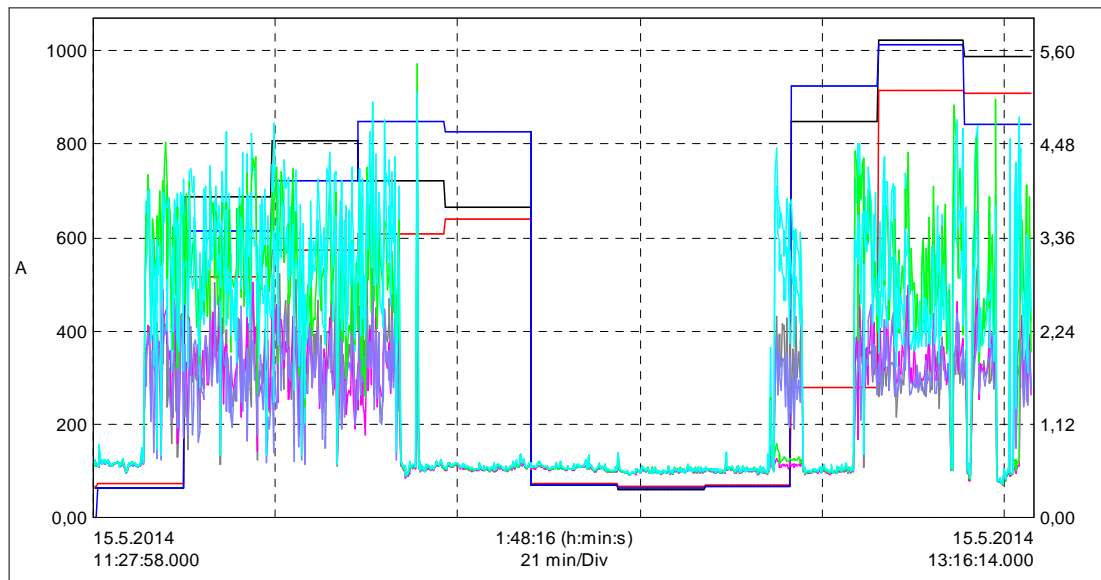
Měření č.1

Měření č.1 probíhalo od 11:27 do 13:16. Na tomto měření je vidět část první tavby (natavování), přičemž náběh obloukové pece trval od 11:33 do 12:07, pak následoval výpadek. V čase 12:55 došlo k opětovnému náběhu obloukové pece až po ustálené tavení v čase 13:16.

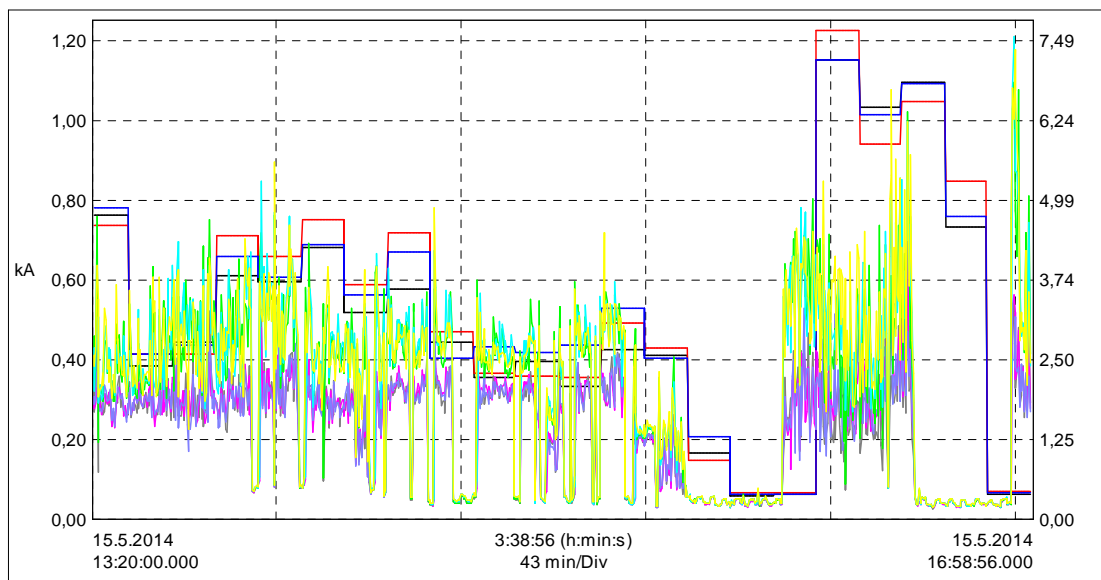
Na následujících dvou grafech jsou zachyceny vlivy provozu obloukové pece na úroveň flicker efektu (na straně VN). Proudy jsou znázorněny světle a náleží jim levá stupnice, flicker efekty jsou tmavé a patří jim pravá stupnice.

Měření č.2

Toto měření začalo v čase 13:20 při ustáleném tavení 1. tavby. V 16:00 začalo natavování 2. tavby. V 16:30 došlo k přerušení 2. tavby z důvodu závady.



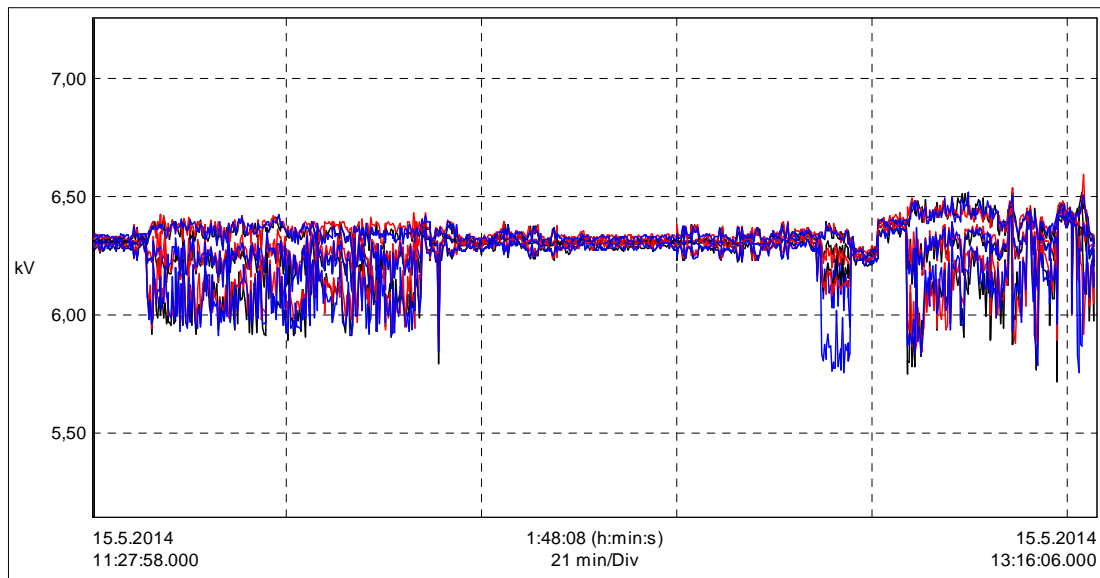
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1



Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2

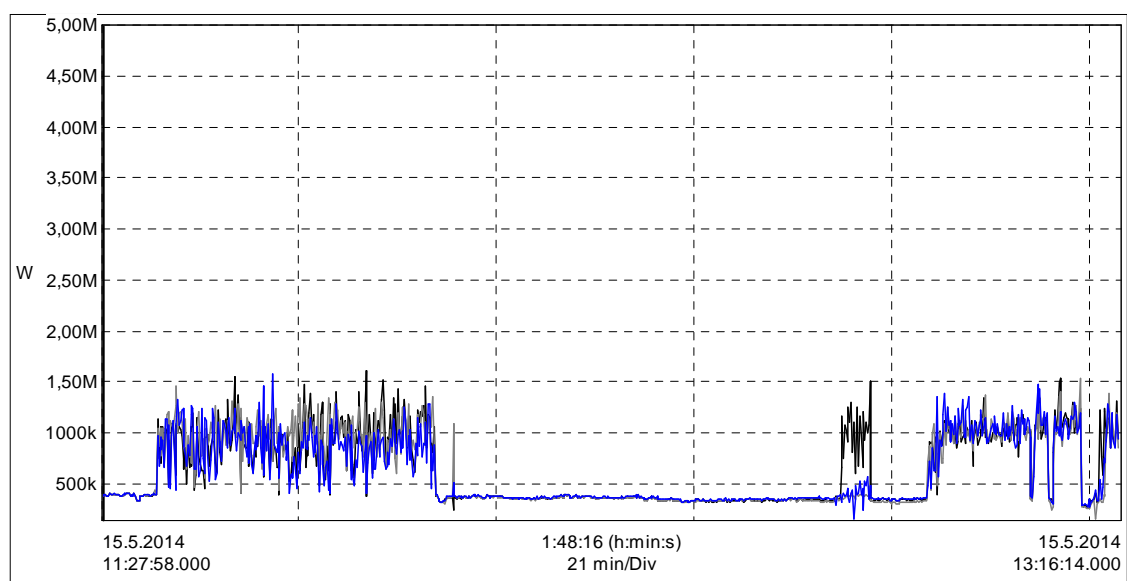
Z těchto dvou grafů můžeme vidět, že při provozu obloukové pece přesahuje úroveň krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu P_{st} hodnoty na straně VN 2,1 – 7,6 krát (na straně NN dokonce 1,4 – 13,7 krát). Povolená mez je stanovena normou ČSN EN 61000-3-3 ed.3 na hodnotu $P_{st} = 1$ (vzorkování po deseti minutách)

Na dalším grafu je vidět kolísání napětí na straně VN při měření č.1. Při provozu elektrické obloukové pece kolísá napětí mezi 5,8 – 6,6 kV. K největšímu kolísání napětí dochází při natavování vsázky.



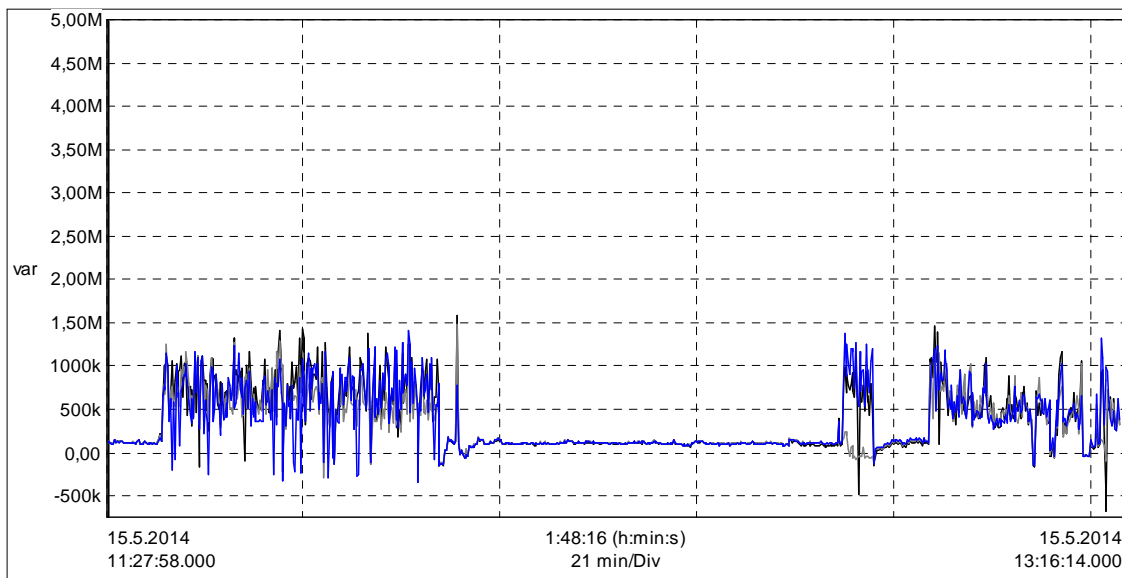
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1

Na následujícím grafu jsou vidět činné výkony jednotlivých fází. Černá znázorňuje fázi L1, šedá fázi L2 a modrá fázi L3.



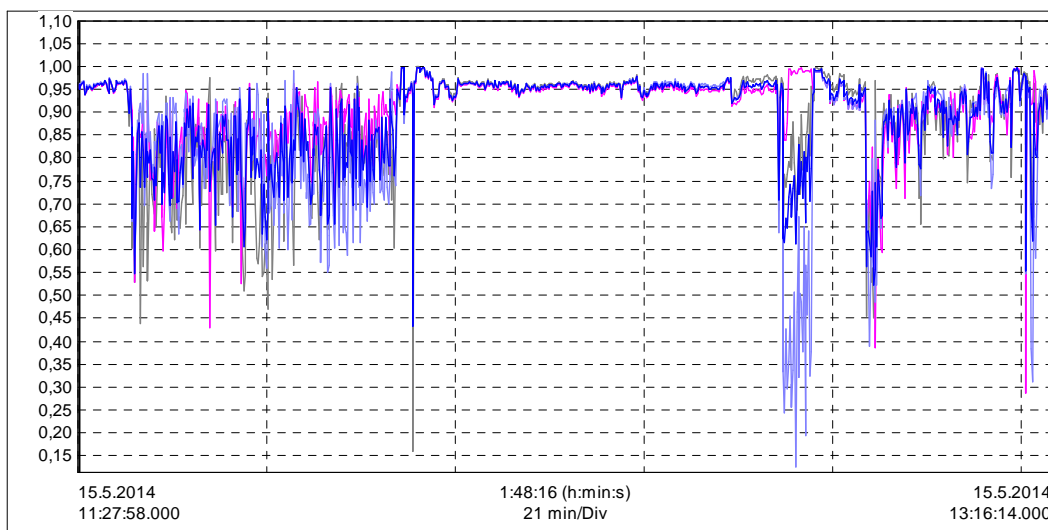
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází

Na dalším grafu jsou zobrazeny průběhy jalových induktivních výkonů. Barevné znázornění jednotlivých fází odpovídá předešlému grafu.

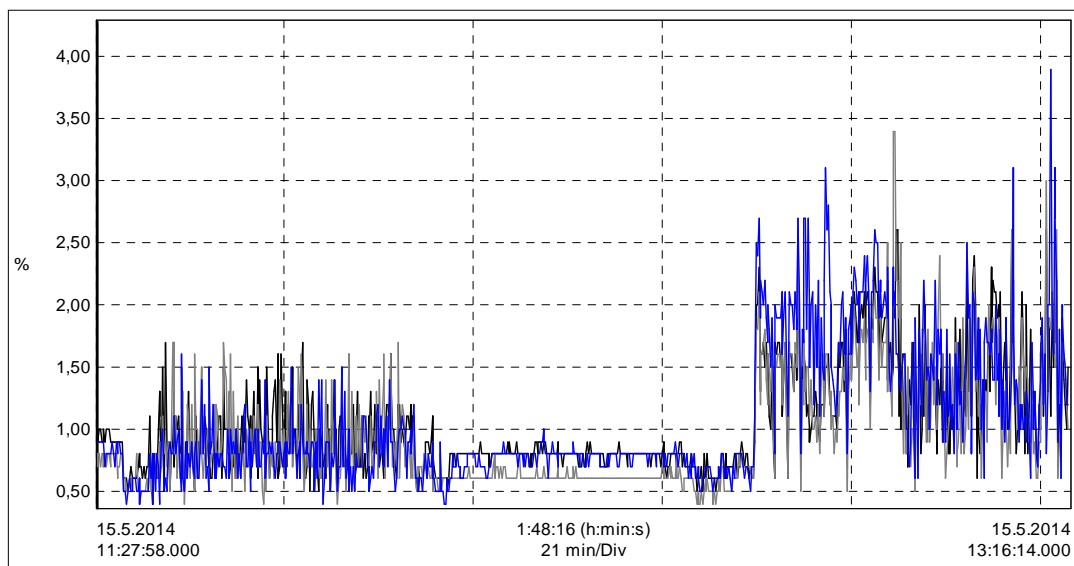


Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází.

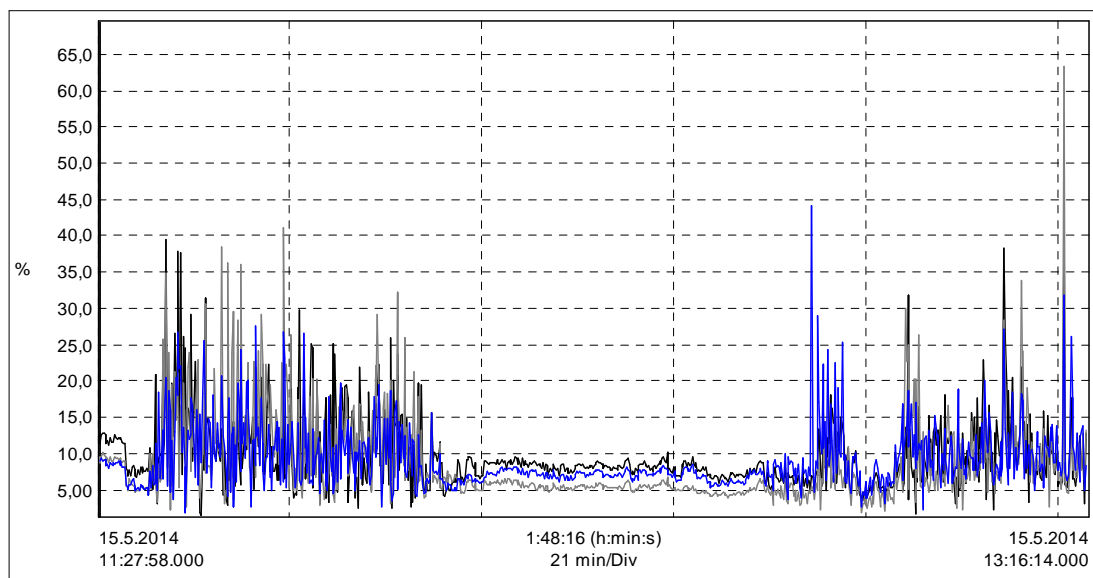
Účinník se při měření č.1 pohyboval v hodnotách znázorněných na následujícím grafu.



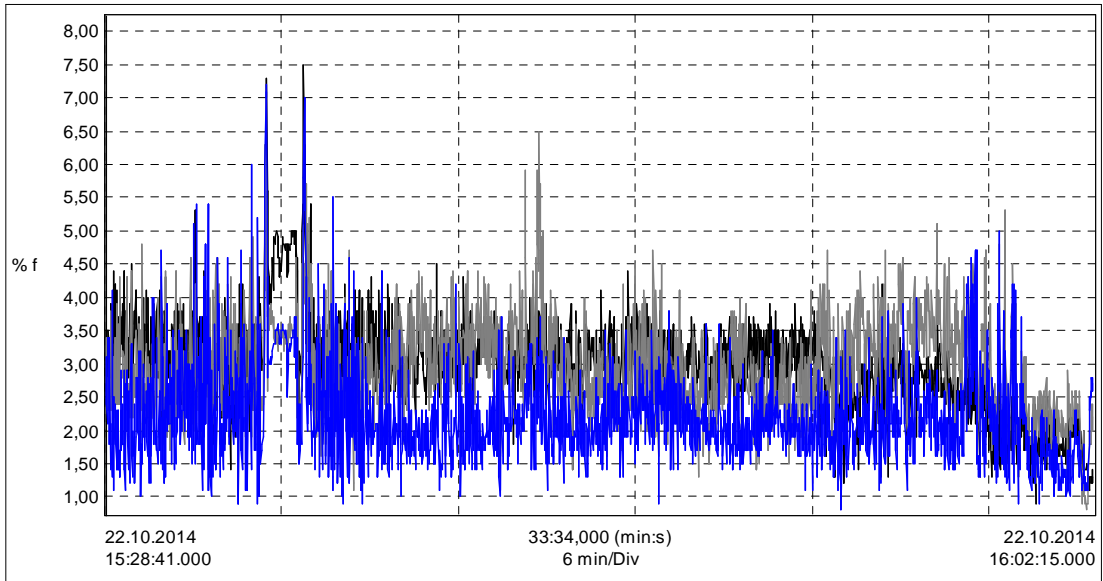
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1



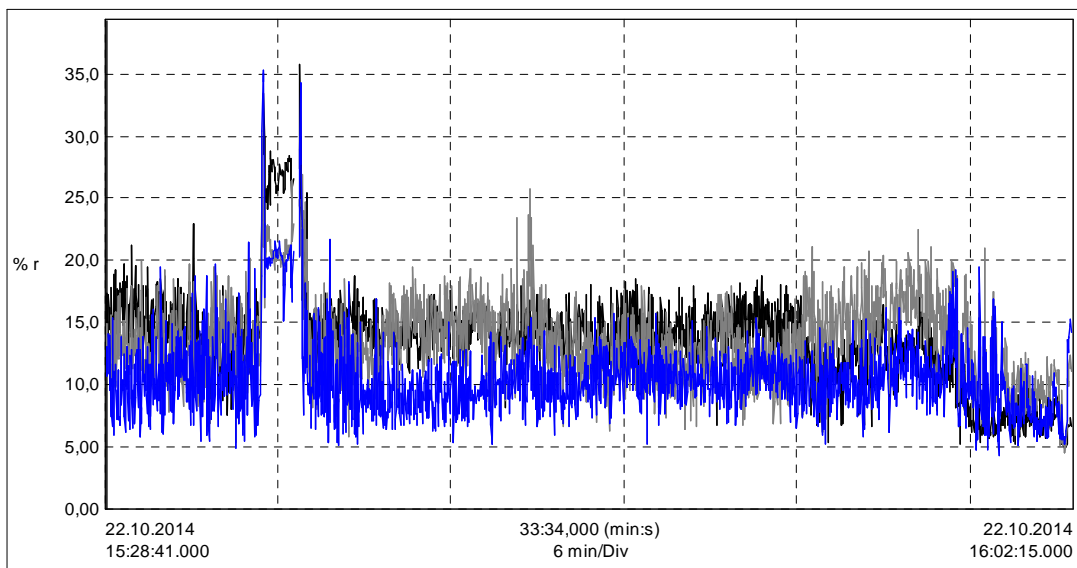
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)

Po prvním měření se uskutečnilo dodatečné měření na NN straně u vypínače kompenzace. Nativování probíhalo od 15:28 do 16:00. Měření bylo určeno hlavně k změřeni harmonických na straně NN, které se při prvním měření nezaznamenávaly.

Z výše uvedených grafů je vidět, že jalový výkon se skokově mění v řádech jednotek sekund, a proto není možné použití klasicky spínaných kompenzačních stupňů pomocí stykačů, ale musíme použít bezkontaktní tyristorové spínače. Při použití těchto tyristorových spínačů a regulátoru jalového výkonu s rychlou regulací je možné provádět regulaci každých 20 - 30ms. 20ms (délka jedné periody) potřebuje regulátor k měření a vyhodnocení naměřených hodnot a dalších 10ms potřebuje tyristorový spínač k sepnutí kondenzátoru při minimálním rozdílu napětí sítě a napětí kondenzátoru. Klasické vzduchové stykače dokáží spínat 5 – 6 krát za sekundu, ale samotné kondenzátory jsou konstruovány s dobou vybíjení 1 minuta. Při použití klasických vzduchových stykačů by takováto kompenzace nedokázala dostatečně rychle reagovat na změny v síti a docházelo by k nedokompenzování a nebo k překompenzování sítě.

Dále je nutné, aby použité kondenzátory byli v sérii zapojeny s předřadnými hradíci tlumivkami. Tyto tlumivky jsou konstruovány tak, aby tvořily s kondenzátory sériový rezonanční RLC obvod, jehož rezonanční frekvence je zvolena dle frekvence dominantní harmonické (v našem případě je to 5. harmonická – 250Hz). Resonanční frekvence je zvolena pod úroveň dominantní harmonické, v našem případě je standardně vyráběná řada s rezonanční frekvencí 189Hz (činitel zatlumení 7%). Zatlumení kompenzačních kondenzátorů zaručuje, že kondenzátory nebudou při provozu napětově a proudově namáhány vyššími harmonickými. Je taky nutné dodržet to, aby rezonanční frekvence nebyla stejná, nebo příliš blízko frekvenci signálu HDO. Pokud by se tak stalo docházelo by k proudovému přetěžování kompenzace a k odsávání signálu HDO ze sítě, a to by mohlo mít za následek nefunkčnost některých zařízení, která tento signál využívají.

Z provedených měření vyplývá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přívodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecního transformátoru je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

4.2 Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim

Na základě výše uvedených skutečností jsem navrhnul pro snížení hodnoty flicker efektu a pro kompenzaci účinníku v síti obloukové pece dva hrazené kompenzační rozváděče s rychlým spínáním kompenzačních stupňů. Tyto kompenzační rozváděče budou připojeny na sekundární straně transformátorů T201 a T202. Jedná se dva identické kompenzační rozváděče, k jejichž řízení bude sloužit jeden regulátor, který bude paralelně spínat stejné stupně v obou kompenzacích.

Při měření č.1 a č.2 byla stále v provozu ještě stávající kompenzace. Celkový kompenzační výkon tak byl odvozen z naměřených hodnot a z velikosti stávající kompenzace. Stávající kompenzace, ale byla řízena regulátorem QERP, který dostává hodnoty jalového výkonu z elektroměru pomocí impulsních výstupů, a tak není schopen reagovat na náhlé změny jalového výkonu pece. Účinník je proto touto kompenzací regulován zcela minimálně a to hlavně v době natavování vsázky. Navíc díky pomalé regulaci tohoto regulátoru nedochází téměř k žádnému potlačení flickeru a navíc tato kompenzace pozdě odpíná kompenzační stupně a tak tato kompenzace může překompenzovat (dojde k dodávce kapacitního jalového výkonu do sítě).

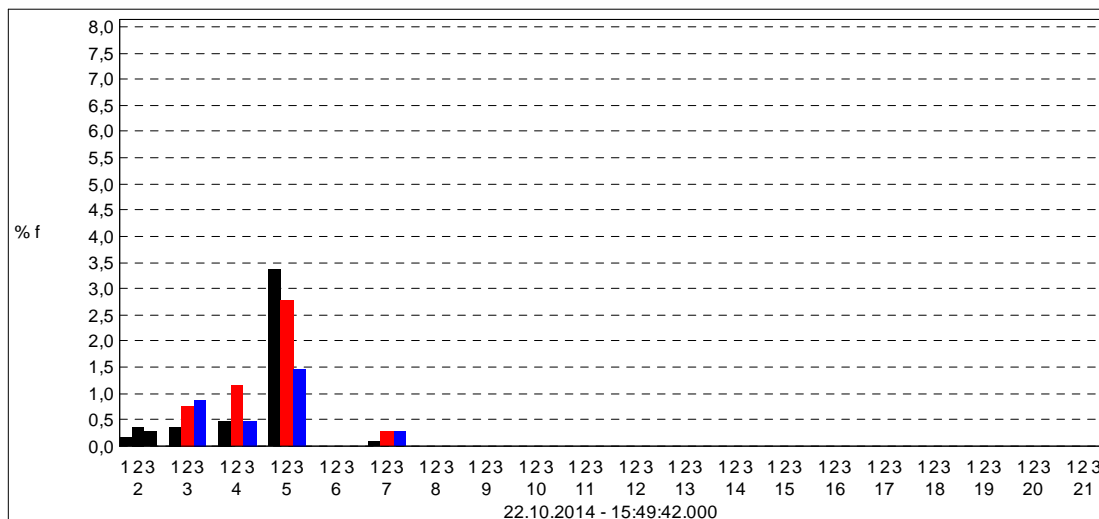
V následující tabulce č. 4.3 jsou uvedeny parametry navrhovaného kompenzačního rozváděče. Celkově se jedná tedy o dvě stejné kompenzace s jedním regulátorem. První kompenzace se připojí na stávající přípojnice po současné kompenzaci na transformátoru T201 a druhá se připojí stejně akorát na transformátor T202. Zapojení stávající kompenzace je vidět na obrázku č. 4.13.

Jako první kompenzační stupeň byl zvolen kondenzátor s kompenzačním výkonem 25kVar. Nižší hodnota jalového výkonu prvního kompenzačního stupně už by byla zbytečná, a regulátor by tak menší stupeň příliš často spínal bez většího vlivu na celkový účinník a na úroveň flicker efektu.

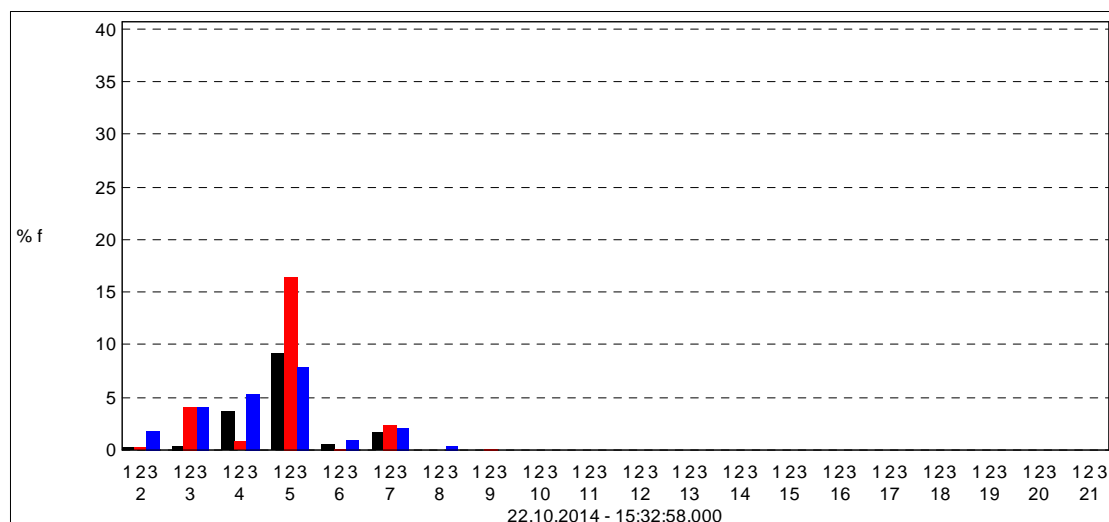
Kompenzace je v hrazeném provedení, a to z důvodu vyšších harmonických v síti a z důvodu omezení strmosti nárůstu proudu při spínání kondenzátorů tyristory. Pokud by strmost nárůstu proudu di/dt byla větší, než dovoluje výrobce tyristorů, mohlo by dojít k destrukci polovodičové vrstvy tyristoru. Dále musíme pro jištění tyristorů použít speciální pojistky s charakteristikou gR nebo aR, které nám zaručují, že při zkratu vybaví pojistky dříve, než dojde k poškození tyristoru.

Z grafu č. 4.11 a 4.12 je vidět, že dominantní harmonickou je 5-tá (250Hz) a proto byla rezonanční frekvence seriového zapojení tlumivky a kondenzátoru zvolena na hodnotu 189Hz (činitel ztlumení $p=7\%$).

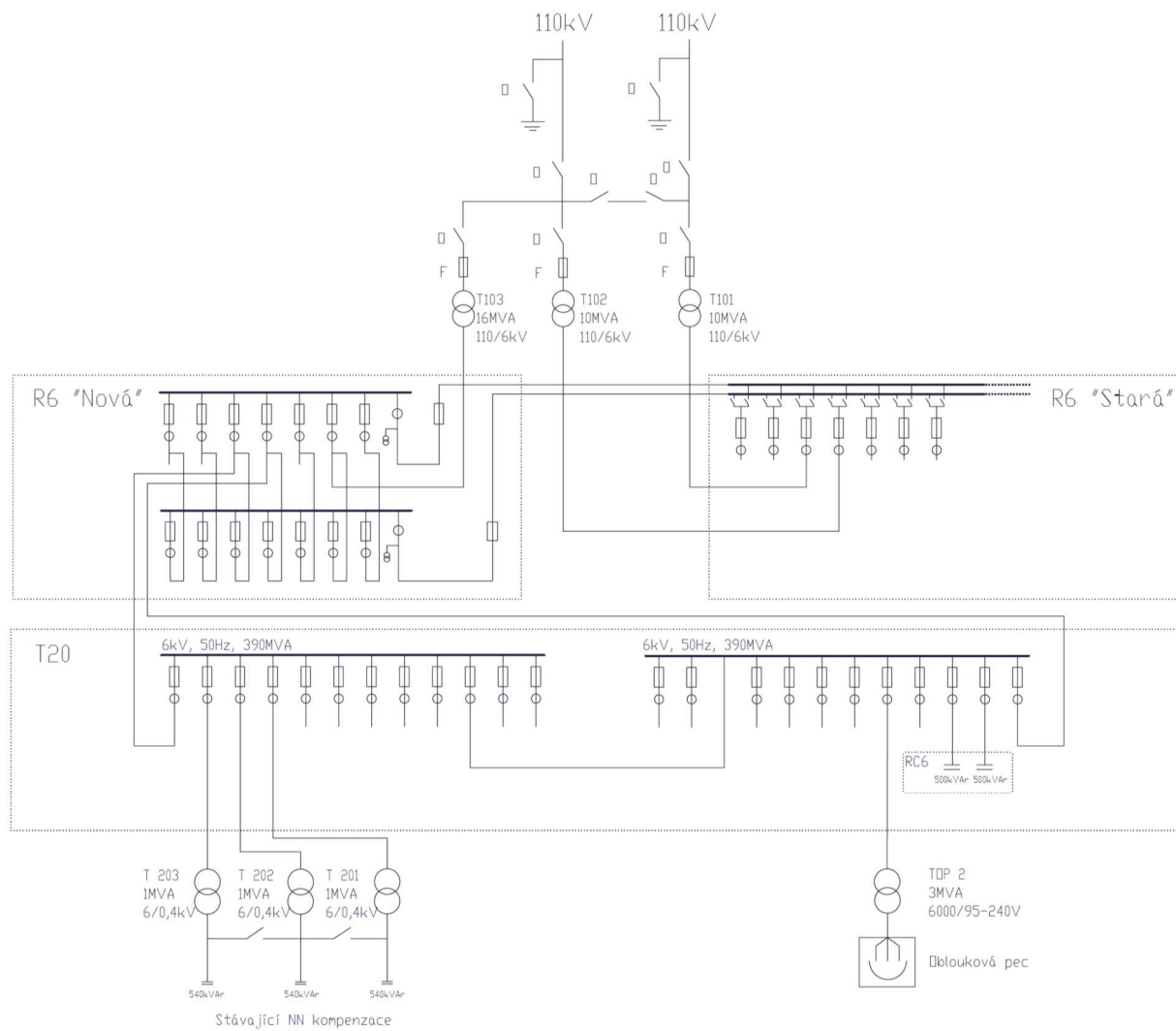
V příloze č.1 a č.2 je vidět schéma kompenzačního rozváděče a jeho model.



Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



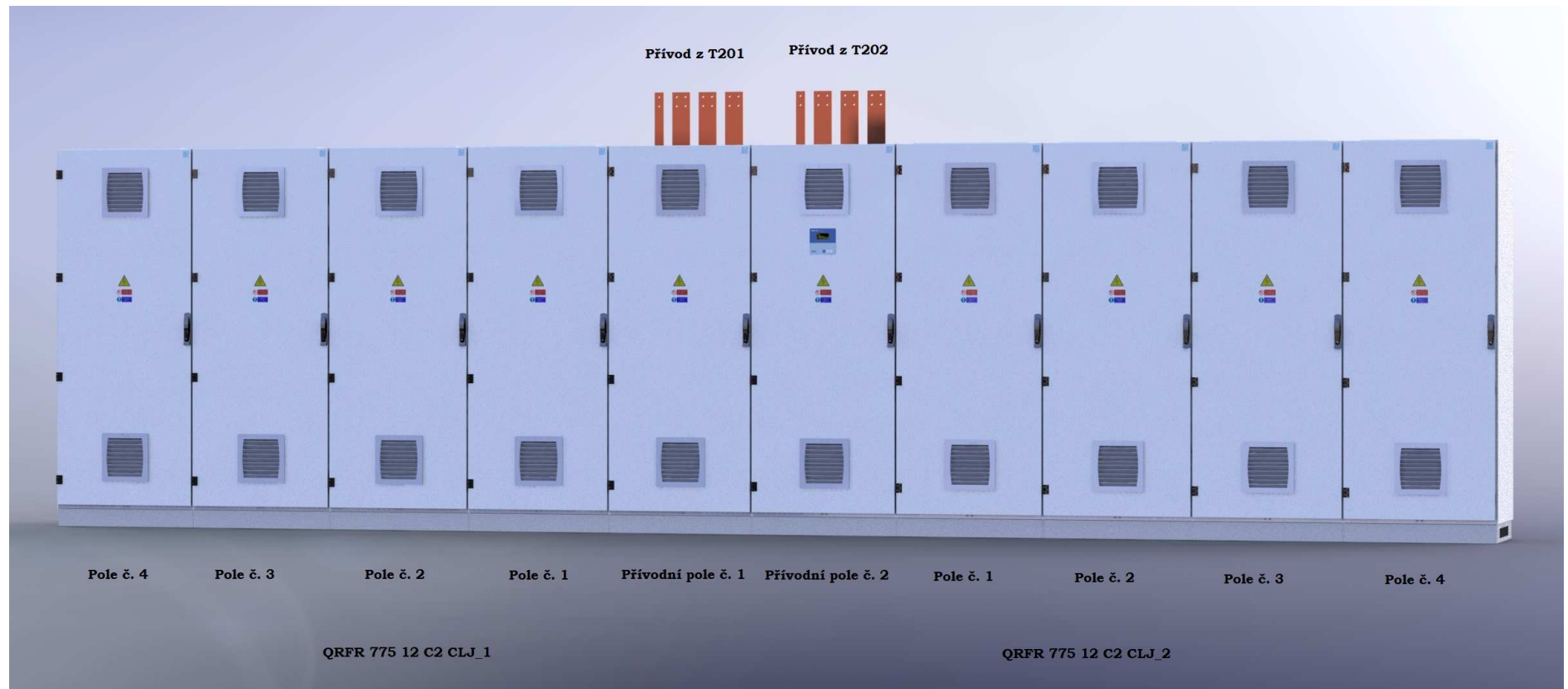
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů

Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče

RYCHLÝ HRAZENÝ KOMPENZAČNÍ ROZVÁDĚČ NN		
Typ		QRFR 775 12 C2 CLJ
Napěťová soustava	-	3/PEN 400/230 V AC, 50 Hz, TN-C
Jmenovitý kompenzační výkon	kvar	688,71
Jmenovitý instalovaný výkon	kvar	775,00
Jmenovitý proud	A	994
Zatlumení	Hz	189
Činitel zatlumení p	%	7
Nejmenší stupeň	kvar	25
Počet stupňů	-	12
Řazení (váhy) stupňů	-	1:2:2:2:2:2:2:4:4:4:4
Počet možností regulace	-	32
Situování přívodu	-	Pomocí stávajících přípojníc shora
Provedení přívodu	-	připraveno pro připojení na přípojnice
Hlavní prvek přívodu	-	Výkonový jistič 1600A
Počet polí	-	5
Zkratová odolnost	kA	65
Spínání kompenzačních stupňů	-	Tyristorové moduly CTU
Regulace (regulátor)	-	FCR12TRX-12
Kondenzátory	-	ZEZ SILKO, 440V , 50Hz, 3f, přetlakový odpojovač, vybíjecí rezistory
Tlumivky	-	ZEZ Cuk, 400/440/189, 50Hz, 3f, tepelná poj.
Větrání	-	nucené
Krytí	-	IP40/00
Teplota prostředí	-	vnitřní provedení 5°C / max. 40 °C, nejvyšší střední hodnota za 24 hod. max. 35 °C
Vnější vlivy	-	vnitřní provedení - třída vlivu dle ČSN 33 2000-5-51- prostory normální
Proudový obvod regulátoru	-	x/5 A nebo x/1 A, max. spotřeba 1 VA
Provedení skříně	-	oceloplechová
Rozměry zařízení - š x v x h	mm	4000x2100x600
Hmotnost	kg	1660



Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2

5. Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece

Přínos kompenzačního rozváděče na zlepšení úrovně flickeru a zlepšení hodnoty účinníku nebylo možné na místě ověřit, protože nedošlo k realizaci z finančních důvodů. Proto bude přínos kompenzačního rozváděče simulován na matematickém modelu elektrické obloukové pece.

5.1 Matematický model obloukové pece

Matematický model obloukové pece [10] se skládá z modelu sítě a modelu samostatné pec. Pro účely ověření funkčnosti kompenzace jsem využil stávající model, u kterého jsem upravil parametry prvků v obvodu tak, aby přibližně odpovídaly chování reálné obloukové pece při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Schéma matematického modelu je v příloze. Výsledná rovnice 2.57 popisující vodivost oblouku a tak i jeho chování vznikla spojením Cassiho modelu pro velké proudy a Mayerova modelu pro malé proudy oblouku.

$$G = G_{min} + \frac{vi}{(A+Bl)^2} \left(1 - e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} \right) + \frac{i^2}{P_0} e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (2.57)$$

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 e^{\left(\frac{-\alpha}{|i|}\right)} \quad (2.58)$$

G.....vodivost oblouku

G_{min}minimální vodivost prostředí mezi elektrodami ve stavu kdy nehoří oblouk

v.....napětí oblouku

i.....proud oblouku

A.....konstanta oblouku

B.....konstanta oblouku

l.....délka oblouku

P_0ztrátový výkon oblouku

θčasová deionizační konstanta

θ_0minimální deionizační konstanta

θ_1proměnlivá deionizační konstanta

Matematický model se snaží věrně napodobit chování obloukové pece při natavování, kdy se velice často a výrazně mění délka oblouku a dále pro ustálenou tavbu, kdy se už je délka oblouku poměrně konstantní. Bohužel jsem neměl možnost měřit přímo na sekundární straně pecního transformátoru a tak nedokáži úplně přesně porovnat průběhy reálné pece a matematického modelu, ale snažil jsem se, aby byly parametry co nejvíce podobné, tak aby bylo možné alespoň částečně objektivně posoudit přínos kompenzace na změnu úrovně flicker efektu.

5.2 Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě

Dle očekávání se flicker efekt pece na straně VN (6kV) s použitím kompenzace snížil. Hodnoty vzešlé z matematického modelu nejsou úplně stejné, jako ty které bychom získali z reálného měření na peci. Toto je způsobeno především neznalostí reálných parametrů obloukové pece, které se zřejmě liší od parametrů pece v matematickém modelu. Simulace použití kompenzačního zařízení s rychlým spínáním kompenzačních stupňů především dokázala, že kompenzační zařízení má pozitivní vliv na úroveň flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí. Dále dle očekávání došlo k výraznému zlepšení účinníku sítě. Simulace proběhla při dvou stavech obloukové pece, a to při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Výsledné hodnoty P_{ST} (short time flicker effect) pro oba stavy pece s kompenzací a bez kompenzace jsou uvedeny v následující tabulce č. 4.4.

Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty

Natavování vsázky		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	5,3	4,4
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,41	0,37
PF	0,55 - 1	0,75 - 1
Ustálená tavba		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	0,65	0,6
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,13	0,13
PF	0,6 - 1	0,75 - 1

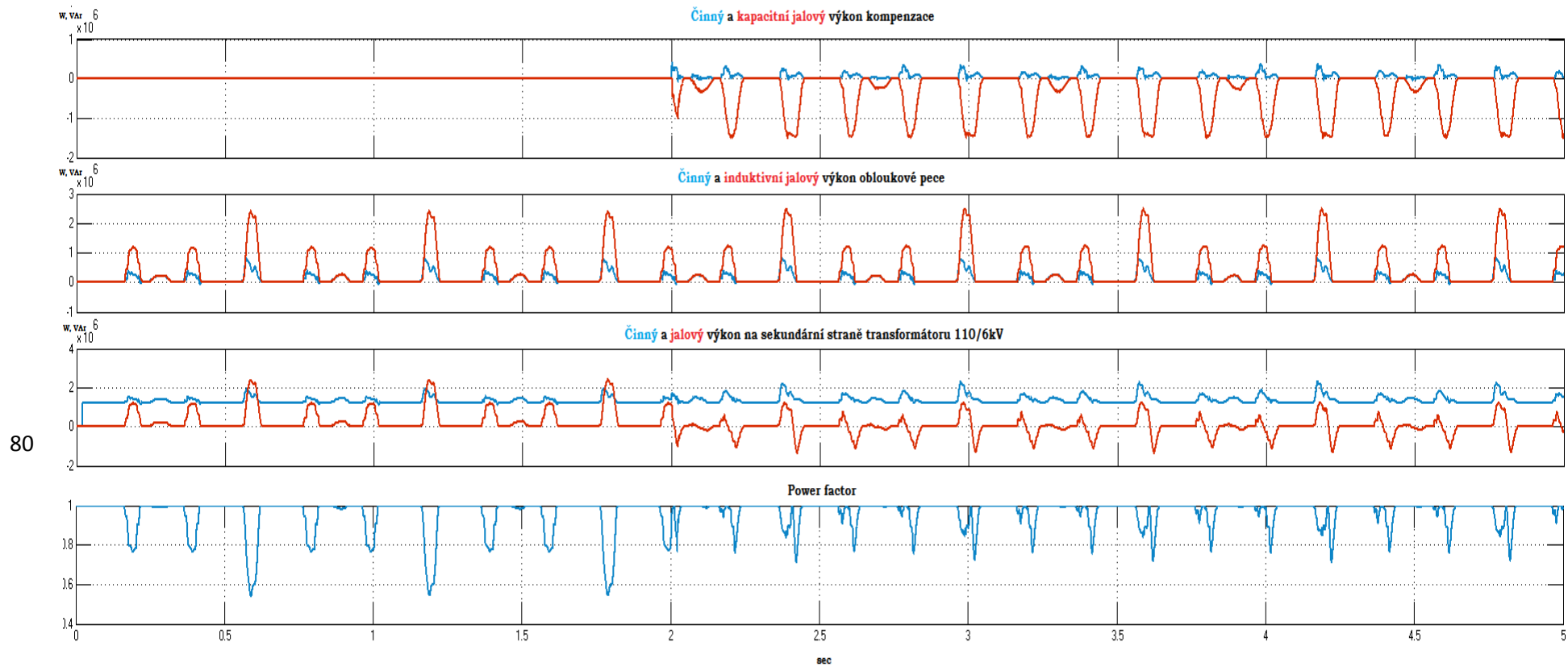
Z výsledných hodnot je vidět, že příznivý vliv kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu v síti se projevuje především při natavování vsázky, kdy se často mění délka oblouku a následně proud obloukovou pecí. Při těchto změnách umožňuje kompenzace s rychlým spínáním kompenzačních stupňů skoro okamžitě reagovat na změnu velikosti jalového výkonu pece a jeho vykompenzováním tak snížit úbytky napětí a úroveň flicker efektu. Kromě snížení úrovně flicker efektu dojde také k zlepšení účinníku

sítě, a tak se provozovatel vyhne pokutám ze strany dodavatele elektrické energie za nedodržení účinníku v rozmezí 0,95 až 1 (induktivní charakter odběru). V reálné síti pro kterou byla kompenzace navrhována se nachází další odběry činného a jalového výkonu, a tak by se účinník při provozu kompenzace pohyboval v rozmezí hodnot 0,95 – 1.

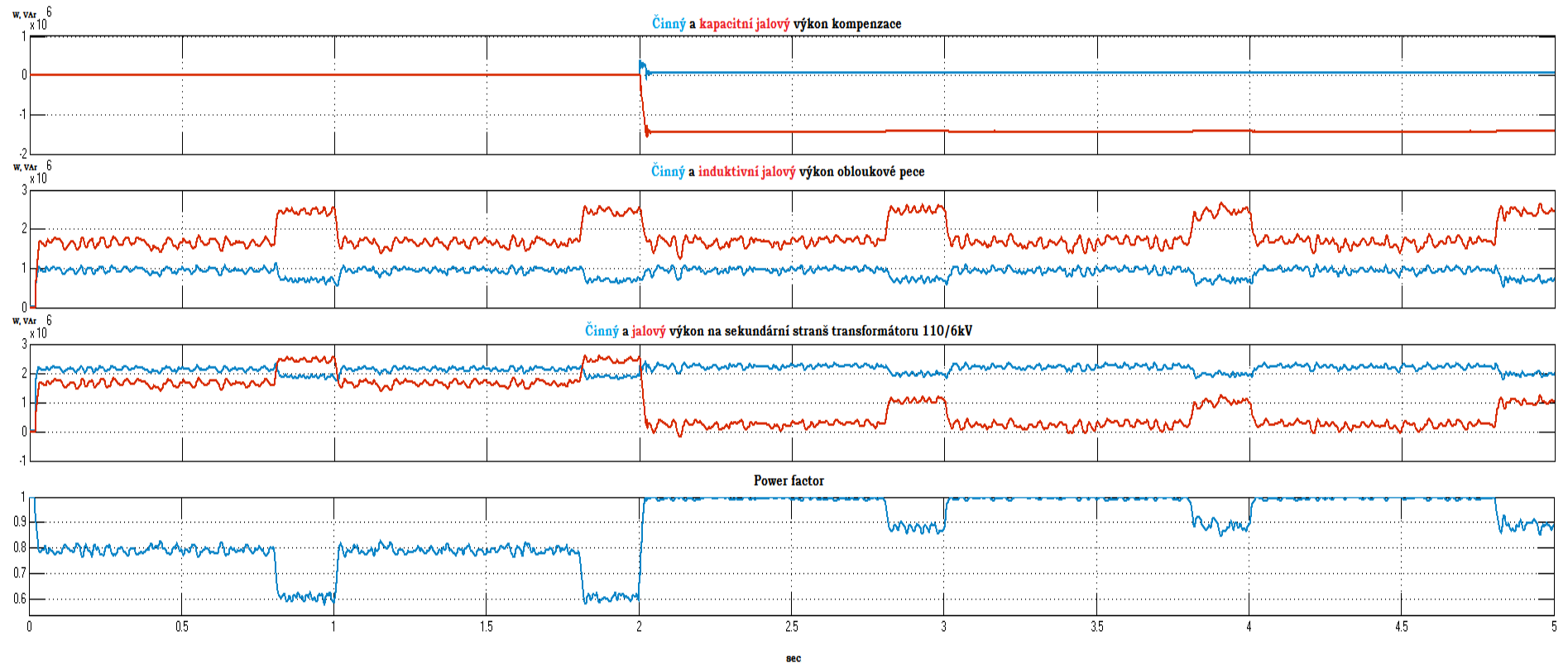
Při ustálené tabbě už nedochází k tak častým a velkým změnám délky oblouku a velikosti proudu obloukové pece. Díky tomu se výrazně sníží úroveň flicker efektu v síti. V této fázi tabby už má kompenzace malý vliv na změnu hodnoty flicker efektu a slouží především ke kompenzaci účinníku sítě.

Z matematického modelu vyplývá, že hodnota flicker efektu při natavování vsázky klesla na straně VN 6kV z 5,3 bez kompenzace na hodnotu 4,4 s kompenzací. I tato hodnota nevyhovuje normě ČSN EN 61000-3-3 ed.3, která požaduje úroveň flicker efektu $P_{ST} \leq 1$, ale v reálném provozu může být situace odlišná a vliv kompenzace na úroveň flicker efektu větší. Power factor, tedy účinník spočítaný z celkového jalového výkonu včetně harmonických a meziharmonických, se zlepšil z hodnoty mezi 0,55 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.15 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). Při ustálené tabbě se úroveň flicker efektu skoro nezměnila. Power factor se z hodnoty mezi 0,6 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.16 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). V síti s obloukovou pecí se v reálném provozu nachází další odběry činné a jalové energie, a tak by se účinník s použitím kompenzace pohyboval zase okolo hodnoty mezi 0,95 a 1.

V matematickém modelu kompenzace zvládne kompenzovat účinník pouze při hodnotě jalového výkonu nad 50 kVAr, ale v reálném provozu je hodnota odběru činného a jalového výkonu i při vypnuté obloukové peci dostatečně velká na to, aby první stupeň kompenzace 50 kVAr vyhověl požadavku na to, aby se účinník pohyboval v dovolených mezích.



Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky



Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavně

6. Závěr

Cílem této práce bylo především prezentovat parametry pro posouzení kvality elektrické sítě a to konkrétně v síti s elektrickou obloukovou pecí. Parametry pro posouzení kvality sítě vycházejí z platných zákonů a norem České republiky. Dále jsem se pokusil poukázat na problémy, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece v síti. Především jsem se zaměřil na zhoršení úrovně flicker efektu a zhoršení účinníku v síti s obloukovou pecí. Samozřejmě, že tyto dva parametry nejsou jediné, které se při provozu pece zhorší. Dále by se šlo zabývat zvýšením hodnoty harmonických, nesymetrickým zatížení sítě, atd. .

Tato práce mi posloužila k hlubšímu porozumění parametrů, které slouží pro posouzení kvality elektrické sítě a to především se spojitostí s elektrickou obloukovou pecí. Jelikož se touto tématikou zabývám i ve svém zaměstnání, snažil jsem si vybrat pro svůj návrh zlepšení kvality elektrické energie reálnou aplikaci, pro kterou jsem navrhl kompenzační zařízení. Bohužel však do dnešního dne nedošlo k instalaci kompenzačního rozváděče a tak jsem nemohl ověřit reálný pozitivní přínos kompenzace na síť s obloukovou pecí. Z těchto důvodů byl pro posouzení přínosu kompenzace použit matematický model obloukové pece. Matematický model jsem se snažil co nejvíce přiblížit reálným parametrům pece v závodě Metalurgie Chrudim, ale i tak se model od reálné pece v různých parametrech liší. I přes tyto rozdíly se ale prokázal pozitivní přínos kompenzace na zlepšení úrovně flicker efektu a účinníku v síti s obloukovou pecí. Doufám, že v budoucnosti bude možnost ověřit výsledky této práce i na reálném zařízení.

Seznam použité literatury

[1] ČSN EN 50160

[2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. Voltage quality in electrical power systems. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755

[3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

[4] TLUSTÝ, J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999

[5] ČSN EN 61000-3-3 ed. 3

[6] PNE 33 3430-1

[7] PNE 33 3430-4

[8] CHAPMAN, David. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Příčiny a účinky. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[9] FASSBINDER, Stefan. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Kondenzátory v prostředích s vyšším obsahem harmonických. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-2-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[10] TAVAKOLI Abdolreza, Mehdi EHSAN a Seyed Mohammad Tagie BATAHIEE. A SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Inactive Power Compensation by Using STATCOM. Journal of Applied Mathematics: Islamic Azad University of Lahijan. 2006, vol. 3, no.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

ZLEPŠENÍ KVALITY ELEKTRICKÉ ENERGIE V SÍTI S ELEKTRICKOU OBLOUKOVOU PECÍ

IMPROVING POWER QUALITY IN THE NETWORK WITH AN ELECTRIC ARC FURNACE

DAVID SEGETH

Vedoucí práce: Čerňan Martin Ing.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Květen 2015

Poděkování

Tato práce je vyústěním celého mého studia na Českém vysokém učení technickém v Praze a mého zájmu o danou problematiku.

Při psaní této práce jsem zejména ocenil pomoc a podporu pana inženýra Čerňana, který mi byl oporou nejenom po stránce poskytování informací k práci, ale také chci srdečně poděkovat za jeho vedení.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kolegům v práci za jejich pevné nervy a všestrannou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Bílé Vodě dne 5. května 2015

Anotace:

Práce se zabývá problematikou kvality elektrické energie v sítích s obloukovými pecemi. Především se jedná o problémy s vysokou hladinou flicker efektu a s kompenzací odběru jalového výkonu. V první části práce jsou popsány požadavky na kvalitu elektrické energie, které stanovuje zákon č. 458/2000 Sb. a související vyhlášky a normy. Další část práce je zaměřena na popis problémů, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece na síť. Poslední část práce se zabývá prostředky, které lze použít pro zlepšení kvality elektrické energie v závodě slévárny Metalurgie s.r.o. Chrudim.

Annotation:

This work deals with the quality of the electricity network with arc furnaces. Above all it is a problem with a high level of flicker effect and with power factor correction. In the first part there is described the requirements for power quality, which are set by law no. 458/2000 Coll. and related regulations and standards. Another part is focused on the description of the problems that caused the operation of electric arc furnac. The last part deals with resources that can be used to improve the quality of electricity in the plant foundry Metallurgy Ltd. Chrudim.

Obsah

1 Úvod.....	14
2 Parametry pro posouzení kvality elektrické energie.....	15
2.1 Velikost napájecího napětí.....	15
2.1.1 <i>Definice a původ úbytků napětí.....</i>	<i>15</i>
2.1.2 <i>Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance.....</i>	<i>16</i>
2.1.3 <i>Definice poklesu napětí.....</i>	<i>17</i>
2.1.4 <i>Původ poklesu napětí a přepětí.....</i>	<i>17</i>
2.2 Harmonické zkreslení.....	18
2.2.1 <i>Původ vyšších harmonických.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Matematické vzorce pro vyšší harmonické.....</i>	<i>19</i>
2.2.3 <i>Fourierova transformace.....</i>	<i>22</i>
2.2.4 <i>Harmonické a jejich šíření v síti.....</i>	<i>23</i>
2.2.5 <i>Zdroje vyšších harmonických napětí.....</i>	<i>25</i>
2.2.6 <i>Zdroje vyšších harmonických proudů.....</i>	<i>25</i>
2.2.7 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy.....</i>	<i>27</i>
2.2.8 <i>Problémy způsobené harmonickými napětími.....</i>	<i>30</i>
2.2.9 <i>Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti.....</i>	<i>32</i>
2.2.10 <i>Mezní hodnoty vyšších harmonických.....</i>	<i>32</i>
2.2.11 <i>Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických.....</i>	<i>37</i>
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt.....	39

2.3.1	<i>Příčiny kolísání napětí.....</i>	40
2.3.2	<i>Účinky kolísání napětí na světelné zdroje.....</i>	40
3.	Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece.....	42
3.1	Elektrický oblouk.....	42
3.1.1	<i>Stejnoseměrný elektrický oblouk.....</i>	44
3.1.2	<i>Střídavý elektrický oblouk.....</i>	45
3.2	Elektrické obloukové pece.....	46
3.2.1	<i>Pece s přímým obloukem.....</i>	46
3.2.2	<i>Pece s vodivým dnem.....</i>	47
3.2.3	<i>Pece s nevodivým dnem.....</i>	48
3.2.4	<i>Pece s nepřímým obloukem.....</i>	48
3.2.5	<i>Pece se zakrytým obloukem.....</i>	49
3.3	Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece.....	50
3.3.1	<i>Napájecí síť obloukové pece.....</i>	52
3.3.2	<i>Pecní transformátor.....</i>	52
3.3.3	<i>Krátká cesta.....</i>	52
3.3.4	<i>Elektrody obloukových pecí.....</i>	55
3.4	Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí.....	56
3.4.1	<i>První typ změn proudového zatížení.....</i>	56
3.4.2	<i>Druhý typ změn proudového zatížení</i>	56
3.4.3	<i>Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn.....</i>	56
3.5	Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť.....	58

3.5.1 Omezení zkratových a velkých proudů.....	58
3.5.2 Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení.....	58
3.5.3 Nepřímá kompenzace.....	58
3.5.4 Přímá kompenzace.....	59
3.5.5 Sério-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece.....	60
4. Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie, s.r.o.	63
4.1 Naměřené průběhy ve “Slévárně TS2” v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim.....	63
4.2 Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim.....	70
5. Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece	75
5.1 Matematický model obloukové pece.....	75
5.2 Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě.....	76
6. Závěr.....	80
Seznam použité literatury.....	81

Seznam obrázků

Obr. č. 2.1 Definice poklesu napětí a přepětí.....	17
Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických.....	21
Obr. č. 2.3 3. a 5. harmonická proud.....	24
Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla.....	26
Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku	27
Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči.....	28
Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor.....	30
Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže.....	31
Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže.....	32
Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě.....	40
Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě.....	41
Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky.....	42
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku.....	43
Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích	44
Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk.....	44
Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem.....	45
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností.....	46
Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem.....	47
Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem.....	47
Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem.....	48
Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem.....	49
Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem.....	49
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí.....	50
Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť.....	51
Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece.....	53
Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty.....	54

Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace.....	59
Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem.....	59
Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem	59
Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece.....	60
Obr. č. 3.20 Vektorový diagram sério-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece	61
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1.....	64
Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2.....	64
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1.....	65
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází	65
Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází	66
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1.....	66
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN	67
Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN	68
Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické.....	71
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické.....	71
Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů.....	72
Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2.....	74
Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky	78
Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavně.....	79

Seznam tabulek

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn	33
Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn	37
Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče	73
Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty.....	76

1. Úvod

Elektrická energie jakožto spotřební zboží musí podléhat mnoha parametrům, tak aby bylo možno posuzovat její kvalitu. V dřívějších dobách nám pro posouzení kvality elektrické energie stačily pouze dva základní ukazatele. Tím prvním je velikost napětí sítě a kmitočet. Postupem času se, ale díky masivnímu rozvoji v elektrotechnice a elektronice tyto dva základní parametry ukazují jako nedostatečné pro objektivní posouzení parametrů sítě. Postupem času díky ekologickým a hospodářským tlakům došlo k masivnějšímu rozšíření elektrických zařízení s úsporným provozem. Většina těchto zařízení má nelineární nebo proměnlivé provozní charakteristiky. S tímto vývojem jsou pak spjaty stále více se projevující zpětné vlivy na síť. Tyto zpětné vlivy pak následně mohou za určitých podmínek negativně ovlivňovat provoz jiných elektrických zařízení.

Kvalita elektrické energie je v poslední době velice diskutovaným tématem a to jak z energetických tak ekonomických důvodů. Z energetického pohledu jde převážně o dodržení dodávek elektrické energie odpovídajících parametrů a o dodržení směrnic o elektromagnetické kompatibilitě. Ekonomický dopad je pak dán hlavně nevhodným technickým řešením, které se následně projeví, jako zvýšení ztrát, přerušení dodávky nebo sankcí za porušení smluvních dohod.

Rostoucí úroveň energetického rušení je úzce spjatá s nárůstem moderních spotřebičů u odběratelů. V dřívějších dobách se u odběratelů nevyskytovali spotřebiče jako frekvenční měniče, spínané zdroje apod. a u odběratelů se většinou nacházely pouze asynchronní motory a spotřebiče s odporovým charakterem. Tento typ spotřebičů vyžadoval pouze paralelní kompenzaci odběru jalového výkonu. Pro paralelní kompenzaci se v dnešní době převážně využívají kompenzační kondenzátory. Tento typ kompenzace je v dnešní době stále hojně využíván, avšak s nárůstem energetického rušení už není v některých případech možné připojit pouze kompenzační kondenzátory, ale je nutné tyto kondenzátory chránit před účinky rušení sítě.

Tato práce práci se zabývá především kompenzací jalového odběru a úrovní flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí.

2. Parametry pro posouzení kvality elektrické energie

Dodávky elektrické energie se řídí dle PPDS (Pravidel provozování distribučních soustav), které vychází ze zákona č. 458/2000 Sb. a z vyhlášky č. 540/2005 Sb. Pro technické posouzení kvality elektrické energie se práce bude zabývat pouze těmi ukazateli, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160 a v PNE 33 3430. Norma ČSN EN 50160 uvádí hlavní parametry elektrické energie v místech připojení odběratelů z veřejné distribuční sítě. Tato norma platí jak pro síť NN tak i pro síť VN. Mezi tyto ukazatele patří:

- Velikost napájecího napětí (poklesy napětí a přepětí)
- Harmonické zkreslení
- Rychlé změny napětí (flicker efekt)
- Symetrie třífázového napětí

Podrobněji budu jednotlivé z těchto ukazatelů popisovat dále.

2.1 Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dle normy ČSN EN 50160 definována pro společný napájecí bod (PCC). Úbytky napětí jsou závislé na velikosti protékajícího proudu a na vzdálenosti spotřebitele. Tyto úbytky se se u různých spotřebitelů liší a mění se v závislosti na čase. Distribuční síť musí udržet napětí v rozmezí $U_n \pm 10\%$ a to bez ohledu na odběr spotřebitele.

2.1.1 Definice a původ úbytků napětí

Rozdíl mezi napětím ve společném napájecím bodě U_1 a napětím v místě odběru U můžeme definovat následujícím vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U \quad (2.1)$$

nebo v procentech

$$\Delta U_{\%} = \left[\frac{U_1 - U}{U_n} \right] * 100 \quad (2.2)$$

kde U_1 , U a U_n jsou absolutní hodnoty fázorů fázového napětí.

Dále může být úbytek napětí definován následovně (při zanedbání činného úbytku na reaktanci a jalového úbytku na odporu):

$$\Delta U = I_c R_s + I_j X_s \quad (2.3)$$

kde R_s a X_s je činná a induktivní část síťové impedance, I_c a I_j je činná a jalová (předpokládá se induktivní) část odběrového proudu. Pro výpočet úbytku napětí pro základní harmonickou by měla být brána v úvahu:

- pro jednofázové odběry impedance smyčky Z_f (impedance fázového vodiče) + Z_n (impedance středního vodiče)
- pro symetrické trojfázové odběry impedance Z_f

V normě ČSN EN 61000-3-1 se uvádí, že pro spotřebitelskou síť o frekvenci 50Hz mají být použity tyto impedance:

Impedance fázového vodiče:

$$Z_f = 0,24 + j0,15 \Omega \quad (2.4)$$

Impedance středního vodiče :

$$Z_n = 0,16 + j0,1 \Omega \quad (2.5)$$

Impedance související s úbytkem napětí se skládá ze dvou částí, a to induktivní části, která je dána zejména rozptylovou indukčností transformátoru a odporovou částí, kterou tvoří zejména odpor vodiče nízkého napětí. Vzhledem k poměru velikostí obou částí impedance je možné v síti nízkého napětí uvažovat, že pokles napětí mezi napájecím bodem sítě a spotřebitelem odpovídá ztrátám na odporu vedení ($\Delta U \approx RI^2$)

2.1.2 Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance

Pokud se napětí sítě bude pohybovat mimo vymezené tolerance může to způsobovat u spotřebitelů značné problémy:

vyšší než dovolené napětí

Pokud je hodnota napětí vyšší než dovolená bude to u spotřebitele způsobovat zkracování životnosti zařízení (např. žárovky) a bude docházet ke zkracování životnosti izolace. Dále se také zvýší ztráty a výrazně vzroste poruchovost zařízení.

nižší než dovolené

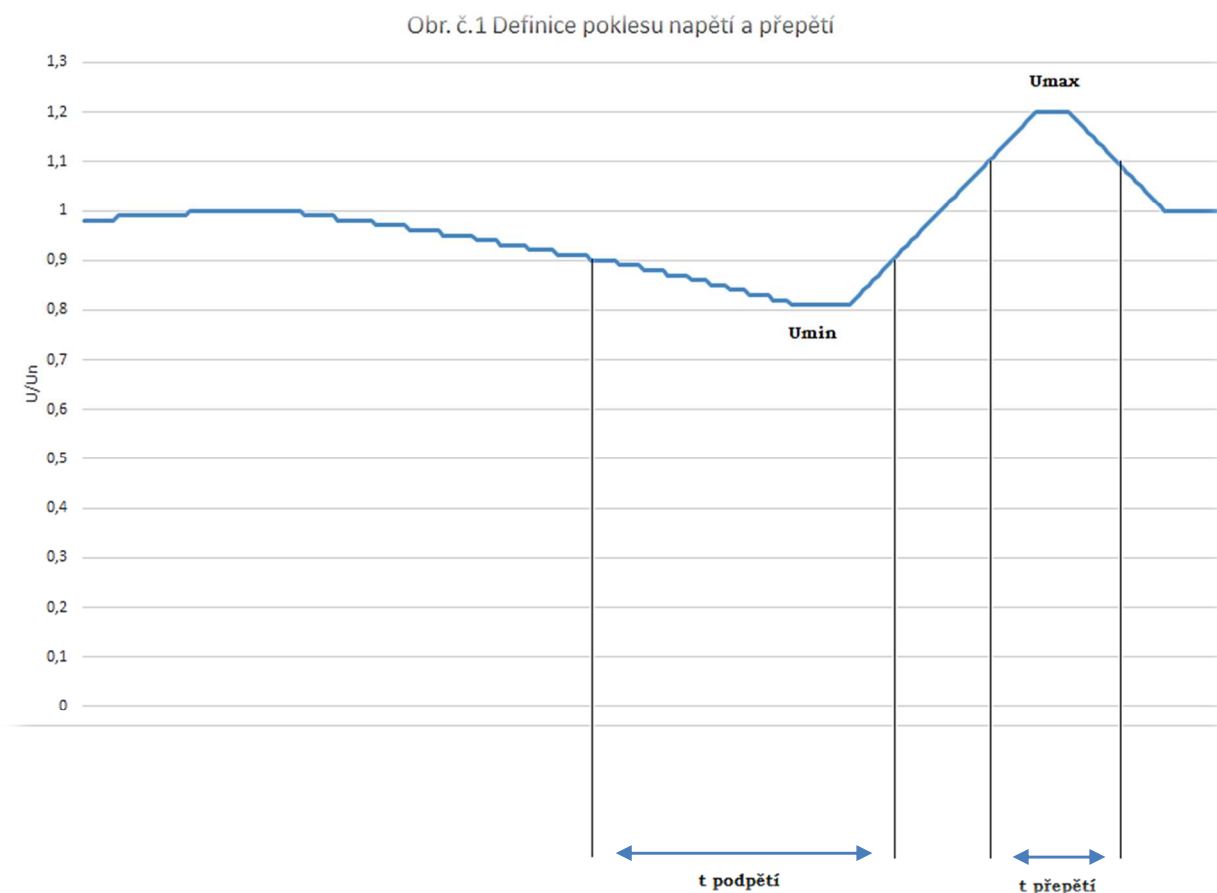
Pokud je hodnota napětí nižší než dovolená způsobí to pokles výkonu zařízení a to pak nedokáže udržet jmenovité parametry. Při dalším poklesu napětí se může začít projevovat nefunkčnost různých typů zařízení, nebo dokonce nemožnost jejich zapnutí.

2.1.3 Definice poklesu napětí

Změny napětí jsou definovány pomocí efektivní hodnoty napětí. Dle normy ČSN EN 61000-3-3 je změna napětí charakterizována těmito ukazateli:

- Trvání napěťového poklesu
- Nejmenší poměrné napětí v době poklesu napětí
- Trvání přepětí
- Poměrné napětí v době přepětí

Definice těchto ukazatelů je uvedena na obrázku č. 2.1



Obr. č.2.1 Definice poklesu napětí a přepětí

2.1.4 Původ poklesu napětí a přepětí

V běžném provozu se napětí pohybuje ve stanovených mezích. Dle specifikací uvedených v normě ČSN EN 50160 je měřené napětí v průběhu jakéhokoliv týdne v roce dáno 95% statistickou hodnotou zprůměrovaných 10 minutových měření hodnot efektivních hodnot napětí. Tato hodnota se pak musí pohybovat v mezích daných touto normou. V případě zbývajících 5% neexistuje žádné nařízení. To ale neznamená, že se napětí může pohybovat v libovolných mezích.

Původy poklesu napětí a přepětí se dají rozdělit na dva typy:

- Vytvářené nebo ovlivněné spotřebiteli
- Způsobené chybami sítě

Mezi první typ patří například náhlé odlehčení sítě po odepnutí zařízení většího výkonu. Mezi druhý typ patří například chyby způsobené zkratem nebo nedostatečně rychlým řízením elektrického systému (pomalé reakce na aktuální zatížení sítě).

Dále se tyto poklesy a přepětí dají rozdělit dle doby trvání:

- Krátké
- Dlouhé

Krátké poklesy nebo přerušení napětí mohou být eliminovány správným nastavením ochran a použitím záložních zdrojů UPS.

Dlouhé poklesy napětí se nazývají výpadky a jsou většinou způsobeny poruchami na vedení nebo u zdroje.

2.2 Harmonické zkreslení

V distribučních a průmyslových sítích se v dnešní době nevyskytují čistě sinusové průběhy napětí a proudu s frekvencí 50 Hz. Stále častěji se v sítích objevují i celé násobky základní harmonické (50 Hz) a těm říkáme vyšší harmonické. Zdrojem těchto vyšších harmonických jsou zařízení s nesinusovými proudy. Tyto zařízení lze rozdělit do dvou skupin:

- Elektrická zařízení s obsahem polovodičových prvků. Mezi tyto prvky patří například: usměrňovače, motory s frekvenčním měničem, pulzní zdroje, stmívače, apod.
- Elektrická zařízení, která ze svého principu funkce odebírají ze sítě nesinusové proudy a vykazují nelineární voltampérové charakteristiky. Mezi ně patří: středofrekvenční a obloukové pece, plynové výbojky, zářivky, indukčnosti, apod.

2.2.1 Původ vyšších harmonických

Překročení napětí, vyšší harmonické, přes hodnotu odolnosti proti rušení, se u připojeného zařízení, projeví následujícími způsoby:

- Snížení životnosti a tím způsobenými předčasnými výpadky zařízení citlivými na tepelné přetížení, jako jsou kondenzátory a motory
- Poruchami funkce elektronických zařízení
- Chybou funkcí ochran
- Nesprávnou funkcí přijímačů HDO (Hromadné dálkové ovládání).
- Nepříznivé ovlivnění zhášení oblouku zemních spojení díky vyšším harmonickým

Z výše uvedených důvodů musí provozovatel distribuční sítě nucen dbát, aby napětí vyšších harmonických nepřekračovala stanovené meze.

Účinky vyšších harmonických se ještě násobí díky skinefektu. Činné odpory vodičů i vinutí strojů vzrůstají a tím rostou i jejich ztráty. Odpor roste rychleji u vícevrstvých vinutí (např. u transformátorů). Vodiče a vinutí strojů navržené na 50 Hz, často nevyhoví z hlediska ztrát od vyšších harmonických. Pokud se v síti vyskytnou proudy vyšších harmonických, vznikají ve vodičích přídavné činné ztráty. Tyto ztráty způsobené vyššími harmonickými se snažíme omezit na minimum a co nejlépe u zdroje těchto harmonických. Snížení podílu vyšších harmonických se provádí výměnou samotného zařízení (s jinou konstrukcí nebo jiným principem funkce) pokud je to možné po technické nebo ekonomické stránce, nebo filtrací vyšších harmonických pomocí filtrů.

2.2.2 Matematické vzorce pro vyšší harmonické

Nesinusové průběhy proudu a napětí se rozkládají na řadu sinusových průběhů pomocí Fourierova teorému. Napětí a proud je popsán dle vztahů (2.6) a (2.7).

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \quad [V] \quad (2.6)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^q I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{I,n}) \quad [A] \quad (2.7)$$

Efektivní hodnotu napětí určíme dle rovnice (2.8) vycházející z rovnice (2.6)

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^q U_n^2} \quad [V] \quad (2.8)$$

U_n pro $n = 1, 2, 3, \dots$ jsou efektivní hodnoty napětí jednotlivých harmonických

Následně podobně určíme rovnici pro efektivní hodnotu proudu (2.9), která vychází z rovnice (2.7)

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^q I_n^2} \quad [A] \quad (2.9)$$

pro $n = 1, 2, 3, \dots$

obsah základní harmonické (1. harmonické)

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{I} \quad [-] \quad (2.10)$$

nebo

$$g = \frac{I_1}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.11)$$

obsah vyšších harmonických proudů

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad [-] \quad (2.12)$$

nebo

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.13)$$

obdobné vztahy platí pro napětí.

Dle současných norem se pro posouzení celkového harmonického zkreslení používají koeficient zkreslení proudu k_{ZI} a koeficient zkreslení napětí k_{ZU} nebo častěji používaná zkratka THD (Total Harmonic Distorsion). Tyto koeficienty se určí z rovnic (2.14) a (2.15).

$$k_{ZI} = THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} * 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

$$k_{ZU} = THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U} * 100 \quad [\%] \quad (2.15)$$

Vztahy pro výkony:

Obecně platí pro střední hodnotu činného výkonu střídavého proudu rovnice (2.16)

$$P = \int_0^T u(t) * i(t) * dt \quad (2.16)$$

Po dosazení do rovnice (2.16) za $u(t)$ a $i(t)$ a při použití ortogonality goniometrických funkcí pro činný výkon platí rovnice (2.17).

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.17)$$

$$\text{Kde} \quad \varphi_n = \varphi_{U,n} - \varphi_{I,n}$$

Tedy

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 + P_1 + P_2 + \dots \quad (2.18)$$

Z rovnice (2.18) vyplývá, že střední hodnota výkonu obecně střídavého proudu se rovná součtu středních hodnot výkonů jednotlivých harmonických. To znamená, že napětí a proud dvou různých kmitočtů nedávají trvale žádný výkon.

Střední hodnota jalového výkonu je definována analogicky jako součet středních hodnot jalových výkonů jednotlivých harmonických:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.19)$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu je definována jako součin efektivních hodnot proudu a napětí:

$$S = U * I = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)} \quad (2.20)$$

Poměr činného a zdánlivého výkonu označujeme jako činitel výkonu, případně jako opravdový účinník:

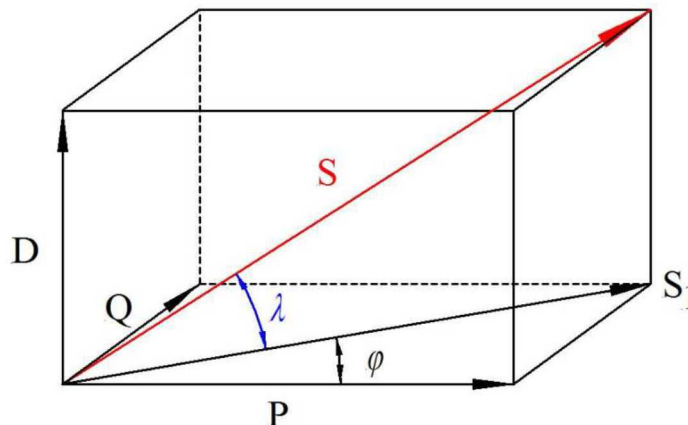
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n}{\sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)}} \quad (2.21)$$

Pro zdánlivý výkon také platí:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.22)$$

Kde D je tzv. deformační výkon, který je produktem efektivních hodnot harmonických různého řádu včetně jejich součinů se stejnosměrnými složkami napětí a proudu. Deformační výkon způsobuje, že není-li mezi harmonickými proudy a napětí fázový posuv, je přesto činitel výkonu $\lambda < 1$.

Geometricky lze vztahy mezi činným, jalovým, zdánlivým a deformačním výkonem vyjádřit pomocí obrázku č. 2.2.



Obr. č. 2.2 Znárodnění zdánlivého výkonu v síti s výskytem vyšších harmonických [4]

2.2.3 Fourierova transformace

Analytická metoda

Rozklad libovolné periodické funkce na konečnou nebo nekonečnou řadu harmonických funkcí řeší harmonická analýza na základě tzv. Fourierova teorému.

Periodická funkce $f(v)$, kterou budeme dále analyzovat, musí splňovat Dirichletovy podmínky:

1. funkce $f(v)$ je v konečném počtu intervalů spojitá a monotónní
2. má konečný počet extrémů

Řadu vzniklou rozkladem periodické funkce nazýváme Fourierovou řadou. Jejimi členy jsou jednotlivé harmonické. Dále budeme používat trigonometrické vyjádření Fourierovy řady.

Podle Fourierova teorému je možné periodickou funkci rozložit v řadu:

$$f(\vartheta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega_1 t) + B_n \sin(n\omega_1 t)) \quad (2.23)$$

$$f(v) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2.24)$$

kde nové konstanty řady pro n-tou harmonickou jsou:

$$A_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \cos(n\omega_1 t) dt \quad (2.25)$$

pro $n=0, 1, 2, \dots$

$$B_n = \frac{2}{T_1} * \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(\vartheta) \sin(n\omega_1 t) dt \quad (2.26)$$

pro $n=1, 2, \dots$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.27)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (2.28)$$

Numerická metoda

Numerické metody harmonické analýzy nahrazují integrály rovnice přibližnými součty (numerická integrace), které lze pro různé případy upravit. Pro výpočet koeficientů Fourierovy řady periodického signálu můžeme rovněž vyjít z klasické definice diskrétní Fourierovy transformace:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT)e^{-jn\omega T} \quad (2.29)$$

kde:	T	je vzdálenost mezi vzorky
	K	je počet vzorků za periodu
	$T_1=T \cdot K$	je délka periody
	S(kT)	je hodnota vzorku

Po úpravách dostaneme:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right] \quad (2.30)$$

Při porovnání se vztahem dostaneme:

$$\hat{c} = \frac{\hat{S}(n\omega_1)}{K} \quad \hat{C}_n = 2\hat{c} \quad C_0 = \frac{S_0}{K} \quad (2.31)$$

$$\hat{C}_n = \operatorname{Re}\{\hat{C}_n\} + j\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\} \quad (2.32)$$

$$C_n = \sqrt{(\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\})^2 + (\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\})^2} \quad (2.33)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\}}{\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\}} \quad (2.34)$$

2.2.4 Harmonické a jejich šíření v síti

V trojfázovém systému jsou harmonické ve třech fázích, ale s frekvencí odpovídající jejich řádu. Harmonické mohou být reprezentovány fázory v kruhovém diagramu, stejně jako fázory základní harmonické, a jejich fázový posun je definován symetrickými složkami. Obecně pro k-tou harmonickou platí rovnice (2.35).

$$I_k^b = I_k^a e^{-jk120^\circ} \quad a \quad I_k^c = I_k^a e^{-jk240^\circ} \quad (2.35)$$

Souměrný trojfázový systém sousledné, zpětné a netočivé (nulové) složky je následující:

Netočivá harmonická složka:

$$k = 3n \quad (2.36)$$

Sousledná harmonická složka:

$$k = 3n + 1 \quad (2.37)$$

Zpětná harmonická složka:

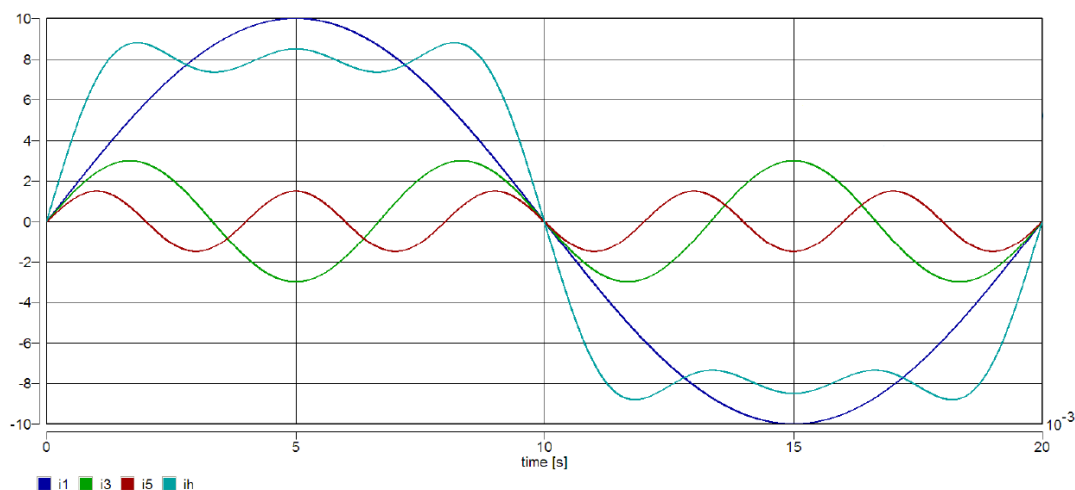
$$k = 3n - 1 \quad (2.38)$$

Kde:

k je řád harmonické

n=1, 2, 3, ...

Z předešlého vyplývá, že třetí harmonické proudy se přidávají k netočivým složkám proudu, příspěvek proudu ve střední vodiči tedy potom odpovídá trojnásobku proudu třetí harmonické. Pokud je amplituda třetí harmonické proudu téměř rovna amplitudě základní harmonické, potom ve středním vodiči trojfázového systému poteče okolo dvoj až trojnásobku proudu fázového vodiči. V případě symetrické zátěže přispívá pátá harmonická do zpětné složky proudu. Středním vodičem tedy tečou pouze asymetrické složky proudu – ty, které přispívají do netočivé složky harmonických proudů, můžeme harmonické proudy generované nelineární zátěží sčítat také v asymetrickém případě. Jednotlivé harmonické proudy zátěží lze počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů zátěží potom vede k výsledkům pro každou větev a vektorový součet proudů jednotlivých větví dává výsledný proud transformátoru.



Obr. 2.3 3. a 5. harmonická proudu [4]

2.2.5 Zdroje vyšších harmonických napětí

Alternátory

Vznik vyšších harmonických je dán drážkováním ve statoru a lze jej omezit použitím zlomkového vinutí. Druhým důvodem vzniku vyšších harmonických je nesinusové rozdělení magnetického pole v rotoru, zapříčiněné drážkami v rotoru turboalternátorů, resp. Vyniklými póly u hydroalternátorů.

Asynchronní motory

Vyšší harmonické zde vznikají vlivem drážkování statoru a rotoru. Zlomkové vinutí nepřináší požadované snížení vyšších harmonických. Možným opatřením je použití sešikmení drážek.

2.2.6 Zdroje vyšších harmonických proudů

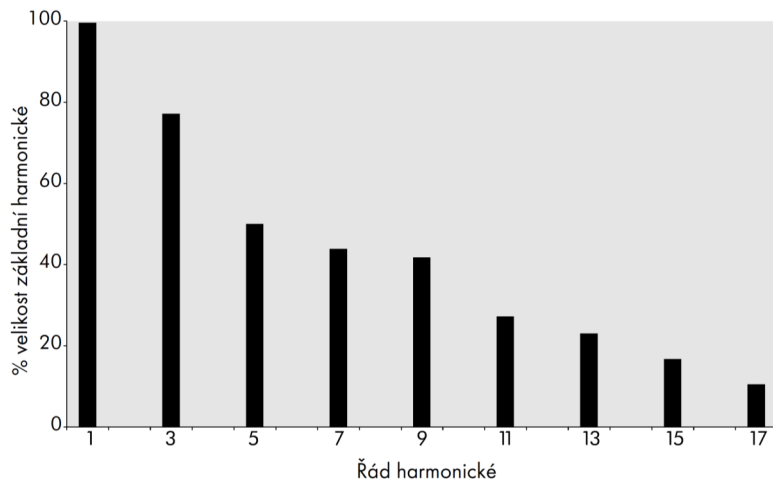
Korona

Korona je zdrojem 5. a 7. harmonické a v případě uzemněného uzlu 3. a 9. harmonického proudu.

Zářivky, plynové výbojky a domácí spotřebiče

Problematiku rušení těchto spotřebičů řeší ČSN EN 61000-3-2. V této normě stanoveny jak všeobecné požadavky a mezní hodnoty pro zařízení, ale také praktické metody typových zkoušek. Norma pokrývá oblast spotřebičů 50 Hz a napětí 230/400V způsobující generaci harmonických nízkých řádů do 40. harmonické.

Elektronické předřadníky svítidel se v posledních letech staly velmi populárními, protože se díky nim vylepšila účinnost svítidel. Jejich největší nevýhodou je, že generují harmonické v odebíraném proudu. Typy s kompenzací účinníku jsou díky své vysoké ceně dostupné pouze pro výkonově větší svítidla. Malé jednotky jsou většinou bez kompenzace. Typické spektrum kompaktního svítidla ukazuje obr. č. 2.4



Obr. č. 2.4 Spektrum vyšších harmonických kompaktního svítidla [8]

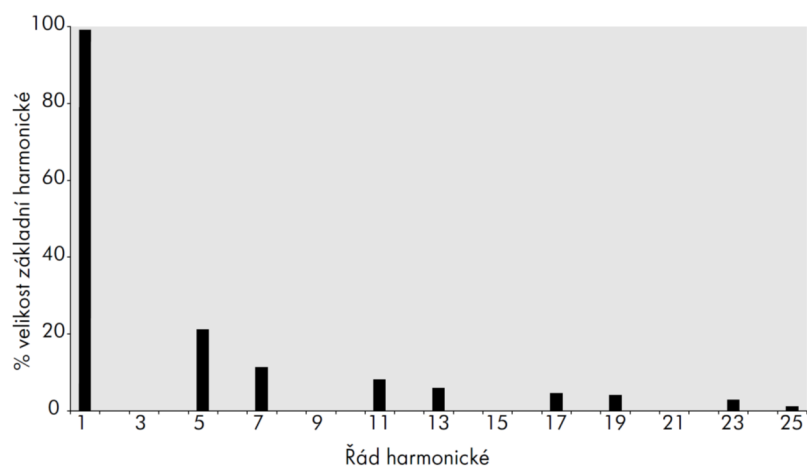
Transformátory

U transformátorů je vznik vyšších harmonických způsoben nelineární charakteristikou magnetizačního proudu a toku.

Usměrňovače a měniče

Elektronické regulátory otáček, UPS jednotky a usměrňovače jsou obecně založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako tzv. šestipulsní můstek, protože se zde vyskytuje 6 pulsů za jednu periodu na jeho stejnosměrném výstupu.

Šestipulsní můstek generuje harmonické v řádu $6n \pm 1$, tzv. v řádu o jeden vyšší a o jeden nižší než je šestinásobek základní harmonické. Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické, takže může být 20% páté harmonické a 9% jedenácté harmonické, atd. Typické spektrum šestipulsního můstku je na obr. č. 2.5.



Obr. č. 2.5 Spektrum šestipulsního můstku [8]

Velikost harmonických se výrazně redukuje použitím vícepulsních můstků jako je například 12-ti pulsni můstek, jehož napájení je z transformátorového vinutím zapojeného hvězda/trojúhelník s 30-ti stupňovým fázovým posuvem mezi těmito vinutími.

Teoreticky jsou u tohoto můstku harmonické řádu $6n$ odstraněny, ale v praxi hodnota jejich omezení závisí na „přizpůsobení“ střídače, které je často s faktorem mezi 20 a 50. Harmonické řádu $12n$ zůstávají nezměněny. Při tomto zapojení není redukován jen celkový harmonický proud, ale zůstávají pouze harmonické proudy vyšších řádů, pro které je návrh filtru mnohem snadnější.

Často jsou kroky k omezení vyšších harmonických již provedeny od výrobce např. přidáním filtrů nebo sériových indukčností.

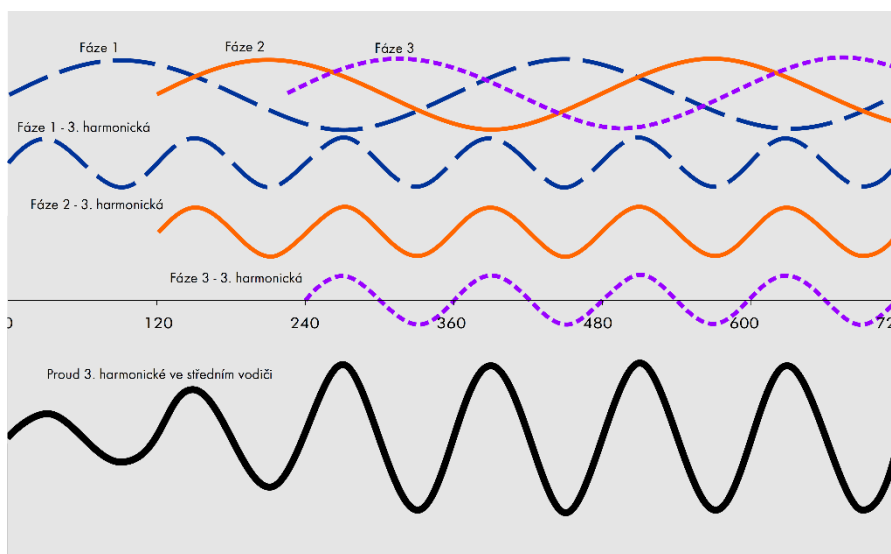
Další zvýšení počtu pulsů na 24 dosáhneme použitím dvou paralelních 12-ti pulsních jednotek s fázovým posuvem 15 stupňů. Toto řešení vede k omezení vyšších harmonických o cca 4,5%.

2.2.7 Problémy způsobené harmonickými proudy

Přetížení (přehřívání) středního vodiče

Při symetrickém zatížení v trojfázové síti, kde jsou napětí vzájemně posunuta o 120° , je výsledný proud středními vodiči nulový. Pokud je ale zatížení nesymetrické, pak ve středním vodiči protéká proud, který je dán výsledkem vektorového součtu jednotlivých fázových proudů.

I pokud je zatížení jednotlivých fází rovnoměrné a středním vodičem neteče proud základní harmonické neplatí to pro proudy vyšších harmonických a to hlavně pro proudy třetí harmonické a její násobky, které se naopak ve středním vodiči sčítají viz. obr. č. 2.6.



Obr. č. 2.6 Proud třetí harmonické ve středním vodiči. [8]

Vlivy na transformátory

Transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem. Za prvé, ztráty vířivými proudy, které jsou normálně na úrovni kolem 10% ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Ve skutečnosti u transformátoru plně zatíženého nelineárně zátěží IT technologií budou celkové ztráty dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěží. Výsledkem toho je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost. Prakticky za těchto okolností může být snížena životnost transformátoru ze 40 let až na 40 dní! Naštěstí jen málo transformátorů je plně zatíženo, ale tento jev musí být uvažován při volbě zařízení.

Druhý vliv je spojen s 3n harmonickými. U vinutí zapojeného do trojúhelníka jsou tyto harmonické ve fázi, takže se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tedy pro 3n harmonické je transformátor zapojený do trojúhelníka jako izolační, přičemž harmonické jiných řad transformátorem procházejí. Cirkulující 3n harmonické proudy musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru.

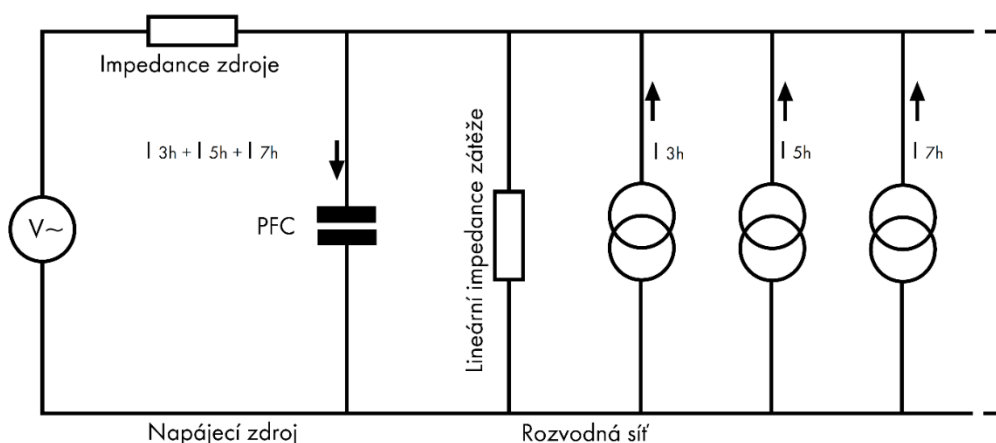
Rušení při spínání vypínačů

Proudové chrániče vypínají, jestliže je součet proudů ve fázových vodičích a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Rušení při spínání těchto vypínačů může být způsobeno harmonickými ze dvou důvodů. Za prvé tyto vypínače jako elektromechanická zařízení nemusí sčítat harmonické složky proudu korektně a proto vypínají chybně. Za druhé, některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které musí být filtrovány v napájecím obvodu zařízení. Filtry, které se normálně k tomuto účelu užívají, mají zapojeny kondenzátory mezi fázemi, středním vodičem a zemí, a díky tomu teče malý proud do země (svodový proud). Velikost tohoto proudu je limitována normami, dle kterých musí být menší než 3,5 mA, a obvykle je mnohem menší, ale je-li zařízení připojeno pouze do jednoho obvodu, může tento svodový proud způsobit vypnutí. Tuto situaci lze jednoduše řešit využitím více obvodů, z nichž každý napájí několik zátěží.

Rušení při spínání miniaturních vypínačů je vesměs způsobeno tím, že protékající proud je větší, než očekávaný dle výpočtů nebo jednoduchých měření, právě vlivem harmonických. Mnoho přenosných měřících přístrojů neměří správně efektivní hodnoty a pak mohou být podhodnoceny nesinusové proudy až o 40%.

Přetěžování kompenzačních kondenzátorů

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při indukční zátěži (jako jsou např. indukční motory). Na obr. 2.7 je uvedeno náhradní schéma pro kompenzační kondenzátor s nelineární zátěží. Impedance kondenzátoru klesá s kmitočtem, zatímco impedance sítě, která je obecně induktivní, se stoupajícím kmitočtem roste. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudu vyšších řádů, a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k poškození kondenzátoru.



Obr. č. 2.7 Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor [8]

Váženějším problémem je rezonance kapacity kondenzátoru s indukčností napájecí sítě v blízkosti harmonických kmitočtů (které se vyskytují ve 100 Hz intervalech). V takových případech se mohou objevit velké hodnoty napětí nebo proudů, které často vedou k haváriím kompenzačních jednotek.

Rezonancím se můžeme vyvarovat tak, že ke kondenzátorům přidáme do série takovou tlumivku (indukčnost), aby celková impedance byla induktivní pro nejmenší výraznou harmonickou. Toto řešení omezuje harmonický proud tekoucí do kondenzátoru. Velikost sériové tlumivky může být problém zejména, jsou-li přítomny harmonické nízkých řádů. Toto zapojení se užívá v případě hrazené kompenzace jalového výkonu.

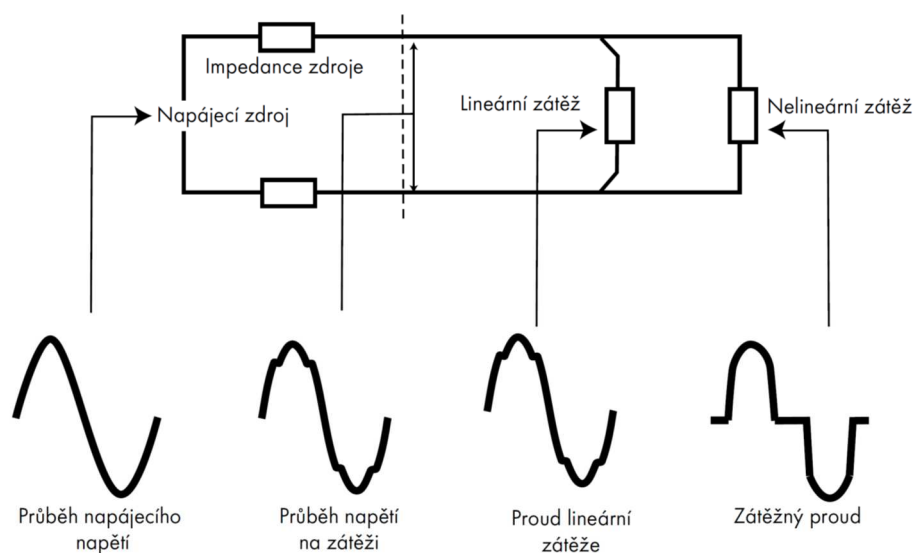
Skin efekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev je znám jako skin efekt, který se více projevuje na vyšších kmitočtech. Skin efekt je obvykle zanedbáván, protože při základním kmitočtu se projevuje velmi málo, ale u kmitočtů nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše, se stává skin efekt významným, protože způsobuje případné ztráty a oteplení. Tam, kde se vyskytují proudové harmonické musí projektanti uvažovat skin efekt při

návrhu kabelů. Mnohožilové kabely a vrstvené přípojnice mohou být využity při řešení tohoto problému. Je ale nutno dávat pozor, aby použitý systém přípojníc zamezil mechanickým rezonancím na harmonických kmitočtech.

2.2.8 Problémy způsobené harmonickými napětími

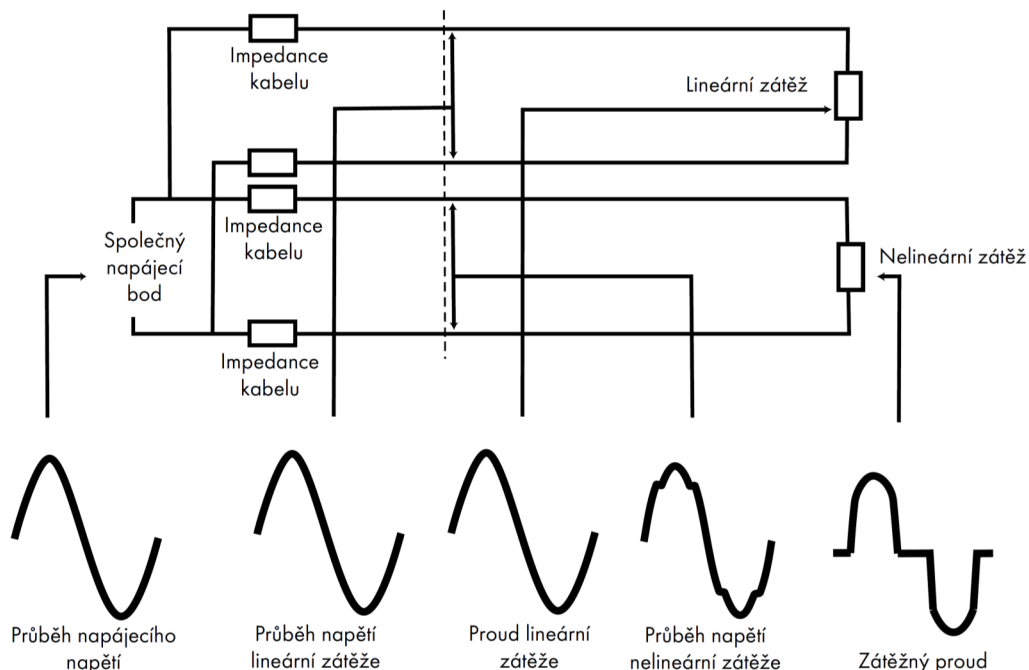
Harmonický proud zátěže způsobuje napěťové zkreslení na impedanci napájecí sítě (to je důvod „ploché křivky“). Jsou zde dvě části impedance, impedance vnitřních kabelů od společného napájecího bodu (PCC) a základní impedance napájecí sítě k PCC, např. lokálního napájecího transformátoru. Situace je uvedena na obr. 2.8.



Obr. č. 2.8 Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže [8]

Deformovaný odběrový proud nelineární zátěže způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedanci kabelů. Výsledné zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu a to i v případě lineárních zátěží.

Řešením je oddělení obvodů se zátěžemi generujícími harmonické proudy od obvodů se zátěžemi citlivými na harmonické, jak je ukázáno na obr. č. 2.9. Zde jsou samostatné obvody, které z PCC napájejí lineární a nelineární zátěže. Napětové zkreslení vlivem nelineární zátěže pak nemá vliv na napájení lineární zátěže.



Obr. č. 2.9 Oddělení lineární a nelineární zátěže [8]

Při posouzení harmonického zkreslení je nutno připomenout, že při napájení zátěže přes UPS nebo při využití záložního generátoru při poruše, může být impedance napájecí sítě a tím i napětové zkreslení mnohem větší.

Jsou-li instalovány lokální transformátory, pak mohou být voleny tak, aby měly dostatečně nízkou výstupní impedanci a dostatečnou schopnost odolávat přídavnému ohřívání, jinými slovy dostatečně předimenzované transformátory.

Indukční motory

Napětové zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudů indukované do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty. Pokud je očekávat výskyt harmonicky zkresleného napětí, pak by měly být motory dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát.

Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání induktivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukuje elektromagnetické interference (EMI) a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidelnostem v provozu regulátorů. Může zde být dokonce i několik průchodů nulou během jedné půlperrody.

2.2.9 Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

Jestliže má harmonický proud původ v napájecí síti, pak roste harmonické zkreslení napětí úměrně impedanci napájecí sítě ve společném napájecím bodě (PCC) a harmonickému proudu. Jelikož impedance napájecí sítě je obecně induktivního charakteru, její amplituda roste se zvyšujícím se kmitočtem. Samozřejmě, pokud je napětí deformováno harmonickými proudy z jiných nelineárních spotřebičů a zkreslením příslušícím transformátoru, každý další spotřebič přispívá k tomuto deformování. Teda zákazníkům nemůže být dovoleno zvyšovat znečištění sítě tak, aby způsobovali újmu jiným zákazníkům. Proto jsou v mnoha zemích stanoveny limity pro generování harmonických proudů do napájecí sítě.

2.2.10 Mezní hodnoty vyšších harmonických

Základem pro určení mezních hodnot vyšších harmonických je hladina nízkého napětí (dále nn). Pro hladinu nn jsou velikosti kompatibilní úrovně stanoveny s ohledem na možnost vzniku rušení připojených zařízení (asynchronní motory, TV přijímače, výpočetní techniku, ostatní elektroniku). Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí, která se mohou vyskytovat ve veřejné napájecí síti nn, jsou uvedeny ve středním sloupci v tab. č. 2.1, která byla získána dlouhodobým pozorováním a je součástí normy ČSN IEC 1000-2-2. V podstatě se jedná o hodnoty odpovídající třídě II. Kompatibilní úrovně tříd I. a III. byly odvozeny později a jsou výsledkem optimalizace kompatibilních úrovní v elektroenergetickém systému a především v průmyslových sítích a hodnoty jsou v souladu s IEC 1000-2-4 (ČSN EN 61000-2-4).

Tab. č. 2.1 Kompatibilní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladinu nn [4]

Řád harmonické n	Přípustná hodnota u_{nVT} v % U_1		
	tř. I	tř. II	tř. III
Liché hodnoty harmonických nedělitelné třemi			
5	3,0	6,0	8,0
7	3,0	5,0	7,0
11	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	4,5
17	2,0	2,0	4,0
19	1,5	1,5	4,0
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	$0,2+12,5/n$	$0,2+12,5/n$	$5 \times \text{SQR}(11/n)$
Liché hodnoty harmonických dělitelné třemi			
3	3,0	5,0	6,0
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	2,0
21	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	1,0
Sudé harmonické			
2	2,0	2,0	3,0
4	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	1,0
8	0,5	0,5	1,0
10	0,5	0,5	1,0
>10	0,2	0,2	1,0

Celkové harmonické zkreslení napětí je dáno ČSN EN 61000-2-4

třída I	5%
třída II	8%
třída III	10%

Problematika stanovení kompatibilních mezí v sítích vn a vvn je řešena v normách PNE 33 3430, existují dva základní přístupy. Prvý přístup vychází z materiálu VDEW "Zásady pro posuzování zpětných vlivů", druhý pak z materiálů a návrhů IEC. Obě metodiky stanovují příspěvky rušení od jednotlivých odběratelů připojených ve společném napájecím bodě (PCC) tak, aby mohl dodavatel garantovat všem odběratelům elektrickou energii předepsané kvality.

Stanovení příspěvku odběratele k znečištění sítě vyššími harmonickými

Příspěvek odběratele je možné zanedbat (připojení vždy přípustné), pokud je splněna podmínka dle (2.39).

$$\frac{S_{odb}}{S_{kV}} \leq \frac{1}{1000} \quad (2.39)$$

S_{odb} zdánlivý výkon připojovaného zařízení

S_{kV} zkratový výkon ve společném napájecím bodě (PCC)

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430 (metodika VDEW)

V případě, že není podmínka (vzorec 2.39) splněna, je nutná podrobnější analýza. Pokud je již zařízení instalované je vhodné provést měření.

Výpočet B_n

$$B_n = \frac{Z_n * k_{pn} * \sqrt{3} * I_n}{u_{nVT} * U_1} * 100 \quad (2.40)$$

kde Z_n je impedance sítě při kmitočtu n-té harmonické [Ω]

k_{pv} je činitel soufáznosti 0,3-1

u_{nVT} je kompatibilní mez nn viz. tab. 2 [%] pro třídu II

U_1 je jmenovité sdružené napětí v odběrovém bodě pro $n=1$ [V]

I_n můžeme určit měřením, nebo z následující rovnice (2.41).

$$I_n = \frac{S_{odb}}{\sqrt{3} * U_1} * \frac{i_{np}}{100} \quad (2.41)$$

kde S_{odb} je zdánlivý výkon zařízení (měniče frekvence)

i_{np} je proud dané harmonické

Určení B_{max}

B_{max} je největší hodnota ze všech B_n (kde n je řád harmonické $n=2...25$)

Napětí vyšších harmonických v síti vznikají spolupůsobením všech zařízení na hladinách nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Z předchozí věty je zřejmé, že jedno zařízení se smí na celkové hodnotě rušení podílet pouze částečně.

Nejvyšší hodnoty harmonických napětí se zpravidla vyskytují v sítích nízkého napětí, neboť zde se sčítají podíly příslušných úbytků napětí vzniklé ve všech napěťových hladinách.

$$u_{nvvn} + u_{nvn} + u_{nnn} \quad (2.42)$$

Výsledné napětí vyšší harmonické v příslušné napěťové hladině musí být s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu rovno a nebo menší než je přípustná hladina pro danou napěťovou úroveň. Proto může každý ze tří zdrojů v jednotlivých napěťových úrovních přispívat podílem vyplívající z rovnice (2.43).

$$u_n = k_N * u_{nVT} \quad (2.43)$$

kde k_N je činitel napěťové úrovně

nízké napětí k_{Nnn}	0,2 až 0,3
vysoké napětí k_{Nvn}	0,4 až 0,7
velmi vysoké napětí k_{Nvvn}	0,1 až 0,3

Celkový součet součinitelů pro všechny tři úrovně bývá roven jedné. Velikost jednotlivých součinitelů se volí podle zkušeností. U harmonických, jejichž řád je násobkem tří nedochází ke sčítání v různých napěťových hladinách koeficient pro nízké napětí $k_{Nnn}=1$.

Rozdělení přístupných úrovní mezi jednotlivé odběratele vychází ze vztahu:

$$k_A = \frac{S_0}{S_T} \quad (2.44)$$

- S_0 sjednaný výkon odběratele
- S_T vztažná hodnota výkonu rovná 70% zdánlivého výkonu transformátoru napájecího danou sítí
- k_A činitel připojení

Činitel k_A se využije při vyhodnocování velikosti maximálního činitele rušení B_{max}

$B_{max} < 0,02$	Produkce vyšších harmonických je jen nepatrná, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_A * k_N$	Produkce vyšších harmonických leží z hlediska poměru výkonů pod přípustnou hodnotou, zařízení je možné připojit
$B_{max} < k_N$	Produkce vyšších harmonických leží pod hodnotou přípustnou pro síťovou úroveň. Pokud určitý počet zákazníků plně nevyžaduje celé své podíly, je možné i v tomto případě souhlasit s připojením
$B_{max} > k_N$	Zařízení produkuje nepřipustně vysoké harmonické proudy

Stanovení příspěvku dle normy PNE 33 3430-1 (metodika IEC)

V sítích vysokého a velmi vysokého napětí:

Mezní hodnota příspěvku i -tého odběratele E_{ni} se stanoví z rovnice (2.45)

$$E_{ni} = G_{ns} \left(\frac{P_i}{P_t} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (2.45)$$

Kde: E_{ni} je přístupný příspěvek i -tého odběratele k n -té harmonické napětí v PCC, vyjádřených v procentech jmenovitého napětí sítě

G_{ns} je mezní hodnota n -té harmonické napětí (v procentech jmenovitého napětí) ve vyšetřované síti viz. tab 3.9

P_i je sjednaný maximální příkon i -tého odběratele

P_t je výkon, který je možno odebírat z distribuční sítě při daném provozu

a koeficient určující soufáznost

$$a = 1 \in \{n < 11\} \quad (2.46)$$

$$a = 1,4 \in \{11 < n < 13\} \quad (2.47)$$

$$a = 2 \in \{n > 13\} \quad (2.48)$$

Řád harmonické n	Mezní hodnota	
	sítě vn	sítě vvn
liché harmonické		
3	3	2
5	4	2
7	3	2
9	0,9	0,9
11	2,7	1,5
13	2,1	1,5
15	0,3	0,3
17	1,7	1
19	1,3	1
21	0,2	0,2
23	1,3	0,7
25	1,3	0,7
>25	$0,2+5/n$	$0,1+2,5/n$
sudé harmonické		
2	1,5	1
4	0,7	0,7
6	0,5	0,5
8	0,3	0,2
>8	0,2	0,2

Tab. č. 2.2 Mezní hodnoty vyšších harmonických napětí pro hladiny vn a vvn [4]

2.2.11 Výpočet impedancí sítí pro frekvence vyšších harmonických

Z definice impedance jednotlivých prvků elektrických sítí vyplývá, že její velikost je při různých kmitočtech podstatně odlišná od impedance při 50 Hz, pro kterou je navržena. Při jejich určování je nutné věnovat zvláštní pozornost rezonančním jevům. Pokud nastanou rezonance sítě na frekvenci některé harmonické může její napětí nabývat obzvláště vysoké hodnoty, čímž se nebezpečně zvyšuje možnost rušení dalších odběratelů. Při určování impedance sítě ve společném napájecím bodě (PCC) se vychází z náhradního schématu na obr. 3.8., ve kterém je celková kapacita sítě složená z kapacit vedení a případně z kapacit kondenzátorových baterií pro kompenzaci účinníku, reprezentována kondenzátorem připojeným na přípojnicí sítě a chová se jako paralelní rezonanční obvod. Induktivní reaktance je tvořena převážně reaktancí napájecího transformátoru a reaktancí vedení, s níž je dále v sérii reaktance v nadřazeném síťovém bodě Q vypočtená ze ztrátového výkonu. Tlumicí odpor obvodu je tvořen především činným zatížením sítě.

Rezonanční frekvence obvodu je dána vztahem (2.49).

$$f_{rez} = 50 \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (2.49)$$

Kde Q_c je nabíjecí výkon sítě

S_k je zkratový výkon na přípojnicích

Impedance v nadřazeném síťovém bodě Q:

$$Z_{kQv} = \frac{f_n}{50} * \frac{U_n^2}{S_{kQ}} \quad (2.50)$$

Pro další výpočty je možné uvažovat pouze induktivní složku impedance

Impedance transformátorů:

Impedance transformátorů pro vyšší harmonické je přibližně rovna jeho reaktanci

Podélná impedance vedení:

Neuvažujeme vliv skinefektu. Reaktance je dána vztahem:

$$X_{Vv} = \frac{f}{50} * X_V \quad (2.51)$$

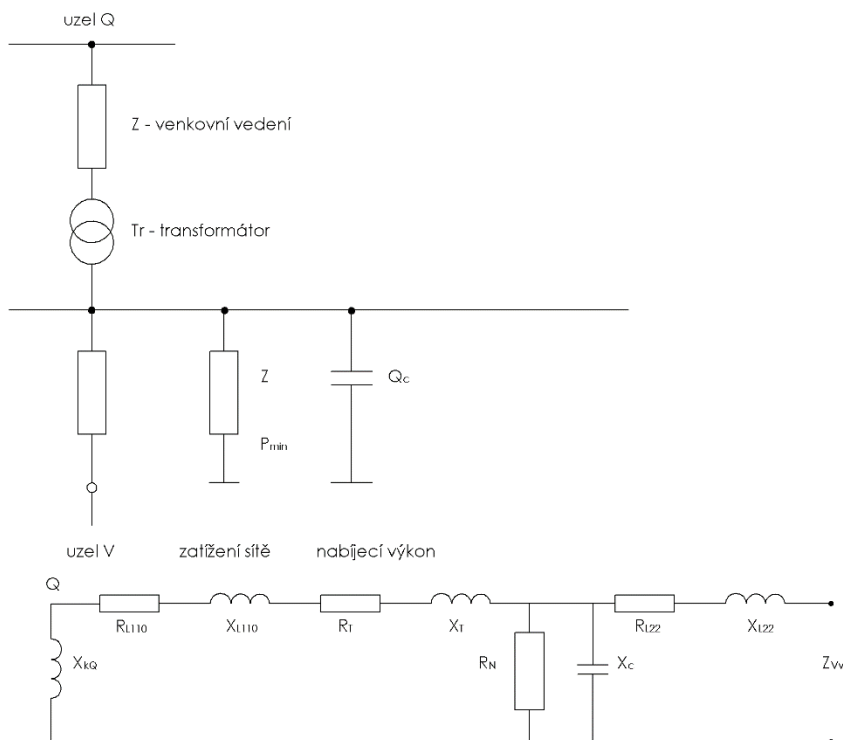
Příčná impedance vedení a kondenzátorů:

Kapacitní jalové výkony sítě Q_c jsou určeny především jalovými výkony vedení a jalovými výkony nehrazených kondenzátorů pro kompenzaci účinníku. Výsledná impedance je dána vztahem:

$$Z_c \cong X_c = \frac{50}{f} * \frac{U_n^2}{Q_c} \quad (2.52)$$

Impedance zátěže sítě:

Velikost impedance sítě na frekvenci blízké první paralelní rezonanci závisí na tlumícím účinníku ohmické zátěže. Činnou složkou rozběhové impedance motorů můžeme zanedbat. Impedance sítě dosahuje nejvyšší hodnoty při minimální činné zátěži $P_{\text{čmin}}$. V energetických sítích je $P_{\text{čmin}}$ rovno asi 2/3 slabého zatížení sítě.



Obr. č. 2.10 Zjednodušené schéma sítě

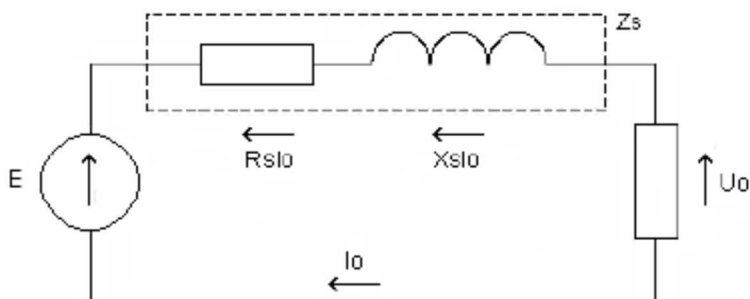
2.3 Kolísání napětí – Flicker efekt

Elektrické spotřebiče jsou více či méně citlivé na kolísání úrovně napětí v distribuční síti. Mezi tyto spotřebiče patří například světelné zdroje (žárovky). Tyto spotřebiče vyžadují pro správnou funkci konstantní úroveň napětí. Odběratelé s proměnlivým odběrem elektrické energie však bohužel způsobují měnící se úbytky napětí. Rychlé periodické změny napětí, které nazýváme kolísání napětí, způsobují jev zvaný flicker efekt. Toto kolísání napětí způsobuje změny světelného toku, které má za následek změny ve zrakovém vnímání člověka a tak ho omezuje při jeho činnostech.

2.3.1 Příčiny kolísání napětí

Pro každé vedení je napětí na zátěži odlišné od napětí na začátku při zdroji. To je demonstrováno na jednofázovém náhradním obvodu dle obr. 2.11. Rovnice (2.53) ukazuje, jak může být rozdíl napětí ΔU odvozen z fázorového diagramu a jednoduchých geometrických pravidel.

$$\frac{E-U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U}{U_0} = R_S * \frac{P}{U_0^2} + X_S * \frac{Q}{U_0^2} \cong R_S * \frac{\Delta U}{U_0} + \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.53)$$



Obr. č. 2.11 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě

Náhradní odpor vedení je v praxi poměrně malý ve srovnání s jeho reaktancí ($X_S > 10 * R_S$). Takže uvedená rovnice přejde na následující tvar, který definuje poměrnou hodnotu změny napětí na koncové zátěži:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.54)$$

Vidíme, že primární příčinou fluktuace napětí je časová změna jalového výkonu na proměnlivé zátěži. Takové zátěže jsou obloukové pece, pohony válcovacích stolic, navíječky, atp. Obecně řečeno, jsou to zátěže s velkým počtem změn výkonu. Také malé výkonové zátěže jako rozběh indukčních motorů, svářečky, ohříváče vody, regulátory výkonu, elektrické pily a kladiva, pumpy a kompresory, jeřáby a výtahy také mohou být zdroji flicker efektu. Velikost úbytku napětí závisí na velikosti proudu, který protéká danou reaktancí a úbytek je tedy způsoben i činnou složkou odběru zátěže.

2.3.2 Účinky kolísání napětí na světelné zdroje

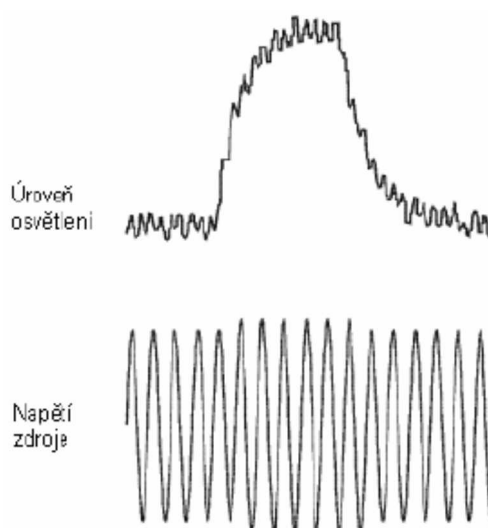
Jakékoliv změny amplitudy napájecího napětí vedou k změnám světelného toku světelného zdroje. Tento jev je znám jako flicker efekt, což je subjektivní nepříznivý vizuální dojem při nestabilním světelném toku, jehož jas nebo spektrální rozdělení se mění v čase. Přenos kolísání napájecího napětí na kolísání výstupního záření světelných zdrojů je velice komplexní problém závislý na principu funkce světelného zdroje, jeho konstrukci, dimenzování, napájení, ale i provozních podmínkách.

Odezva světelného zdroje na kolísání napětí může být vyjádřena jeho přenosovou funkcí, kterou je popsána změna výstupního parametru na základě změny parametru vstupního, vstupním parametrem je relativní velikost změny velikosti napětí $\Delta U/U$ a výstupním parametrem relativní velikost změny velikosti světelného toku $\Delta \Phi/\Phi$. Jejich podíl definuje zesílení přenosu (2.55).

$$G.F. = \frac{\Delta\phi/\phi}{\Delta U/U} \quad (2.55)$$

Každý světelný zdroj má svou vlastní přenosovou funkci, kterou lze získat vyhodnocením odezvy zdroje na periodickou amplitudovou modulaci napětí v rozsahu modulačních frekvencí (0; 50) Hz. Odezvu je přitom možné měřit, nebo i simulovat na modelu světelného zdroje.

Žárovky jsou zvláště citlivé na změny v napájecím napětí, jejich světelný tok Φ je úměrný přiloženému napětí podle vztahu $\Phi \sim U^y$, kde y se mění mezi 3,1 a 3,7. Obr. 2.12 ilustruje změny světelného toku žárovky 60 W, 230 V vlivem kolísání napětí napájecího napětí.



Obr. č. 2.12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky

Kolísavé změny proudu (v případě této práce způsobené obloukovou pecí) způsobují nízkofrekvenční kolísání napětí, které má za následek blikání světelných zdrojů (flicker efekt). Ten významně narušuje vidění a obecně způsobuje neklid, nepohodlí, psychickou a psychologickou únavu a dokonce má i patologické vlivy na lidské bytosti. Fyziologie tohoto jevu je komplexní. Flicker efekt ovlivňuje proces vidění a reakce lidského mozku. Blikající světelné zdroje vytvářejí nepohodlí a zhoršení kvality práce – v některých případech mohou způsobit nehody na pracovišti.

Proto byly stanoveny předpisy pro bezpečnost a ochranu zdraví pracujících (BOZP), které jsou kontrolované místními hygienickými organizacemi. Jedná se zejména o nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kde se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci a právě zde v § 45 jsou uvedeny bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště.

Aby se minimalizovaly příčiny vzniku flicker efektu, jsou stanoveny v normě ČSN EN 61000-3-3 ed. 3 přípustné meze krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{st} = 1,0$ (vzorkování po 10 minutách) a dlouhodobého nepříznivého vjemu flicker efektu $P_{lt} = 0,65$ (vzorkování po 2 hodinách).

3. Problémy s kvalitou elektrické energie způsobené provozem elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece patří mezi velmi důležitá zařízení při zpracování kovů. Jejich historie sahá až na konec 19. století, kdy Paul Héroult sestrojil první průmyslově použitelnou elektrickou obloukovou pec. Tyto pece jsou využívány v metalurgii a díky jejich použití se v této oblasti dosáhlo významného pokroku.

Teoretické poznatky a praktické zkušenosti potřebné k úspěšné stavbě a k dobrému provozu pece jsou velmi obsáhlé. Kvůli těmto důvodům se občas stává, že oblouková pec nevyhovuje danému účelu. Může se například stát, že síť do které je elektrická oblouková pec zapojena nedosahuje takových parametrů, aby zpětný vliv této pece neovlivňoval ostatní provozy v síti.

3.1. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je výboj plynu, který vzniká za normálních nebo vyšších tlaků, jenž je schopný samostatně existovat po určitou dobu. Mezi charakteristické vlastnosti oblouku patří:

- Vysoká proudová hustota katodové skvrny
- Vysoká teplota katodové skvrny nebo celé katody
- Malé úbytky napětí v katodové a anodové oblasti
- Malé napětí na elektrodách
- Vysoká teplota obloukového plazmatu
- Intenzivní vyzařování světla z oblouku

Podle druhu napájení lze oblouky rozdělit podle způsobu napájení na:

- Střídavé oblouky
- Stejnoseměrné oblouky

Nebo podle druhu použitých elektrod na:

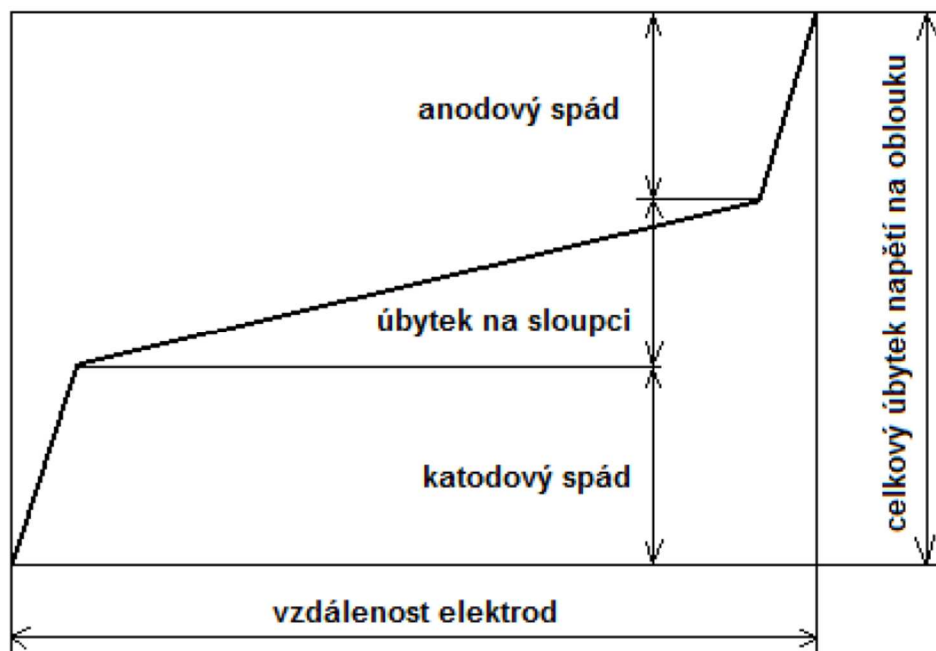
- Obloukové pece s uhlíkovými elektrodami
- Obloukové pece s kovovými elektrodami

Nebo podle tvaru výbojové dráhy na:

- Oblouky volně hořící
- Oblouky stabilizované

Stabilizovaný oblouk znamená, že oblouk hoří jen ve vymezeném prostředí.

Průběh úbytku napětí na oblouku je znázorněn na obr. č. 3.1. Na tomto obrázku si můžeme všimnout třech různých oblastí. Jsou to: katodová oblast, úbytek na sloupci a anodová oblast. Velikost anodového a katodového úbytku napětí závisí na materiálu elektrod. Všechny oblasti jsou závislé na procházejícím proudu obloukem a na prostředí, ve kterém oblouk hoří.



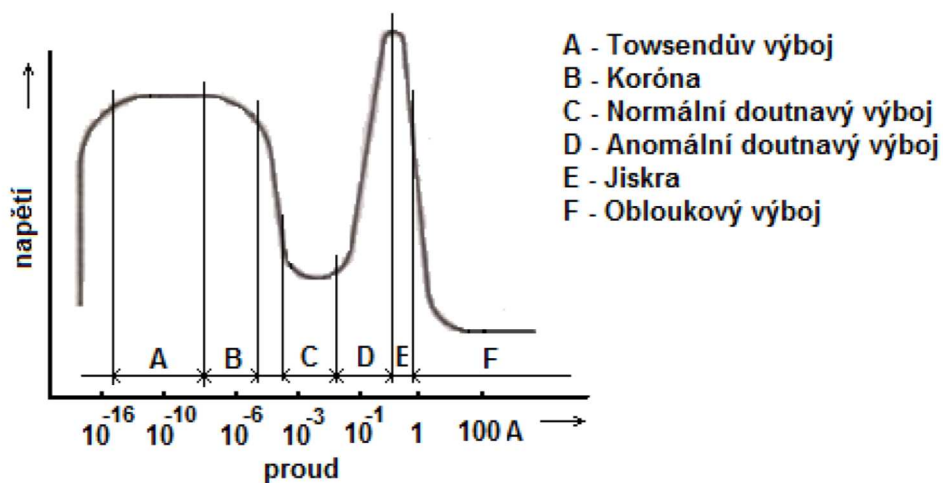
Obr. č. 3.1 Průběh napětí na oblouku [3]

Vznik a vývoj tepla je důsledkem fyzikálních dějů, probíhajících v ohraničeném plynném prostředí, který je za normálních podmínek nevodivý. Toto prostředí stává vodivým až díky působení ionizačních faktorů:

- Vysoká teplota
- Elektrické pole
- Radioaktivní záření, rentgenové záření, krátkovlnné elektromagnetické záření

Ionizace plynu je fyzikální proces, jehož výsledkem je vznik nových nábojů z atomů a molekul plynu. Dalším využívaným dějem je rekombinace částic. Vytváří se v plynu, ve kterém existují částice s opačným nábojem. Při rekombinaci se uvolňuje energie, která se může využít.

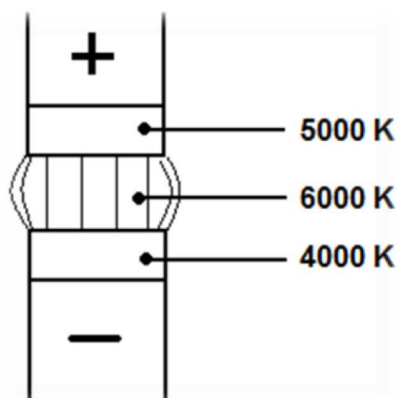
Charakteristiky různých typů výbojů jsou znázorněny na obr. 3.2. Na voltampérové charakteristice můžeme vidět klesající napětí obloukového výboje s rostoucím proudem.



Obr. č. 3.2 Průběh napětí a proudu při různých výbojích [3]

3.1.1 Stejnoseměrný elektrický oblouk

Stejnoseměrný elektrický oblouk vznikne tak, že necháme protékat stejnoseměrný proud přes spojené elektrody. V místě spojení elektrod dojde k jejich přehřátí a k následné ionizaci okolních par. Při následném oddálení elektrod bude stejnoseměrný elektrický oblouk protékat přes vzniklé vodivé prostředí. Stejnoseměrný elektrický oblouk je znázorněn na obr. 3.3.



Obr. č. 3.3 Stejnoseměrný elektrický oblouk [3]

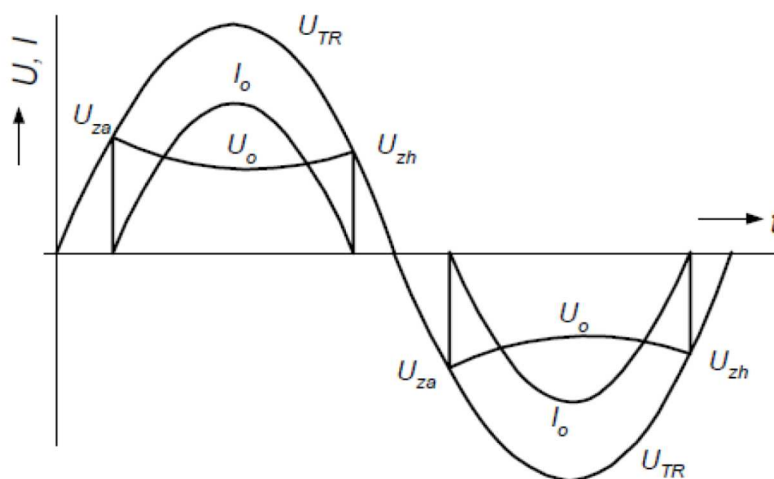
3.1.2 Střídavý elektrický oblouk

Střídavý elektrický oblouk se vytváří obdobně jako oblouk stejnosměrný. Hlavní změnou jsou periodické změny polarity napětí a proudu. Při změně polarity stejnosměrného proudu začne v určitém okamžiku oblouk zhasínat. Pokud se udržela anoda (v předcházející půlperiodě katoda) žhavá, dojde k opětovnému zapálení oblouku i při malých hodnotách napětí. Z tohoto vyplývá, že pokud se na obou elektrodách udrží žhavá místa, může oblouk hořet v obou periodách i při napájení střídavým proudem a vzniká střídavý elektrický oblouk. Střídavý elektrický oblouk je velmi nestabilní a proto se musí k jeho stabilizaci využívat stabilizační člen. Podmínky pro hoření střídavého elektrického oblouku jsou:

- žhavost obou elektrod
- po změně polarity musí být k dispozici napětí pro zapálení oblouku

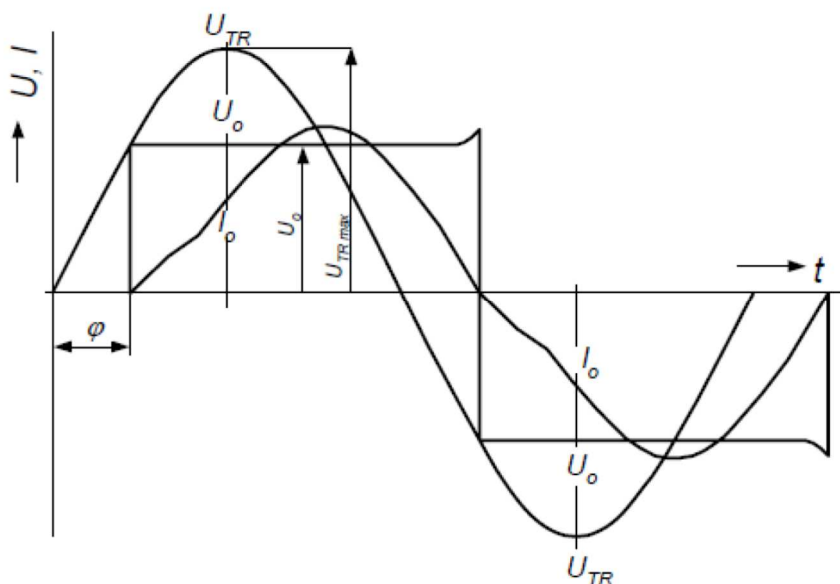
Pro stabilizaci hoření oblouku musíme do obvodu zařadit vhodnou indukčnost. Zařazením indukčnosti do obvodu se nám zhorší účinnost, a proto její velikost nesmí být příliš velká. Optimální velikost indukčnosti by měla být taková, aby se hodnota pohybovala okolo $\cos\varphi = 0,85$. Nejčastěji se volí tlumivka na železném jádře a ve výjimečných případech bez jádra.

Na obr. 3.4 je znázorněn průběh napětí a proudu u oblouku v jehož obvodě je zapojen pouze rezistor. Na obr. 3.4 jsou: U_{TR} napětí zdroje (transformátoru), U_o napětí na oblouku, I_o proud oblouku, U_{ZA} zapalovací napětí, U_{ZH} zhaséčící napětí oblouku. Zapalovací napětí oblouku je o trochu vyšší než napětí zhaséčící. Proud oblouku způsobuje prohnutý tvar napětí oblouku U_o . S rostoucím proudem oblouku napětí oblouku klesá. Průběh proudu oblouku má tvar podobný sinusovce, ale na začátku a na konci každé půlperiody má nulovou hodnotu.



Obr. č. 3.4 Střídavý elektrický oblouk s rezistorem [3]

Pokud se do obvodu oblouku sériově zapojí indukčnost (obr. 3.5), nastává fázový posuv mezi napětím a proudem, ale i prodloužení doby hoření oblouku vlivem indukčnosti tlumivky. Pro docílení trvalého hoření oblouku je nutné do obvodu zapojit takovou tlumivku, aby bylo docíleno fázového posuvu minimálně $\cos\varphi = 0,85$. Napětí na oblouku má obdélníkový tvar, což je charakteristické pro oblouky s vysokými proudy.



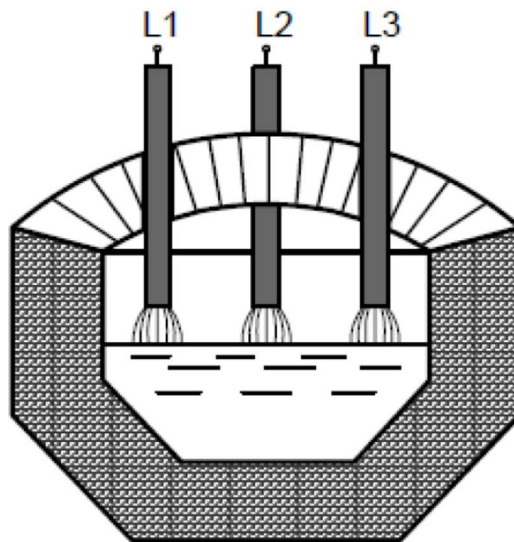
Obr. č. 3.5 Střídavý elektrický oblouk s indukčností [3]

3.2 Elektrické obloukové pece

Elektrické obloukové pece rozdělujeme podle způsobu hoření oblouku na pece s přímým obloukem, nepřímým obloukem a se zakrytým obloukem.

3.2.1 Pece s přímým obloukem

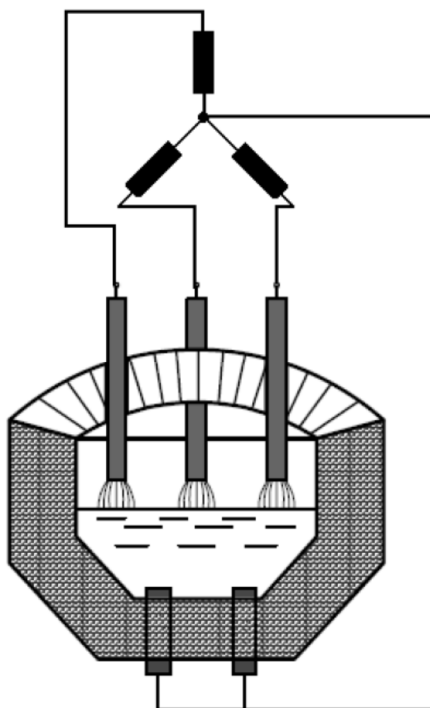
U pecí s přímým obloukem (obr. 3.6) hoří oblouk mezi elektrodou (většinou grafitovou) a vsázkou. Proudový obvod se uzavírá přes taveninu. Tyto pece se také nazývají pece se závislým obloukem. Přenos tepla do lázně je přímý, což urychluje tavení. Tento typ pecí se také vyznačuje delší životností. Tento typ pecí se využívá především k výrobě oceli a litiny.



Obr. č. 3.6 Pec s přímým obloukem [3]

3.2.2 Pece s vodivým dnem

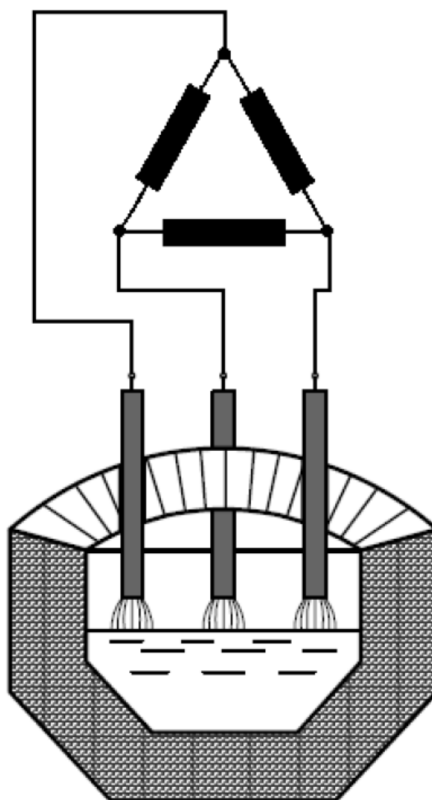
Pece s vodivým dnem (obr. 3.7) patří mezi starší typy obloukových pecí. Byly konstruovány tak, že sekundární strana pecního transformátoru byla zapojena do hvězdy s fázovým vývodem jednotlivých bodů hvězdy na elektrody. Pro zlepšení symetrie byl nulový bod spojen se dnem nádoby. Mezi výhody těchto pecí patří rovnoměrnější ohřev taveniny v celém jejím objemu. Tyto pece se již v dnešní době nevyrábějí.



Obr. č. 3.7 Pec s vodivým dnem [3]

3.2.3 Pece s nevodivým dnem

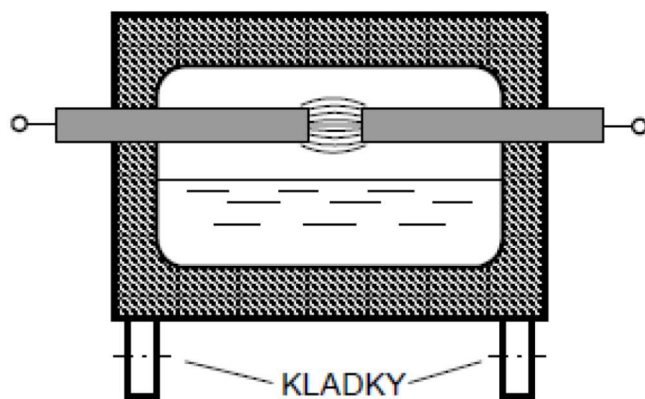
U pecí s nevodivým dnem (obr. 3.8) je sekundární vinutí pecního transformátoru zapojeno do trojúhelníka. Proud u tohoto druhu pecí prochází z elektrody přes strusku do taveniny a zpět přes strusku obloukem do druhé elektrody. Proud tedy neprochází dnem pece. Většina moderních elektrických obloukových pecí je tohoto typu.



Obr. č. 3.8 Pec s nevodivým dnem [3]

3.2.4 Pece s nepřímým obloukem

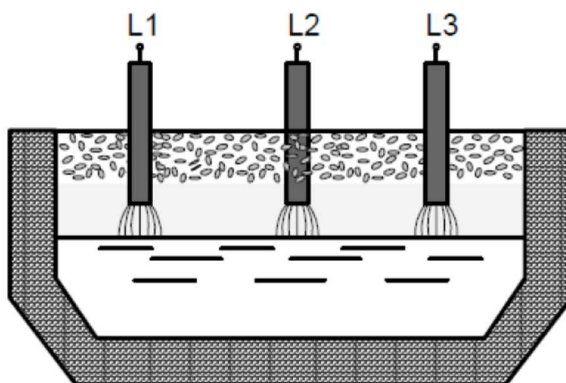
U pecí s nepřímým obloukem (obr. 3.9) hoří oblouk mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výhradně sáláním (zářením). Oblouk hoří mezi elektrodami nezávisle na vsázce. Mezi výhody těchto pecí patří jednoduchá obsluha a menší investiční náklady. Používají se k tavení neželezných kovů, šedé litiny a k výrobě ocelolitiny. Jejich velikost se pohybuje maximálně o objemu vsázky 3 tuny.



Obr. č. 3.9 Pec s nepřímým obloukem [3]

3.2.5 Pece se zakrytým obloukem

U tohoto typu pece (obr. 3.10) hoří oblouk mezi vsázkou a elektrodami, které jsou ponořené do roztavené strusky a obsypány závěškou rud a příměsí. Oblouk tedy hoří zcela zakrytý. Důsledkem průchodu proudu mezi elektrodami, struskou a závěškou vzniká odporový ohřev strusky a závěšky, a proto se tyto pece také někdy nazývají oblouk-odporové. Elektrody jsou svisle uloženy, a jsou buď to amorfní, nebo samospékavé. Bývají vybaveny automatickou regulací elektrod. Tyto pece pracují většinou trvale bez přestávek. Hlavním problémem pecí se zakrytým obloukem jsou elektrické přívody, jelikož pracují s malým napětím a velkým proudem. Systém přívodů je řešen jako bifilární. Pece se používají jako redukční k výrobě surového železa a feroslitin, kde je potřeba dosahovat vysokých teplot.



Obr. č. 3.10 Pec se zakrytým obloukem [3]

3.3 Silnoproudý elektrický obvod obloukové pece

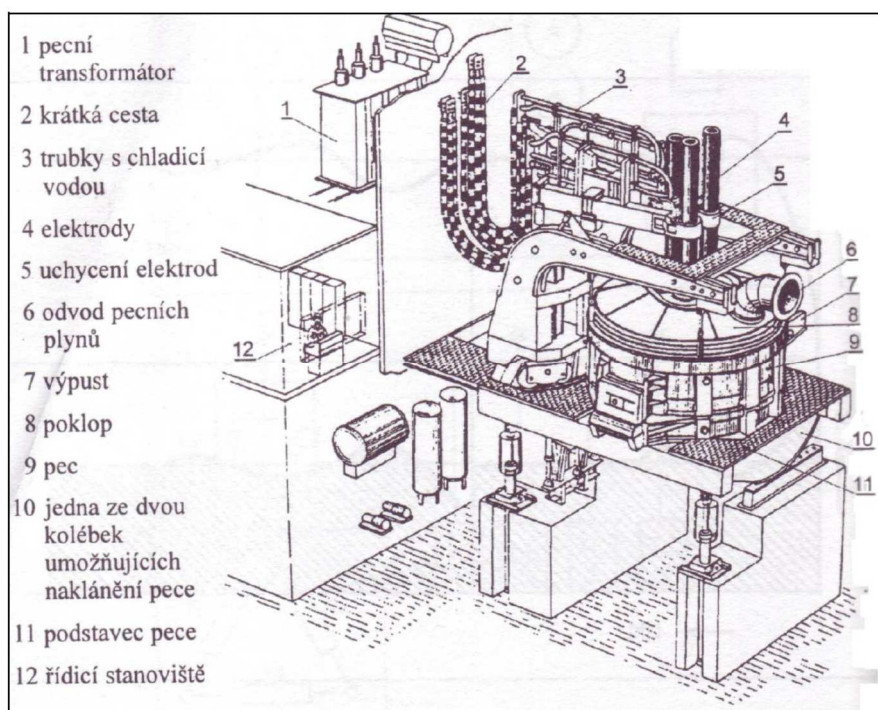
Elektrické zařízení obloukových pecí je velmi nákladné a značně ovlivňuje celkové pořizovací náklady. Podle funkce lze elektrické zařízení obloukové pece rozdělit na:

- silnoproudý elektrický obvod
- obvod automatické regulace pohybu elektrod
- měřící přístroje, ochrany, blokování a signalizace
- řídicí počítač

Elektrické zařízení obloukové pece je znázorněno na obr. 3.11. Nejdůležitější část tvoří silnoproudý obvod, který má zásadní vliv na chod pece. Hlavním úkolem silnoproudého obvodu je dovést elektrickou energii do pracovního prostoru pece a tam ji přeměnit na teplo. Nedílnou součástí elektrického obvodu pece je také automatická regulace polohy elektrod.

Silnoproudý elektrický obvod pece tvoří:

- napájecí síť
- pecní transformátor
- krátká síť
- elektrody



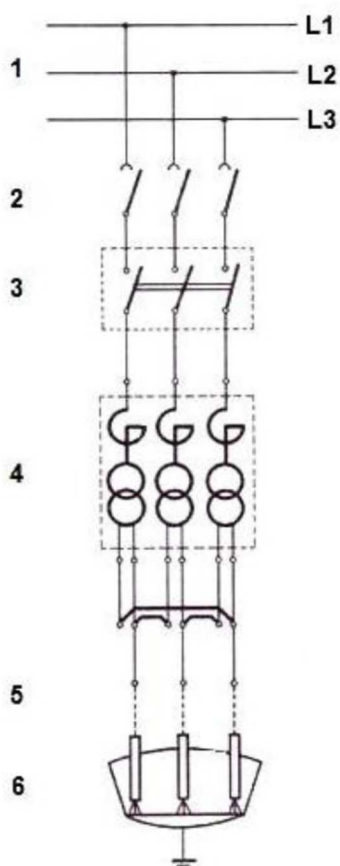
Obr. č. 3.11 Elektrické zařízení obloukových pecí [3]

Na dalším obrázku č. 3.12 je znázorněno typické schéma zapojení elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí kde:

1. Napájecí síť 22kV
2. Odpojovač
3. Vysokonapěťový výkonový vypínač
4. Pecní transformátor a tlumivky
5. Krátká síť
6. Elektrody obloukové pece

Vysokonapěťový výkonový vypínač a odpojovač jsou elektricky ovládány pomocí řídicího panelu pecního zařízení. Mezi další možnosti řídicího panelu patří nastavování odboček pecního transformátoru, kterými se reguluje napětí a následně i proud pece.

Samotné ovládání a regulace pece není jednoduchou záležitostí a proto takovou pec může ovládat pouze pověřený pracovník.



Obr. č. 3.12 Schéma připojení obloukové pece na síť [3]

3.3.1 Napájecí síť obloukové pece

Vzhledem k výkonům elektrických obloukových pecí patří tato zařízení mezi největší odběratele elektrické energie. Pec má na síť vysokého napětí nežádoucí vliv, protože ji zahučuje proměnlivými proudy. Rozsah těchto proudů může být mezi nulou a několikanásobkem jmenovité hodnoty. Tyto proměnlivé proudy způsobují kolísání napětí na impedancích. Tyto vyvolávané poklesy napětí mají negativní vliv na ostatní elektrické zařízení připojené na téže síti, především na výpočetní techniku.

Zkratový výkon elektrické sítě patří mezi nejdůležitější ukazatele pro posouzení připojitelnosti elektrické obloukové pece na síť vysokého napětí. Podle výpočtu zkratového výkonu lze posoudit, zda se vliv rušivých účinků pohybuje v přijatelných mezích.

Do napájecí sítě elektrické obloukové pece patří i odpojovač a výkonový vypínač. Odpojovač slouží k bezpečnému odpojení pece od sítě vysokého napětí v době, kdy pec není využívána.

Vysokonapěťový vypínač slouží ke spínání a rozpínání silnoproudého obvodu během tavení, na začátku a konci tavení, nebo při poruchových stavech. Tento vypínač je velice namáhán, protože často spíná a vypíná vysoké proudy pece. Ve většině případů se provádí jako tlakovzdušný.

3.3.2 Pecní transformátor

Pecní transformátor je nejdůležitější částí elektrického obvodu pece. Výkon pecního transformátoru určuje kapacitu obloukové pece. Tyto transformátory jsou většinou trojfázové, olejové a regulační. U větších výkonů transformátorů se ještě navíc k chlazení oleje využívá vodní chlazení. Charakteristika zatížení pecních transformátorů je značně odlišná od zatížení běžných transformátorů, kde je zatížení trvalé a velmi málo se mění. Primární vinutí pecních transformátorů je zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníka, přepínání je umožněné zdvojnásobením napěťových stupňů. Sekundární vinutí je zapojeno do otevřeného trojúhelníka a všechny začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na víko transformátoru. Sekundární vinutí nelze měnit, protože je napojeno přímo na krátkou cestu. Výkony pecních transformátorů jsou až 120MVA.

Ve společné nádobě s transformátorem se nachází i tlumivka, která je zařazena mezi pecním transformátorem a vysokonapěťovým výkonovým vypínačem viz. obr. 3.13. Tlumivka není zapojena po celou dobu provozu pece, ale je připojena pouze při zapojení primárního vinutí do hvězdy. Hlavním úkolem této tlumivky je omezení zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou. Hlavní nevýhodou použití tlumivky je omezení celkové účinnosti obloukové pece.

3.3.3 Krátká cesta

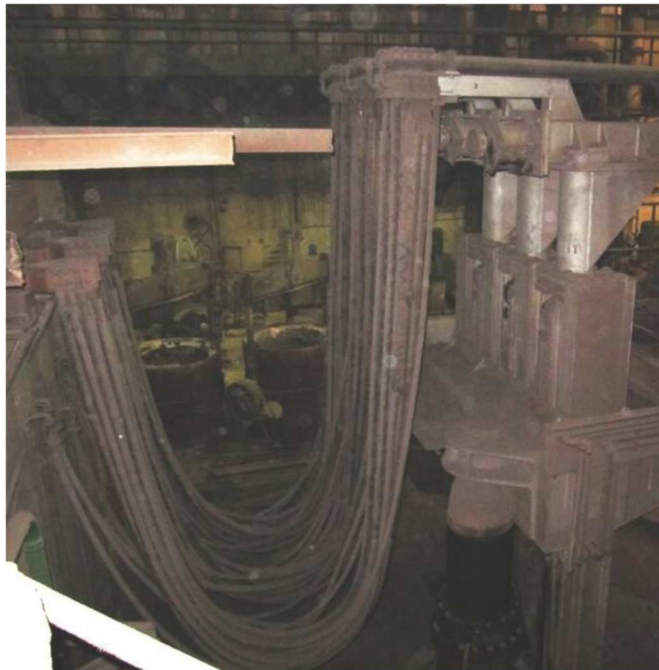
Krátká cesta je důležitou částí elektrické obloukové pece, která spojuje sekundární vývody pecního transformátoru s elektrodami obloukové pece. Z konstrukčního hlediska je krátká síť tvořena paralelním zapojením několika vodičů a to z důvodů vysokých proudů a z důvodu omezení skinefektu. Krátká síť má relativně vysokou indukčnost a pro její snížení se používá bifilárního zapojení, díky kterému dojde ke zlepšení účinnosti celé obloukové pece.

Krátkou cestu lze rozdělit na několik částí:

- Pásová část
- Ohebná lana
- Vodiče ramen držáku elektrod
- Držák elektrod
- Elektrody a spojky

K dosažení nízkých ztrát a celkové dobré účinnosti pece musí mít krátká cesta tyto vlastnosti:

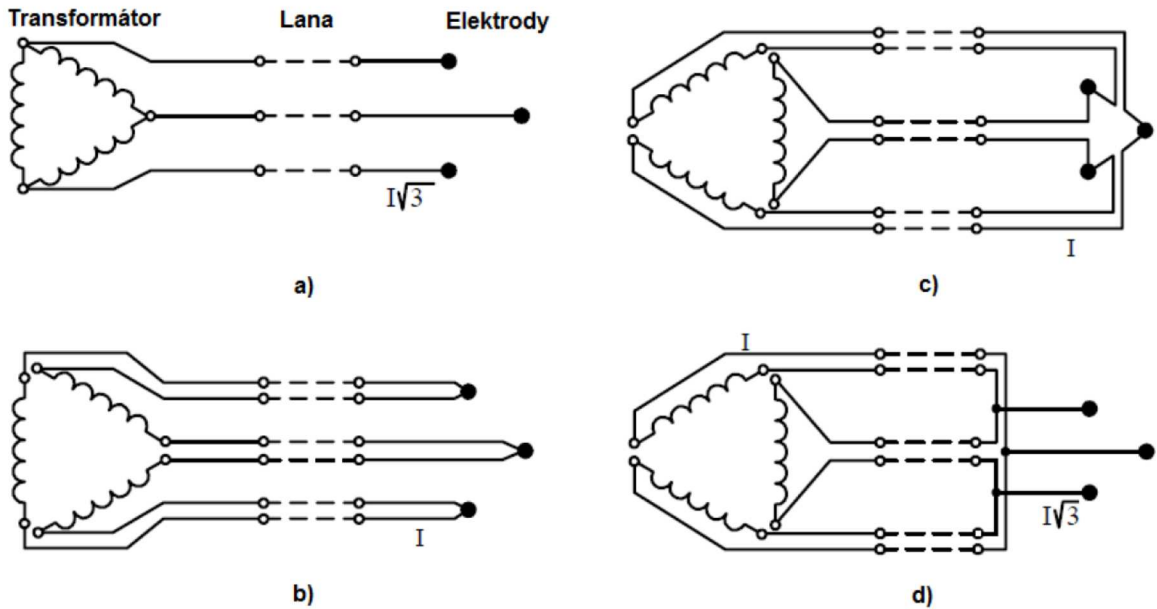
- Co nejkratší délku, aby se snížili elektrické ztráty všech druhů
- Nízká indukčnost
- Nízký ohmický odpor
- Nízkou vzájemnou indukčnost
- Dostatečnou mechanickou pevnost



Obr. č. 3.14 Krátká cesta elektrické obloukové pece [3]

Způsoby zapojení krátké cesty:

Různé způsoby zapojení krátké cesty jsou vidět na obr. 3.15. Hlavní rozdíl mezi těmito zapojeními je to kde se skutečně nachází spojení vinutí do trojúhelníka.



Obr. č. 3.15 Způsoby zapojení krátké cesty [3]

- Na tomto obrázku je vinutí spojeno uvnitř nebo na víku transformátoru
- Na tomto obrázku je vidět bifilární vinutí které je spojeno až na elektrodách. Bifilární přívody jsou náročnější na materiál a tedy i na cenu, ale zato mají menší reaktanční úbytky. Toto zapojení se používá u velkých výkonů obloukových pecí.
- Viz. b.
- Při tomto zapojení je vinutí spojeno až za ohebnými lany. Při tomto zapojení prochází sdružený proud pouze třemi vodiči.

Na obrázcích je také uvedena velikost proudu I přicházející na elektrody. Jelikož prochází při symetrickém stavu vinutím transformátoru proud I , pak na elektrodách v zapojení a. a d. přichází proud sdružený. V zapojení b. a c. přichází na elektrody proud stejný, jako je na vinutí transformátoru.

3.3.4 Elektrody obloukových pecí

Úlohou elektrod je přivést elektrickou energii do pracovního prostoru pece. Způsob jakým se k elektrodám přivádí proud, má velký význam, protože se v elektrodách a kontaktech ztrácí až 10% energie. Hlavními požadavky, které jsou kladeny na elektrody jsou:

- Nízká tepelná vodivost
- Vysoká elektrická vodivost
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká teplota oxidace
- Malý obsah popela a síry

Elektrody jsou prostorově umístěny do rovnostranného trojúhelníku. U obloukových pecí se používají elektrody:

- Uhlíkové
- Grafitové
- Samospékavé

Uhlíkové elektrody

Tyto elektrody se vyrábějí z retortového uhlí, směsí antracitu, koksu, pryskyřice a přírodního grafitu. Polotovary se později zbaví nečistot a lisuje se na požadované průměry a délky. Posléze se elektrody vypalují při teplotě až 1600 °C. Tyto elektrody se používají při výrobě feroslitin a uhlíkových ocelí.

Grafitové elektrody

Tyto elektrody jsou vyráběny stejně jako uhlíkové, akorát se vypalují až teplotou 2700 °C, čímž se uhlík přemění v grafit. Tyto elektrody jsou nejvíce používanými, protože mají větší dovolenou proudovou hustotu než elektrody uhlíkové.

Samospékavé elektrody

Tyto elektrody jsou složeny z ocelového pláště, opatřeného dovnitř žebry, které se vyplňují elektrovodným polotovarem. Tyto elektrody mají stejné složení jako uhlíkové. Výhodou těchto elektrod je nízká cena, protože se vyrábějí přímo na provozované peci.

3.4 Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí na napájecí síť vysokého napětí

Energetická soustava, která napájí závody s provozem elektrických obloukových pecí je často vystavena rušivým účinkům nepravidelně kolísajícího napětí. Původ tohoto nepravidelného kolísání napětí musíme hledat v nepravidelně proměnlivém proudovém zatížení obloukové pece. Při tomto proměnlivém proudovém zatížení vznikají na impedancích sítě poklesy napětí, jež vedou ke kolísání napětí a ke zpětnému vlivu elektrických obloukových pecí na energetickou soustavu. Kolísání napětí jsou v podstatě vyvolány dvěma typy proudových impulsů.

3.4.1 První typ změn proudového zatížení

Tento první typ proudových zatížení vzniká s četností 0,5krát až jednou za sekundu a to především v prvních 30ti minutách tavby. Zkratový proud při zapálení oblouku mezi elektrodou a vsázkou je tak velký, jako ustálený střední proud pece. Pokud je vsázka studená, neustále se tento zkratový stav opakuje. Mezi další příčiny vzniku průtoku zkratového proudu patří například stav, kdy se elektroda dotkne vsázky, což se stává například při sesednutí vsázky.

3.4.2 Druhý typ změn proudového zatížení

Tento typ změn se vyskytuje 2 až 20krát za sekundu. Intenzita proudu při tomto ději kolísá mezi ± 15 až ± 50 % své jmenovité hodnoty. Tyto změny proudu zřejmě souvisí s kolísání napětí v primárních obvodech obloukové pece. Změny proudu tohoto druhu leží u pásma necitlivosti automatické regulace posuvu elektrod, takže jsou při tradičním vybavení automatické regulace elektrické obloukové pece nepostížitelné.

3.4.3 Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn

Soubor rušivých účinků nepravidelně kolísajícího napětí, které má svoji podstatu zejména v proudových změnách druhého typu, nazýváme „flicker efektem“. Na základě výzkumu kolísání napětí v napájecí síti vn elektrických obloukových pecí je možno říci, že rušivý účinek kmitání napětí pozorovatelný při odchylkách 0,5 % jmenovité hodnoty napětí a četnosti výskytu 6 – 8 kmitů za sekundu. Tento rušivý účinek způsobuje blikání světla žárovkových svítidel, nepříznivě ovlivňuje rentgenová zařízení, televizi a počítače napájené z téže soustavy.

První příčina vzniku kolísání

Tato příčina kolísání napětí vychází z teorie oblouku. Intenzita proudu elektrického oblouku se mění od jedné půlvlny ke druhé vlivem rozdílné ionizace zóny elektrického oblouku, aniž by se měnila samotná délka oblouku.

Rozdílná ionizace zóny elektrického oblouku je způsobena nehomogenitou vsázky, která zrovna v danou chvíli je tavena obloukem. Vlivem vysokých teplot je kus vsázky pod elektrodou taven a mění se z pevného skupenství v kapalné a částečně se i vypařuje. Tyto výpary vlivem vysoké teploty ionizují a podílejí se tak na zvýšení koncentrace nosičů náboje v elektrickém oblouku, který nyní může přenést vyšší proud. Tato příčina vzniku kolísání napětí se projevuje především na začátku tavby a postupem času se stoupající teplotou taveniny její vliv klesá.

Druhá příčina vzniku kolísání

Tato příčina vzniku kolísání vzniká, když elektrický oblouk přeskakuje z jednoho kusu vsázky na druhý. Toto se děje přibližně v pěti až dvaceti periodách což odpovídá zhruba 0,1 až 0,4 krát za sekundu. Přeskočení elektrického oblouku se uskuteční tehdy, když špička nebo hrana kusu vsázky se pod vlivem vysoké teploty elektrického oblouku zaoblí a oblouk přeskočí na jinou špičku. Tímto se mění délka oblouku a tedy i proud oblouku.

Třetí příčina vzniku kolísání

Třetí příčinou je smyčkový pohyb oblouku, při kterém se oblouk prodlužuje. Tímto prodlužováním a zkracováním oblouku se mění amplituda proudu oblouku. Vychýlení oblouku je důsledkem zesíleného magnetického pole sousední fáze. Toto zesílení magnetického pole je důsledkem rozdílného proudu fází. Každá elektroda pracuje samostatně podle okolností vyskytujících se v bezprostředním okolí hoření jejího oblouku. Hodnota proudu může při počátku natavování dosáhnout až zkratové hodnoty proudu, zatímco sousední elektroda pracuje se střední hodnotou proudu. Tento provozní stav trvá tak dlouho, až kus působící zkrat na elektrodě je opálen, nebo až regulace elektrodu zvedne.

Všechny tři popsané vlivy kolísání proudu se libovolně překrývají (superponují) a vedou k takovému kolísání proudu, které co do velikosti amplitudy a četnosti nelze přesně definovat. Všechny popsané vlivy se nejsilněji projevují v počátku natavování a jsou tím slabší, čím je vsázka více natavena.

Elektrická oblouková pec patří mezi velké generátory harmonických do napájecí sítě. Jedná se především o 3. a 5. harmonickou. Celkově elektrické obloukové pece zatěžují napájecí síť hlavně nepravidelně proměnlivým kolísáním napětí, velkou proudovou nesymetrií a špatným účinníkem (zhruba $\cos\varphi=0,7$).

3.5 Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť

3.5.1 Omezení zkratových a velkých proudů

Omezení zkratových a velkých proudů se provádí pomocí zapojení tlumivky do série s pecním transformátorem. Tímto zapojením se snažíme omezit proudové špičky, protože právě při těchto proudových špičkách dochází k nejvyšším úbytkům napětí. Toto zapojení přispívá také ke stabilizaci oblouku. K těmto zkratovým a velkým proudům dochází především při natavování vsázky. Po natavení vsázky se předřadná tlumivka z obvodu vyřadí. Zároveň je nutné provést tuto tlumivku několika stupňovou.

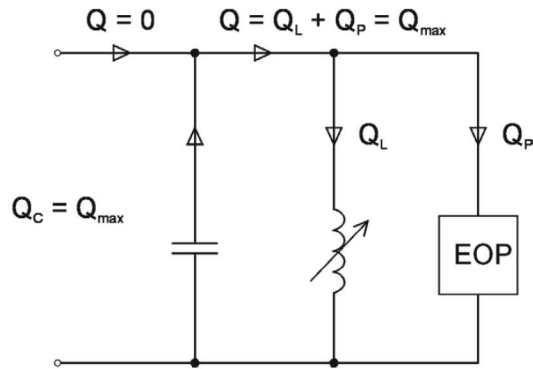
3.5.2 Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení

Zkratový výkon má zásadní vliv na velikost kolísání napětí v síti. Požadovaný zkratový výkon sítě lze odvodit od výkonu pecního transformátoru. Zvýšení zkratového výkonu v místě připojení se provádí:

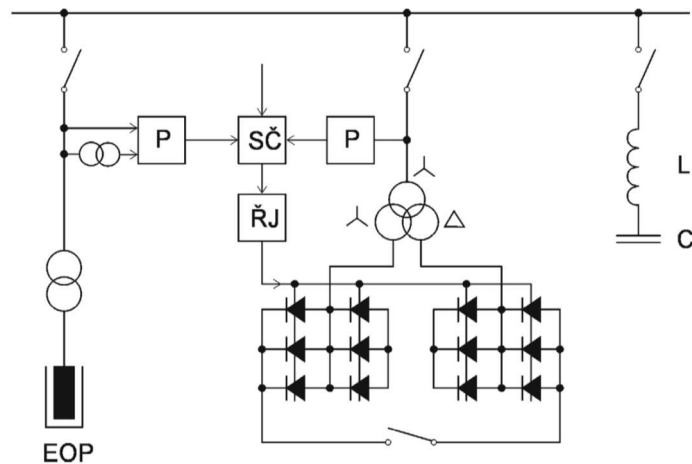
- zesílení sítě se provádí například zdvojením přívodů, zvětšení transformátorů a podobnými úpravami. Tato řešení jsou nákladná a většinou je nutno celou síť rekonstruovat.
- Připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě
- sériovou kompenzací
- paralelní kompenzací

3.5.3 Nepřímá kompenzace

Tímto způsobem udržujeme odběr jalové energie konstantní při maximální hodnotě. V tomto případě omezíme kolísání napětí, ale účinnost je trvale velmi špatná (obr. 3.16). Pro nepřímou kompenzaci se nabízí možnost využít řízený statický usměrňovač jako spotřebič proměnného induktivního výkonu (viz. obr. 3.17). Funkce spočívá v tom, že součet spotřeby pece a usměrňovače je konstantní a tento je kompenzován statickým kondenzátorem. Nevýhodou tohoto řešení je produkce vyšších harmonických. Dále je třeba poznamenat, že i tato koncepce kompenzuje pouze souslednou složku.

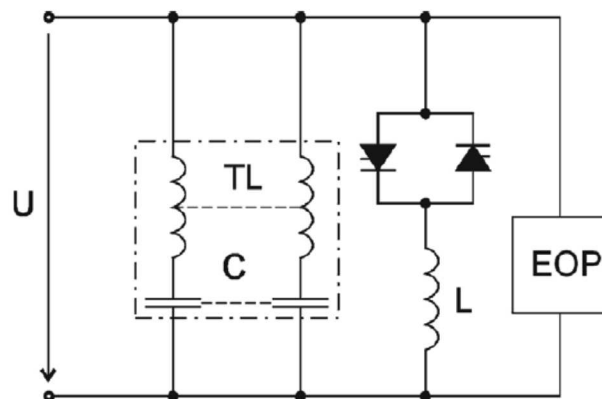


Obr. č. 3.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace [3]



Obr. č. 3.17 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem [3]

Jako další možnost se jeví použití jedné tlumivky řízené tyristory pro každou fázi, jejichž proud základní harmonické je měněn antiparalelně zapojenými tyristory (viz. obr. 3.18). I toto zapojení je však zdrojem vyšších harmonických.



Obr. č. 3.18 Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem [3]

3.5.4 Přímá kompenzace

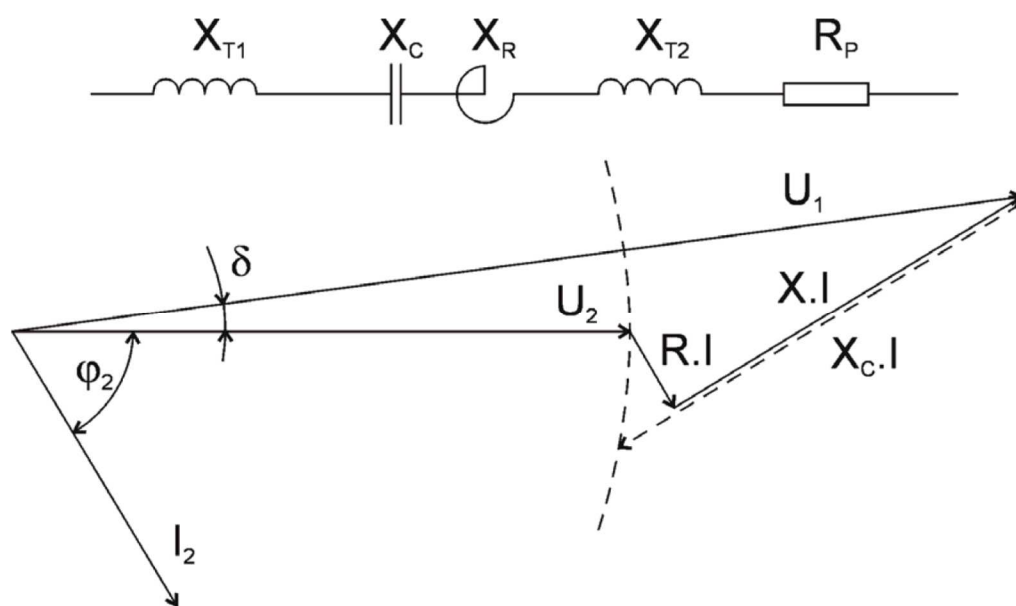
Přímou kompenzací je možno měnit výrobu induktivní energie v kompenzátoru v synchronizmu se spotřebou elektrické obloukové pece. Připojení pevné kondenzátorové baterie není příliš vhodné

řešení, protože takto zapojená kondenzátorová baterie nedokáže reagovat na potřeby proměnlivého induktivního proudu pece. Pevnou kompenzaci lze tedy využít především při kompenzaci proudu na prázdnou pecní transformátoru, případně ke kompenzaci tzv. stálé složky spotřeby Q_c . Vhodnějším způsobem kompenzace je použití více stupňovitého spínání kompenzační baterie pomocí tyristoru. Ke spínání je použito antiparalelní zapojení dvou tyristorů. Díky použití tyristorových spínačů je spínání kompenzačních stupňů velice rychlé. Tyto tyristorové spínače neobsahují žádné pohyblivé části, a proto dosahují dlouhé životnosti. Kompenzační zařízení je možno realizovat jako symetrické nebo i pro kompenzaci nesouměrného zatížení. Doba reakce na změny induktivního proudu a sepnutí tyristorového spínače se pohybuje okolo 30ms.

3.5.5 Serio-paralelní kompenzace elektrické obloukové pece

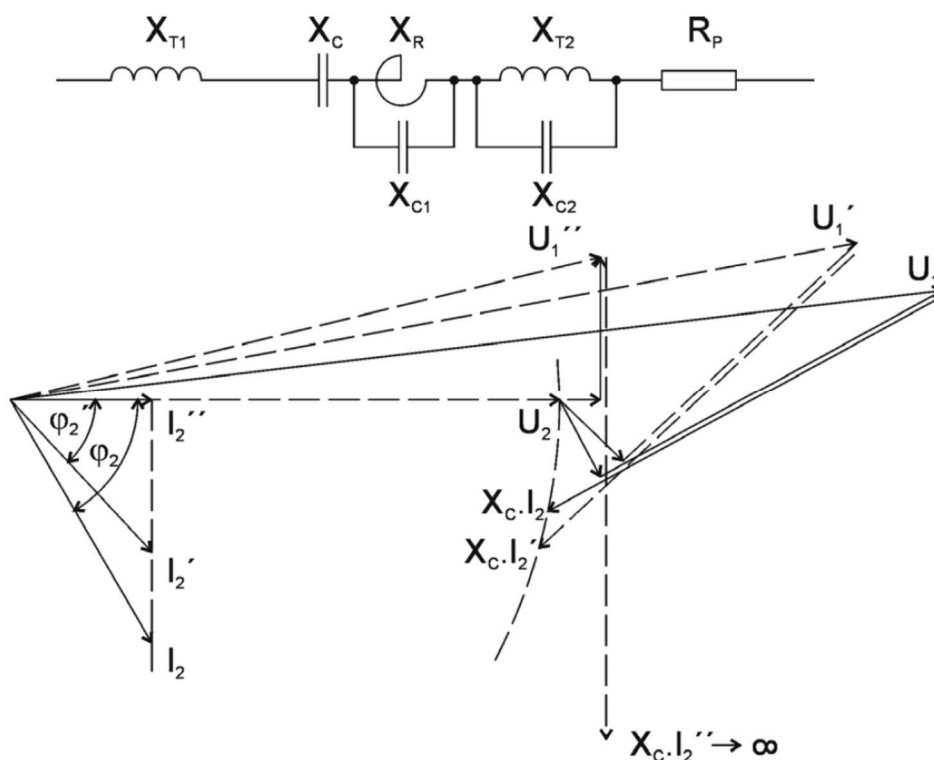
Sériová kompenzace řeší zejména zvýšení a stabilizaci napětí v síti, zatímco paralelní kompenzací dosáhneme zlepšení účinníku omezením zdánlivého proudu o příslušnou složku jalového proudu, dodaného kondenzátorovou baterií přímo v místě spotřeby. Na obr. 3.19 je nakreslen vektorový diagram napětí a proudu elektrické obloukové pece.

Čárkovaně je vynesena vektor napětí $X_c \cdot I$, tedy velikost napětí, které by bylo nutno vykompenzovat sériově zařazeným kondenzátorem, aby byla splněna podmínka $\Delta U = 0$.



Obr. č. 3.19 Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece [3]

Jestliže zařadíme do obvodu v horní část paralelní kondenzátor X_{C1} , kompenzující spotřebu jalové energie tlumivky X_R , pak vektorový diagram napětí a proudů se změní následovně (viz. obr. 3.20).



Obr. č. 3.20 Vektorový diagram serio-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece [3]

Zdánlivý proud I_2 zmenší svoji hodnotu na I_2' a rovněž úhel φ_2 se zmenší na φ_2' . Vektorový diagram úbytků napětí, odpovídající činnému odporu pecního obvodu a jeho reaktanci, je znázorněn plnou čarou dochází tedy proti původnímu stavu k zmenšení obou složek úbytků napětí.

Jestliže teoreticky vykompenzujeme účinník pece až na $\cos\varphi=0$, pak při nulovém úhlu bude vektor reaktančního úbytku napětí kolmý k vektoru napětí U_2 . Obě složky reaktančního napětí i činného úbytku napětí ΔU budou mít v tomto případě nejmenší hodnotu. Přesto však vektor $X_C \cdot I_2''$ neprotíná kružnici označující geometrické místo bodů o napětí U_2 a tedy konverguje k nekonečnu.

$$X_C \cdot I_2'' \rightarrow \infty \quad (2.56)$$

V případě, kdy $\varphi_2''=0$, není možno splnit podmínku $\Delta U=0$. Lze tedy konstatovat, že činná složka úbytku napětí podstatně ovlivňuje svojí hodnotou velikost kompenzačního výkonu sériového kondenzátoru stejně tak, jako úhel φ_2 mezi proudem a napětím pecního obvodu. Můžeme tedy napomáhat celkovému efektu sériové kompenzace napětí paralelní kompenzací účinníku jen za toho předpokladu, že činná složka úbytku napětí je mnohem menší než složka reaktančního úbytku napětí. Potom stačí vykompenzovat reaktanční úbytek napětí podle zvoleného stupně kompenzace a malý činný úbytek napětí ponecháme nevykompenzován.

Při velmi malém činném úbytku napětí kompenzované sítě s elektrickými obloukovými pecemi je současná paralelní kompenzace účiníku velmi výhodná a poskytuje značné velké nákladů na kompenzační výkon sériových kondenzátorů.

Závěrem lze tedy říci, že sériová kompenzace je tím účinnější, čím je větší úhel mezi vektory napětí a proudu, tedy horší účiník.

4. Návrh možného řešení pro zlepšení kvality elektrické sítě v síti elektrické obloukové pece firmy Metalurgie s.r.o.

4.1. Naměřené průběhy ve „Slévárně TS2“ v podniku Metalurgie s.r.o. Chrudim

Poprvé se měření odehrálo dne 15.5.2014 v rozvodně TS 20 na straně VN přes proudový transformátor s převodem 1200/5A a přes napěťový transformátor 6000/100V. Měření probíhalo při 2 tavných obloukové pece s výkonem 3MVA. Cílem měření bylo zjištění úrovně flickeru na straně VN a následný návrh opatření pro snížení úrovně flicker efektu a pro udržení neutrálního účinníku obloukové pece.

Výkon pecního transformátoru je 3 MVA a tonáž pece je 5 tun/vsázka. Celý tavíci cyklus trvá okolo 90 minut.

Z provedených měření vyplívá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přírodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecních transformátorů je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

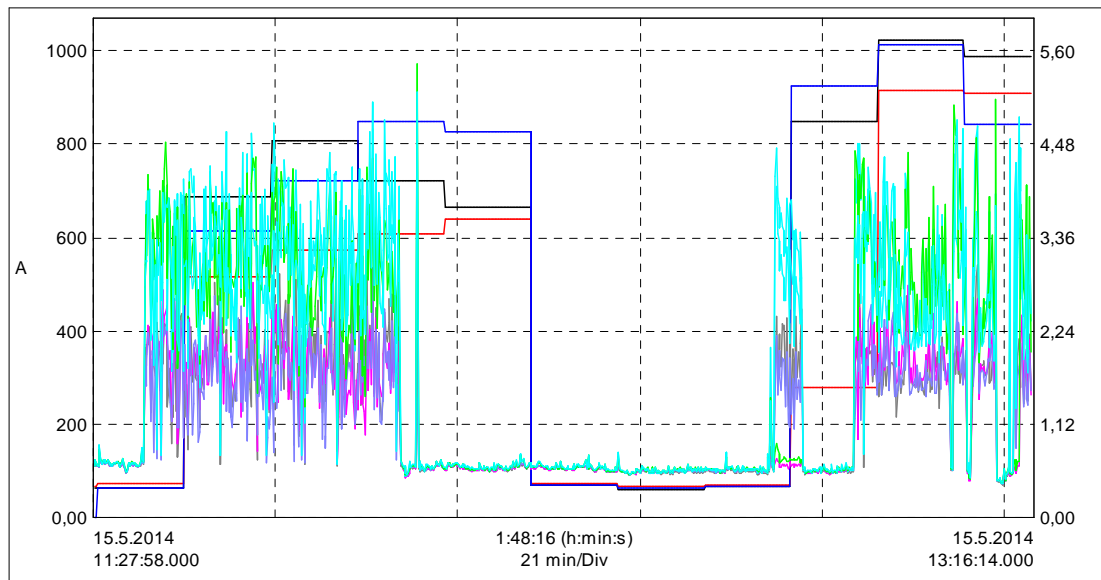
Měření č.1

Měření č.1 probíhalo od 11:27 do 13:16. Na tomto měření je vidět část první tavný (natavování), přičemž náběh obloukové pece trval od 11:33 do 12:07, pak následoval výpadek. V čase 12:55 došlo k opětovnému náběhu obloukové pece až po ustálené tavení v čase 13:16.

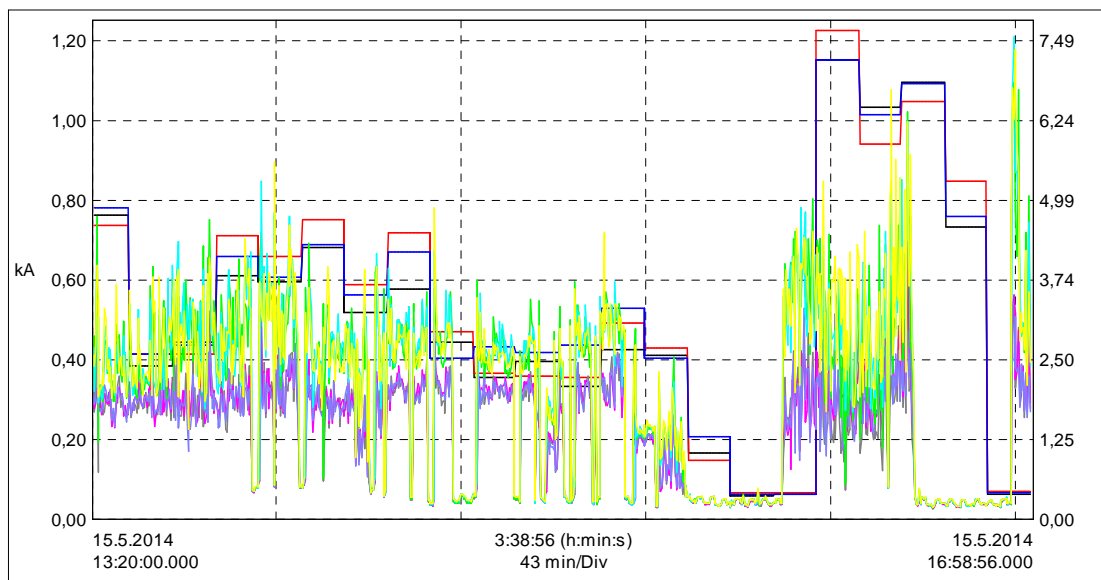
Na následujících dvou grafech jsou zachyceny vlivy provozu obloukové pece na úroveň flicker efektu (na straně VN). Proudy jsou znázorněny světle a náleží jim levá stupnice, flicker efekty jsou tmavé a patří jim pravá stupnice.

Měření č.2

Toto měření začalo v čase 13:20 při ustáleném tavení 1. tavby. V 16:00 začalo natavování 2. tavby. V 16:30 došlo k přerušení 2. tavby z důvodu závady.



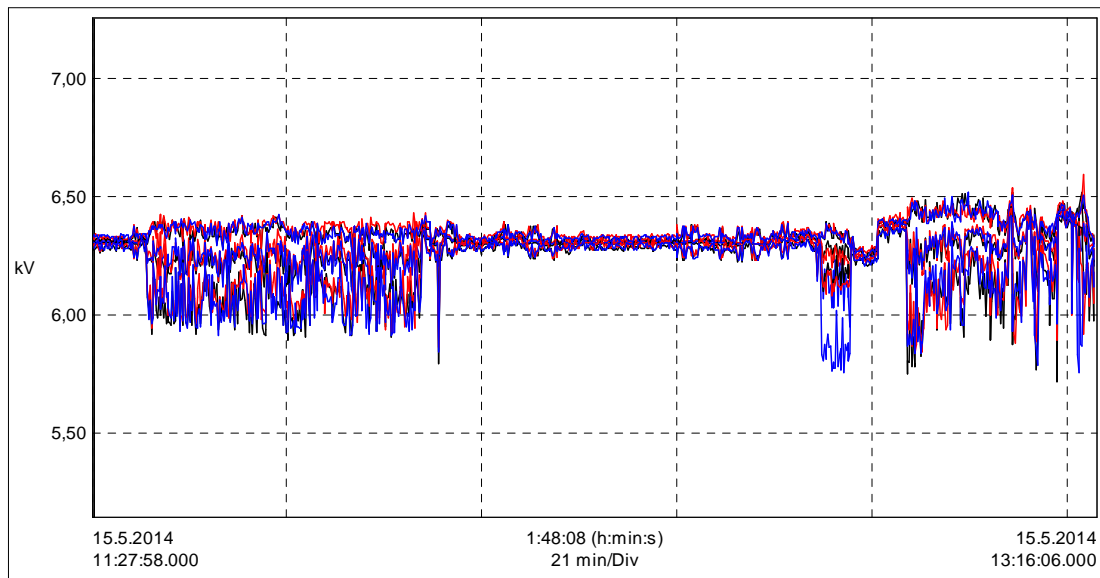
Obr. č. 4.1 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.1



Obr. č. 4.2 Průběh proudu a úrovně flickeru P_{st} na straně VN při měření č.2

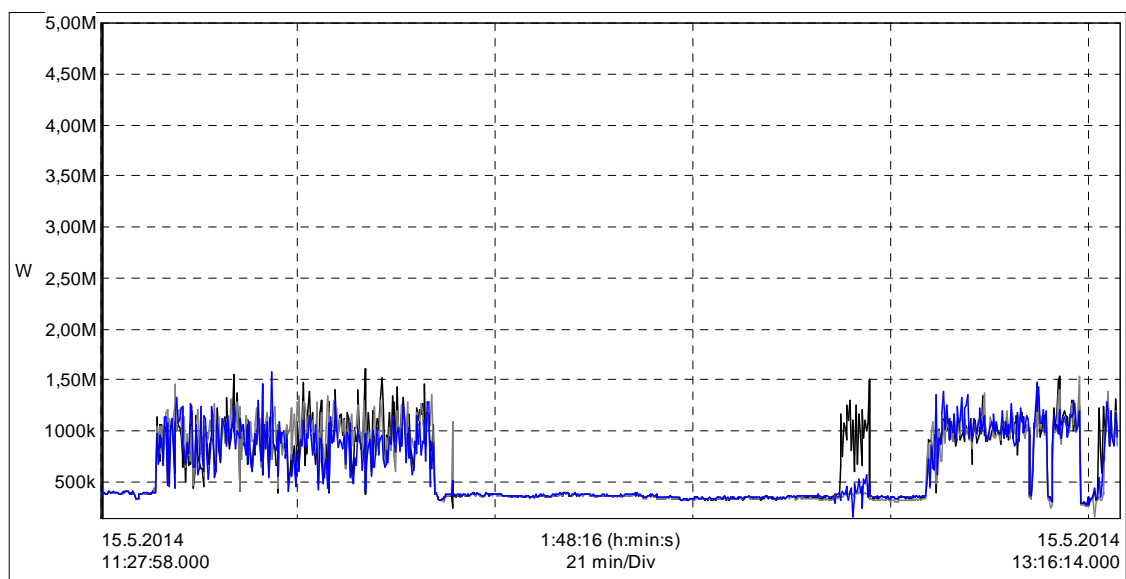
Z těchto dvou grafů můžeme vidět, že při provozu obloukové pece přesahuje úroveň krátkodobého nepříznivého vjemu flicker efektu P_{st} hodnoty na straně VN 2,1 – 7,6 krát (na straně NN dokonce 1,4 – 13,7 krát). Povolená mez je stanovena normou ČSN EN 61000-3-3 ed.3 na hodnotu $P_{st} = 1$ (vzorkování po deseti minutách)

Na dalším grafu je vidět kolísání napětí na straně VN při měření č.1. Při provozu elektrické obloukové pece kolísá napětí mezi 5,8 – 6,6 kV. K největšímu kolísání napětí dochází při natavování vsázky.



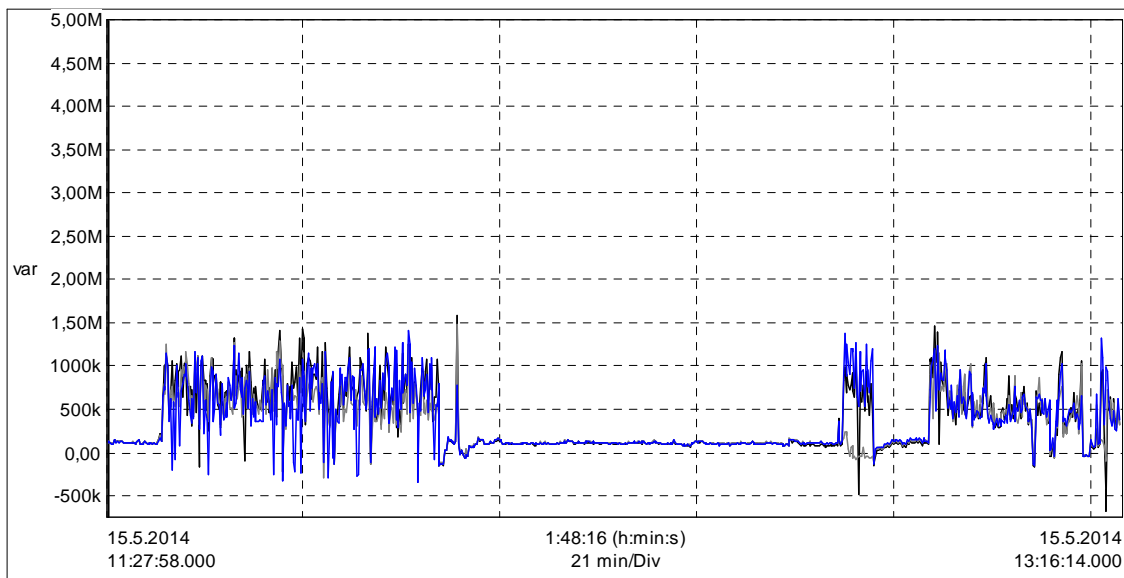
Obr. č. 4.3 Kolísání napětí na VN straně při měření č.1

Na následujícím grafu jsou vidět činné výkony jednotlivých fází. Černá znázorňuje fázi L1, šedá fázi L2 a modrá fázi L3.



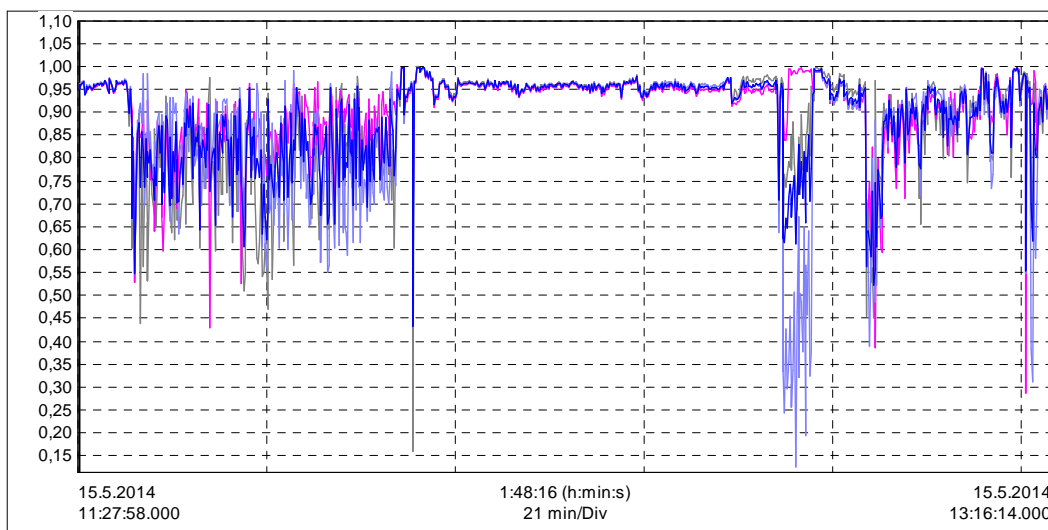
Obr. č. 4.4 Průběhy činných výkonů jednotlivých fází

Na dalším grafu jsou zobrazeny průběhy jalových induktivních výkonů. Barevné znázornění jednotlivých fází odpovídá předešlému grafu.

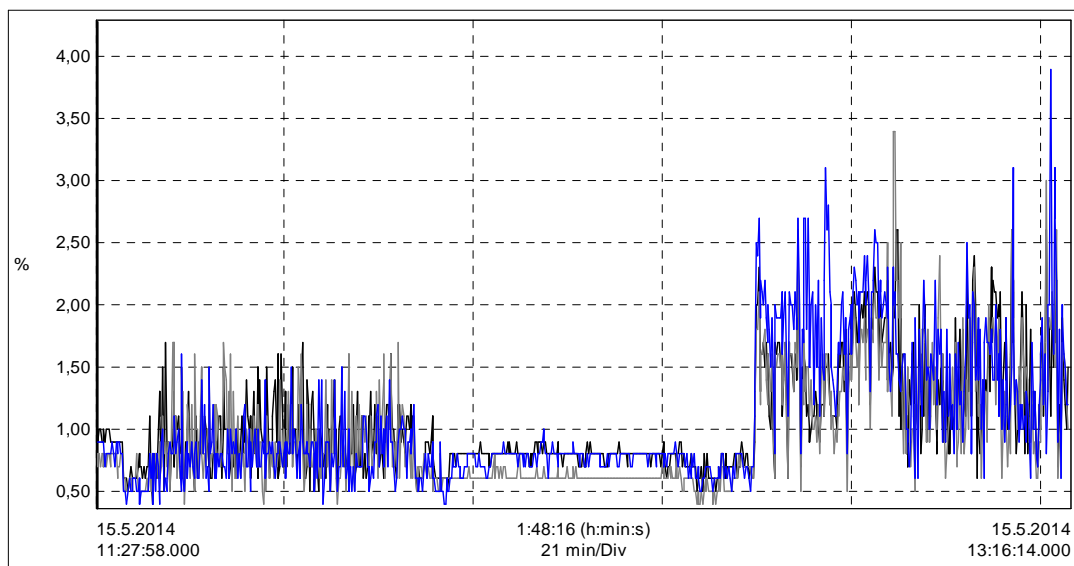


Obr. č. 4.5 Průběhy jalových induktivních výkonů jednotlivých fází.

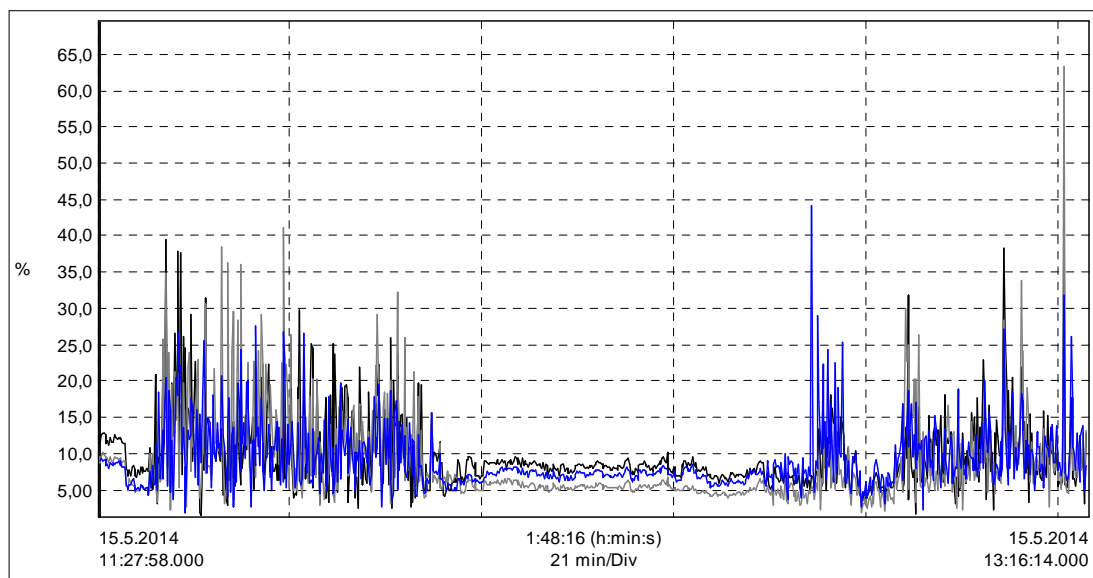
Účinník se při měření č.1 pohyboval v hodnotách znázorněných na následujícím grafu.



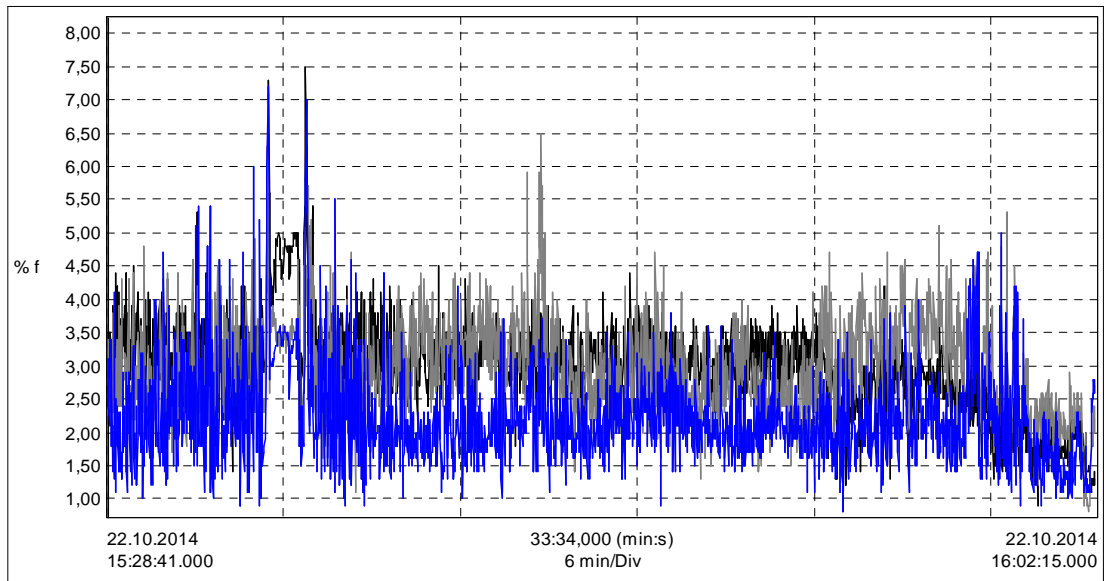
Obr. č. 4.6 Průběh účinníku $\cos\varphi$ při měření č.1



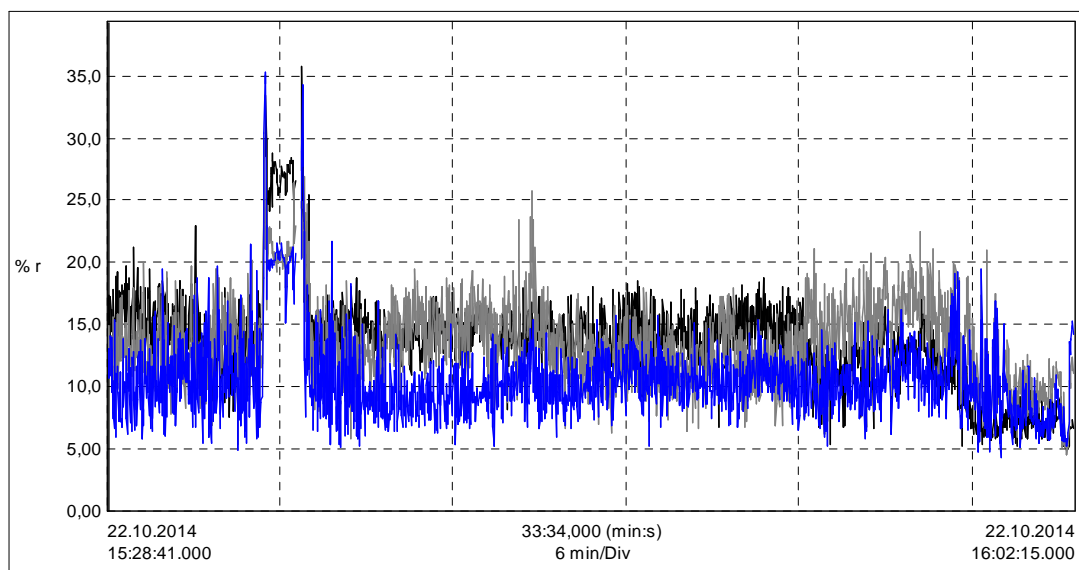
Obr. č. 4.7 Celková hodnota napěťových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.8 Celková hodnota proudových harmonických na straně VN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.9 Celková hodnota napěťových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.10 Celková hodnota proudových harmonických na straně NN (základní harmonická 50Hz je 100%)

Po prvním měření se uskutečnilo dodatečné měření na NN straně u vypínače kompenzace. Nativování probíhalo od 15:28 do 16:00. Měření bylo určeno hlavně k změřeni harmonických na straně NN, které se při prvním měření nezaznamenávaly.

Z výše uvedených grafů je vidět, že jalový výkon se skokově mění v řádech jednotek sekund, a proto není možné použití klasicky spínaných kompenzačních stupňů pomocí stykačů, ale musíme použít bezkontaktní tyristorové spínače. Při použití těchto tyristorových spínačů a regulátoru jalového výkonu s rychlou regulací je možné provádět regulaci každých 20 - 30ms. 20ms (délka jedné periody) potřebuje regulátor k měření a vyhodnocení naměřených hodnot a dalších 10ms potřebuje tyristorový spínač k sepnutí kondenzátoru při minimálním rozdílu napětí sítě a napětí kondenzátoru. Klasické vzduchové stykače dokáží spínat 5 – 6 krát za sekundu, ale samotné kondenzátory jsou konstruovány s dobou vybíjení 1 minuta. Při použití klasických vzduchových stykačů by takováto kompenzace nedokázala dostatečně rychle reagovat na změny v síti a docházelo by k nedokompenzování a nebo k překompenzování sítě.

Dále je nutné, aby použité kondenzátory byli v sérii zapojeny s předřadnými hradíci tlumivkami. Tyto tlumivky jsou konstruovány tak, aby tvořily s kondenzátory sériový rezonanční RLC obvod, jehož rezonanční frekvence je zvolena dle frekvence dominantní harmonické (v našem případě je to 5. harmonická – 250Hz). Resonanční frekvence je zvolena pod úroveň dominantní harmonické, v našem případě je standardně vyráběná řada s rezonanční frekvencí 189Hz (činitel zatlumení 7%). Zatlumení kompenzačních kondenzátorů zaručuje, že kondenzátory nebudou při provozu napětově a proudově namáhány vyššími harmonickými. Je taky nutné dodržet to, aby rezonanční frekvence nebyla stejná, nebo příliš blízko frekvenci signálu HDO. Pokud by se tak stalo docházelo by k proudovému přetěžování kompenzace a k odsávání signálu HDO ze sítě, a to by mohlo mít za následek nefunkčnost některých zařízení, která tento signál využívají.

Z provedených měření vyplývá že dochází k několikanásobnému překročení úrovně flicker efektu jak na straně NN tak i na straně VN. Toto má zásadní vliv na ostatní odběratel v místě připojení. Z těchto důvodů je provoz obloukové pece omezen pouze na odpolední hodiny, tak aby ostatní odběratelé byli co nejméně omezováni.

Pro zlepšení úrovně flicker efektu je nutné zvětšit zkratový výkon sítě. Nejlépe by toho bylo možné dosáhnout celkovou rekonstrukcí napájecí sítě od předávacího místa energetiky až po obloukovou pec. Tato rekonstrukce by vyžadovala výměnu transformátorů za transformátory s vyšším výkonem a tedy i s vyšším zkratovým výkonem a dále výměnu všech silových obvodů sítě, jako jsou přívodní kabely, přípojnice, apod. . Následně by musela proběhnout instalace kvalitně navržené kompenzace, která by výrazně přispěla ke zvýšení zkratového výkonu sítě a také by kompenzovala jalový výkon obloukové pece a předešlo by se tím nedodržování účinníku ve stanovených mezích. Toto řešení bylo projednáno se zástupci Metalurgie, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti a nutnosti odstávky provozu na delší dobu bylo toto řešení zavrhnuto. Jako jediné možné řešení se jeví instalace nové paralelní kompenzace na straně NN a pokud by to bylo nutné tak i na straně VN. Umístění kompenzace na sekundární stranu pecního transformátoru je z důvodu možného přepínání odboček a značného obsahu vyšších harmonických problematické. Jako možné místo připojení NN kompenzace se nabízejí dva transformátory T201 a T202, na jejichž sekundární stranu by se připojila NN kompenzace a tyto transformátory by pracovali v paralelním provozu.

Z důvodu rychlých změn proudů obloukové pece je nutné použít ke spínání kompenzačních kondenzátorů tyristorové spínače. Tyristorový spínač je kombinací dvou antiparalelně zapojených tyristorů.

4.2 Návrh kompenzačního zařízení pro elektrickou obloukovou pec ve slévárně Metalurgie s.r.o. Chrudim

Na základě výše uvedených skutečností jsem navrhnul pro snížení hodnoty flicker efektu a pro kompenzaci účinníku v síti obloukové pece dva hrazené kompenzační rozváděče s rychlým spínáním kompenzačních stupňů. Tyto kompenzační rozváděče budou připojeny na sekundární straně transformátorů T201 a T202. Jedná se dva identické kompenzační rozváděče, k jejichž řízení bude sloužit jeden regulátor, který bude paralelně spínat stejné stupně v obou kompenzacích.

Při měření č.1 a č.2 byla stále v provozu ještě stávající kompenzace. Celkový kompenzační výkon tak byl odvozen z naměřených hodnot a z velikosti stávající kompenzace. Stávající kompenzace, ale byla řízena regulátorem QERP, který dostává hodnoty jalového výkonu z elektroměru pomocí impulsních výstupů, a tak není schopen reagovat na náhlé změny jalového výkonu pece. Účinník je proto touto kompenzací regulován zcela minimálně a to hlavně v době natavování vsázky. Navíc díky pomalé regulaci tohoto regulátoru nedochází téměř k žádnému potlačení flickeru a navíc tato kompenzace pozdě odpíná kompenzační stupně a tak tato kompenzace může překompenzovávat (dojde k dodávce kapacitního jalového výkonu do sítě).

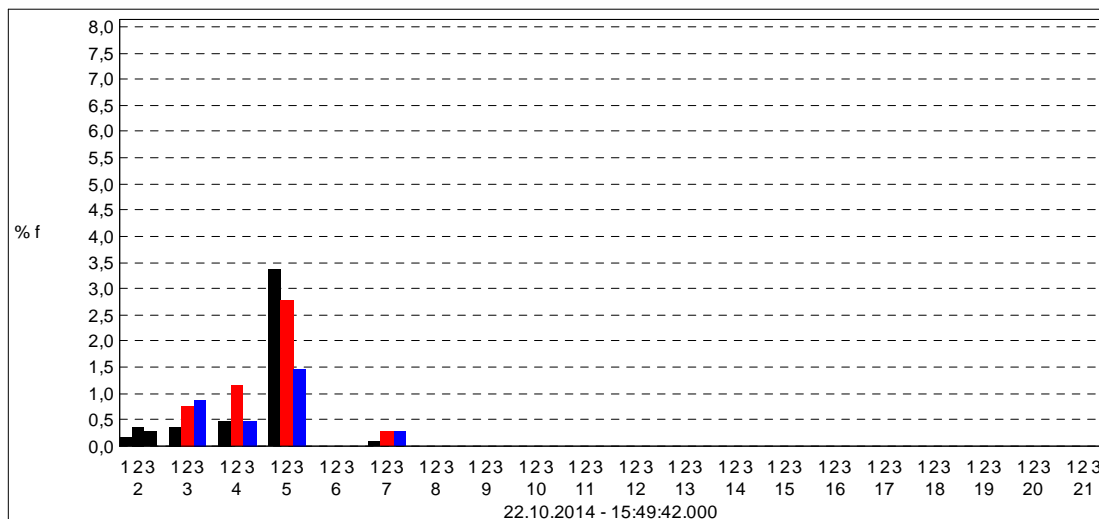
V následující tabulce č. 4.3 jsou uvedeny parametry navrhovaného kompenzačního rozváděče. Celkově se jedná tedy o dvě stejné kompenzace s jedním regulátorem. První kompenzace se připojí na stávající přípojnice po současné kompenzaci na transformátoru T201 a druhá se připojí stejně akorát na transformátor T202. Zapojení stávající kompenzace je vidět na obrázku č. 4.13.

Jako první kompenzační stupeň byl zvolen kondenzátor s kompenzačním výkonem 25kVar. Nižší hodnota jalového výkonu prvního kompenzačního stupně už by byla zbytečná, a regulátor by tak menší stupeň příliš často spínal bez většího vlivu na celkový účinník a na úroveň flicker efektu.

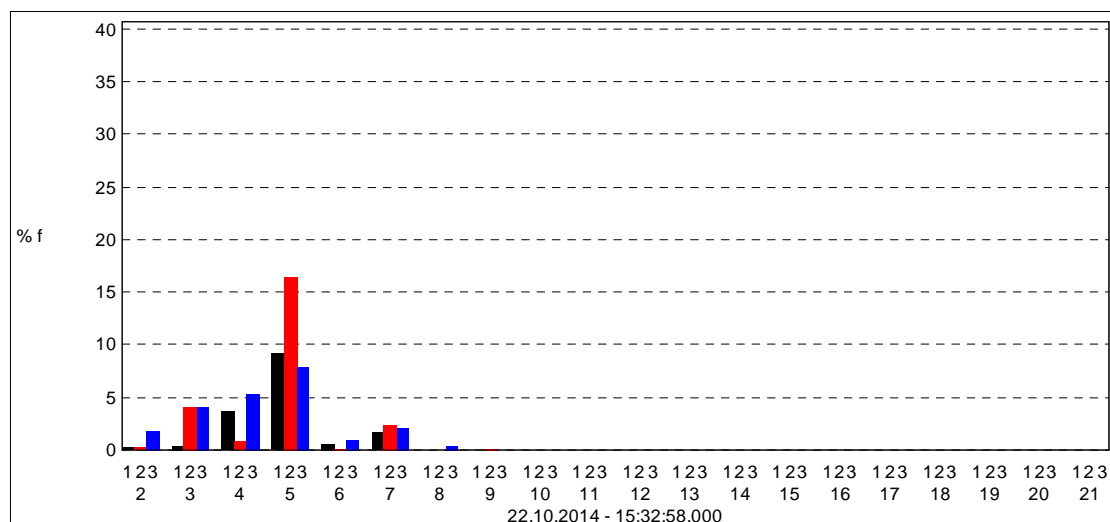
Kompenzace je v hrazeném provedení, a to z důvodu vyšších harmonických v síti a z důvodu omezení strmosti nárůstu proudu při spínání kondenzátorů tyristory. Pokud by strmost nárůstu proudu di/dt byla větší, než dovoluje výrobce tyristorů, mohlo by dojít k destrukci polovodičové vrstvy tyristoru. Dále musíme pro jištění tyristorů použít speciální pojistky s charakteristikou gR nebo aR, které nám zaručují, že při zkratu vybaví pojistky dříve, než dojde k poškození tyristoru.

Z grafu č. 4.11 a 4.12 je vidět, že dominantní harmonickou je 5-tá (250Hz) a proto byla rezonanční frekvence seriového zapojení tlumivky a kondenzátoru zvolena na hodnotu 189Hz (činitel ztlumení $p=7\%$).

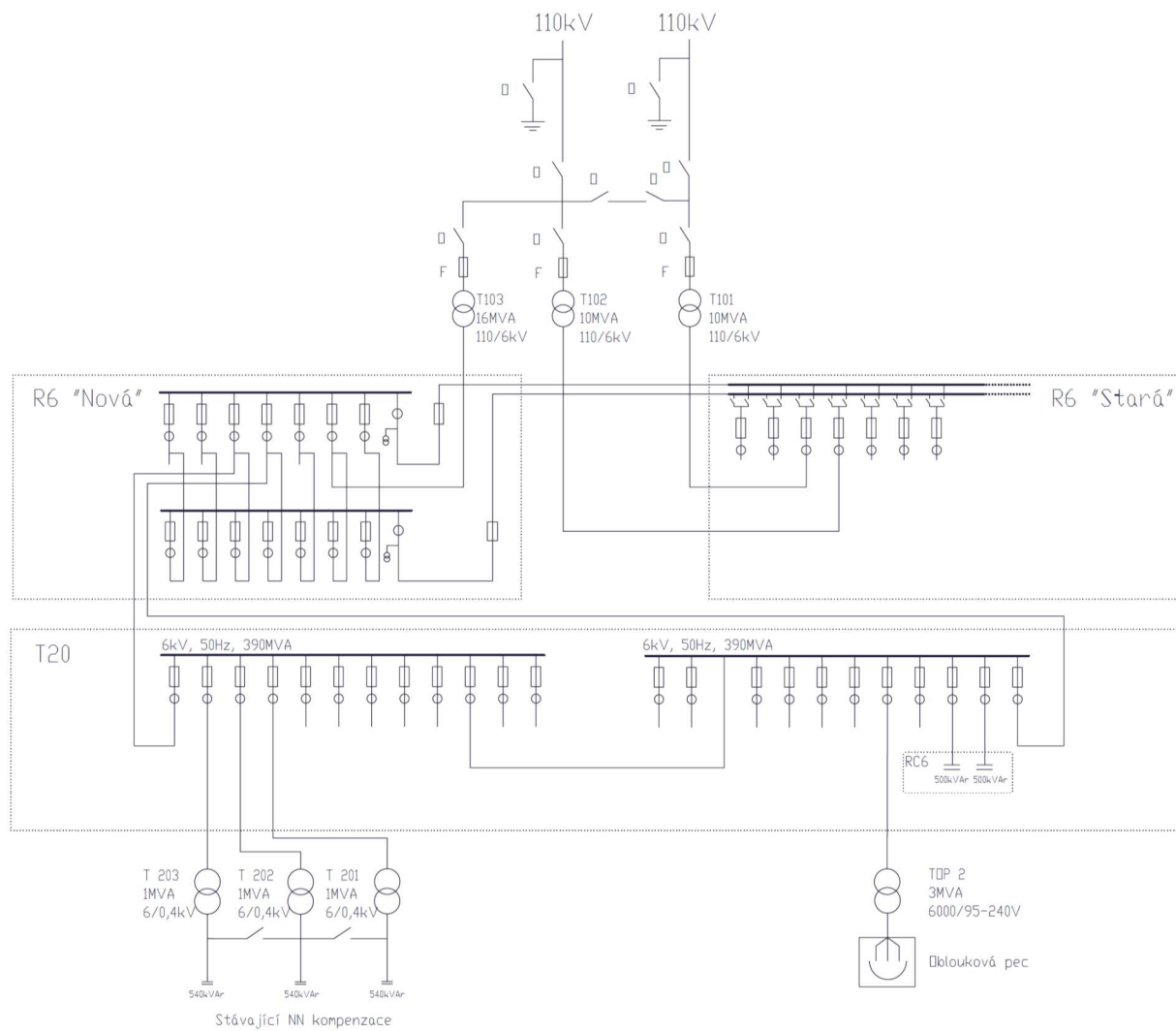
V příloze č.1 a č.2 je vidět schéma kompenzačního rozváděče a jeho model.



Obr. č. 4.11 Jednotlivé napěťové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



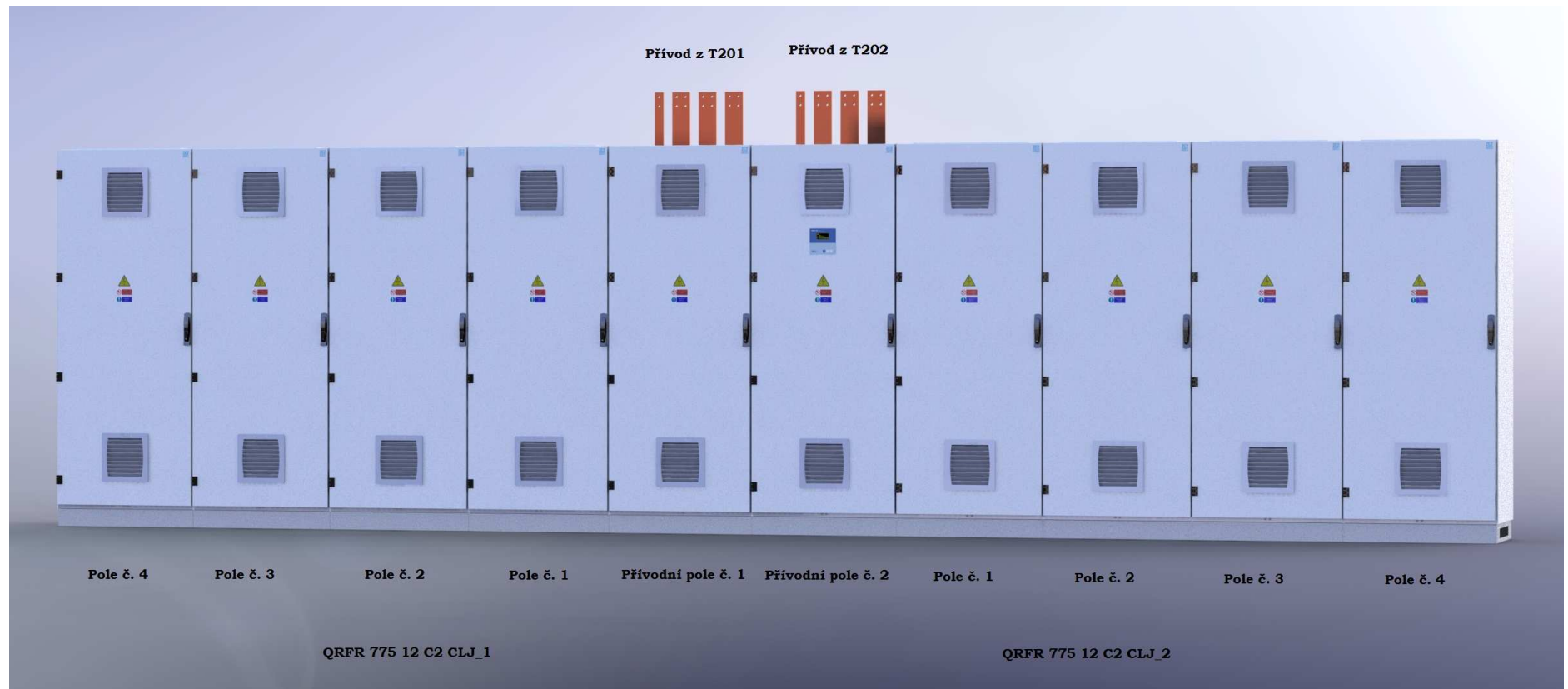
Obr. č. 4.12 Jednotlivé proudové harmonické (základní harmonická 50Hz je 100%)



Obr. č. 4.13 Schéma zapojení stávajících kompenzačních rozváděčů

Tab. č. 4.1 Parametry kompenzačního rozváděče

RYCHLÝ HRAZENÝ KOMPENZAČNÍ ROZVÁDĚČ NN		
Typ		QRFR 775 12 C2 CLJ
Napěťová soustava	-	3/PEN 400/230 V AC, 50 Hz, TN-C
Jmenovitý kompenzační výkon	kvar	688,71
Jmenovitý instalovaný výkon	kvar	775,00
Jmenovitý proud	A	994
Zatlumení	Hz	189
Činitel zatlumení p	%	7
Nejmenší stupeň	kvar	25
Počet stupňů	-	12
Řazení (váhy) stupňů	-	1:2:2:2:2:2:2:4:4:4:4
Počet možností regulace	-	32
Situování přívodu	-	Pomocí stávajících přípojníc shora
Provedení přívodu	-	připraveno pro připojení na přípojnice
Hlavní prvek přívodu	-	Výkonový jistič 1600A
Počet polí	-	5
Zkratová odolnost	kA	65
Spínání kompenzačních stupňů	-	Tyristorové moduly CTU
Regulace (regulátor)	-	FCR12TRX-12
Kondenzátory	-	ZEZ SILKO, 440V , 50Hz, 3f, přetlakový odpojovač, vybíjecí rezistory
Tlumivky	-	ZEZ Cuk, 400/440/189, 50Hz, 3f, tepelná poj.
Větrání	-	nucené
Krytí	-	IP40/00
Teplota prostředí	-	vnitřní provedení 5°C / max. 40 °C, nejvyšší střední hodnota za 24 hod. max. 35 °C
Vnější vlivy	-	vnitřní provedení - třída vlivu dle ČSN 33 2000-5-51- prostory normální
Proudový obvod regulátoru	-	x/5 A nebo x/1 A, max. spotřeba 1 VA
Provedení skříně	-	oceloplechová
Rozměry zařízení - š x v x h	mm	4000x2100x600
Hmotnost	kg	1660



Obr. č. 4.14 Kompenzační rozváděče QRFR 775 12 C2 CLJ_1 a QRFR 775 12 C2 CLJ_2

5. Přínos kompenzačního rozváděče pro zlepšení kvality sítě elektrické obloukové pece

Přínos kompenzačního rozváděče na zlepšení úrovně flickeru a zlepšení hodnoty účinníku nebylo možné na místě ověřit, protože nedošlo k realizaci z finančních důvodů. Proto bude přínos kompenzačního rozváděče simulován na matematickém modelu elektrické obloukové pece.

5.1 Matematický model obloukové pece

Matematický model obloukové pece [10] se skládá z modelu sítě a modelu samostatné pec. Pro účely ověření funkčnosti kompenzace jsem využil stávající model, u kterého jsem upravil parametry prvků v obvodu tak, aby přibližně odpovídaly chování reálné obloukové pece při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Schéma matematického modelu je v příloze. Výsledná rovnice 2.57 popisující vodivost oblouku a tak i jeho chování vznikla spojením Cassiho modelu pro velké proudy a Mayerova modelu pro malé proudy oblouku.

$$G = G_{min} + \frac{vi}{(A+Bl)^2} \left(1 - e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} \right) + \frac{i^2}{P_0} e^{\left(\frac{-i^2}{I_0^2}\right)} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (2.57)$$

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 e^{\left(\frac{-\alpha}{|i|}\right)} \quad (2.58)$$

G.....vodivost oblouku

G_{min}minimální vodivost prostředí mezi elektrodami ve stavu kdy nehoří oblouk

v.....napětí oblouku

i.....proud oblouku

A.....konstanta oblouku

B.....konstanta oblouku

l.....délka oblouku

P_0ztrátový výkon oblouku

θčasová deionizační konstanta

θ_0minimální deionizační konstanta

θ_1proměnlivá deionizační konstanta

Matematický model se snaží věrně napodobit chování obloukové pece při natavování, kdy se velice často a výrazně mění délka oblouku a dále pro ustálenou tavbu, kdy se už je délka oblouku poměrně konstantní. Bohužel jsem neměl možnost měřit přímo na sekundární straně pecního transformátoru a tak nedokáži úplně přesně porovnat průběhy reálné pece a matematického modelu, ale snažil jsem se, aby byly parametry co nejvíce podobné, tak aby bylo možné alespoň částečně objektivně posoudit přínos kompenzace na změnu úrovně flicker efektu.

5.2 Zhodnocení vlivu kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu a účinníku sítě

Dle očekávání se flicker efekt pece na straně VN (6kV) s použitím kompenzace snížil. Hodnoty vzešlé z matematického modelu nejsou úplně stejné, jako ty které bychom získali z reálného měření na peci. Toto je způsobeno především neznalostí reálných parametrů obloukové pece, které se zřejmě liší od parametrů pece v matematickém modelu. Simulace použití kompenzačního zařízení s rychlým spínáním kompenzačních stupňů především dokázala, že kompenzační zařízení má pozitivní vliv na úroveň flicker efektu v síti s elektrickou obloukovou pecí. Dále dle očekávání došlo k výraznému zlepšení účinníku sítě. Simulace proběhla při dvou stavech obloukové pece, a to při natavování vsázky a při ustálené tavbě. Výsledné hodnoty P_{ST} (short time flicker effect) pro oba stavy pece s kompenzací a bez kompenzace jsou uvedeny v následující tabulce č. 4.4.

Tab. č. 4.2 Výsledné hodnoty

Natavování vsázky		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	5,3	4,4
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,41	0,37
PF	0,55 - 1	0,75 - 1
Ustálená tavba		
	Bez kompenzace	S kompenzací
F_{ST} 5s VN 6kV	0,65	0,6
F_{ST} 5s VVN 110kV	0,13	0,13
PF	0,6 - 1	0,75 - 1

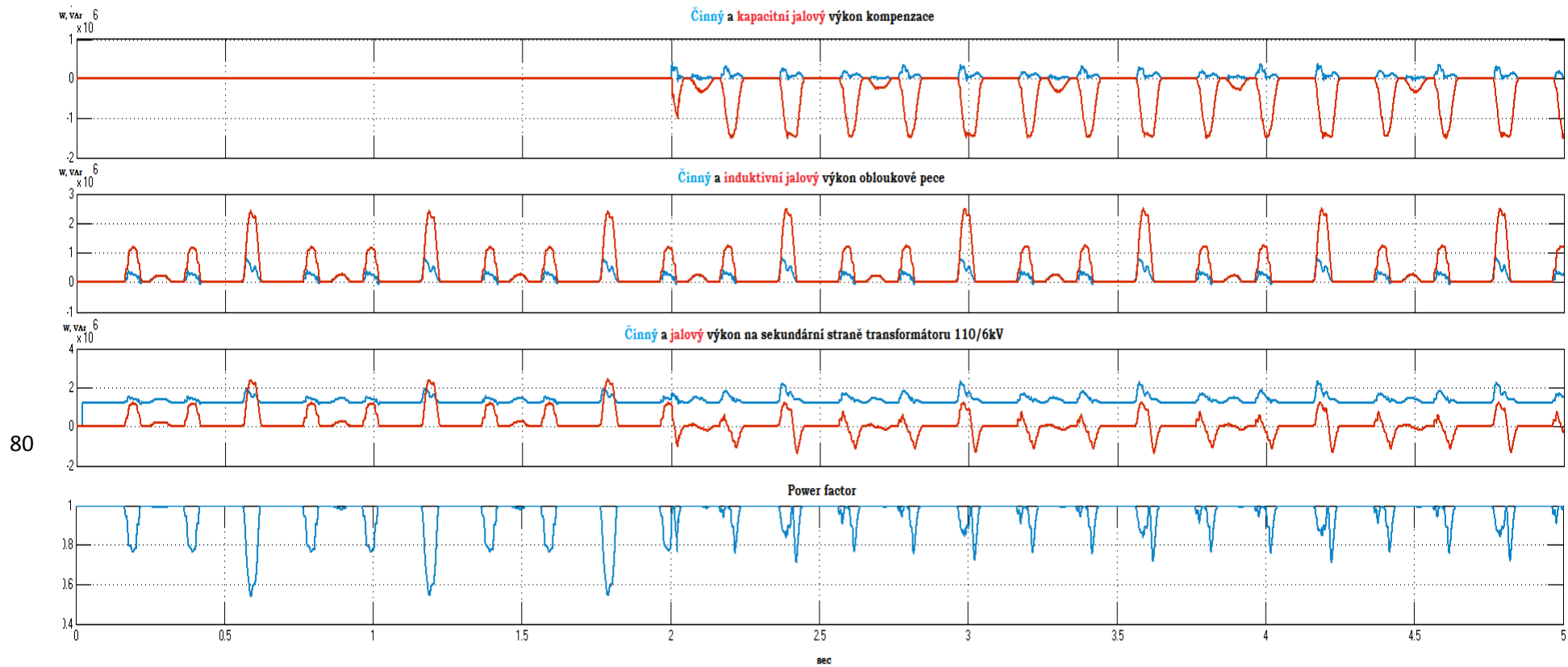
Z výsledných hodnot je vidět, že příznivý vliv kompenzačního rozváděče na úroveň flicker efektu v síti se projevuje především při natavování vsázky, kdy se často mění délka oblouku a následně proud obloukovou pecí. Při těchto změnách umožňuje kompenzace s rychlým spínáním kompenzačních stupňů skoro okamžitě reagovat na změnu velikosti jalového výkonu pece a jeho vykompenzováním tak snížit úbytky napětí a úroveň flicker efektu. Kromě snížení úrovně flicker efektu dojde také k zlepšení účinníku

sítě, a tak se provozovatel vyhne pokutám ze strany dodavatele elektrické energie za nedodržení účinníku v rozmezí 0,95 až 1 (induktivní charakter odběru). V reálné síti pro kterou byla kompenzace navrhována se nachází další odběry činného a jalového výkonu, a tak by se účinník při provozu kompenzace pohyboval v rozmezí hodnot 0,95 – 1.

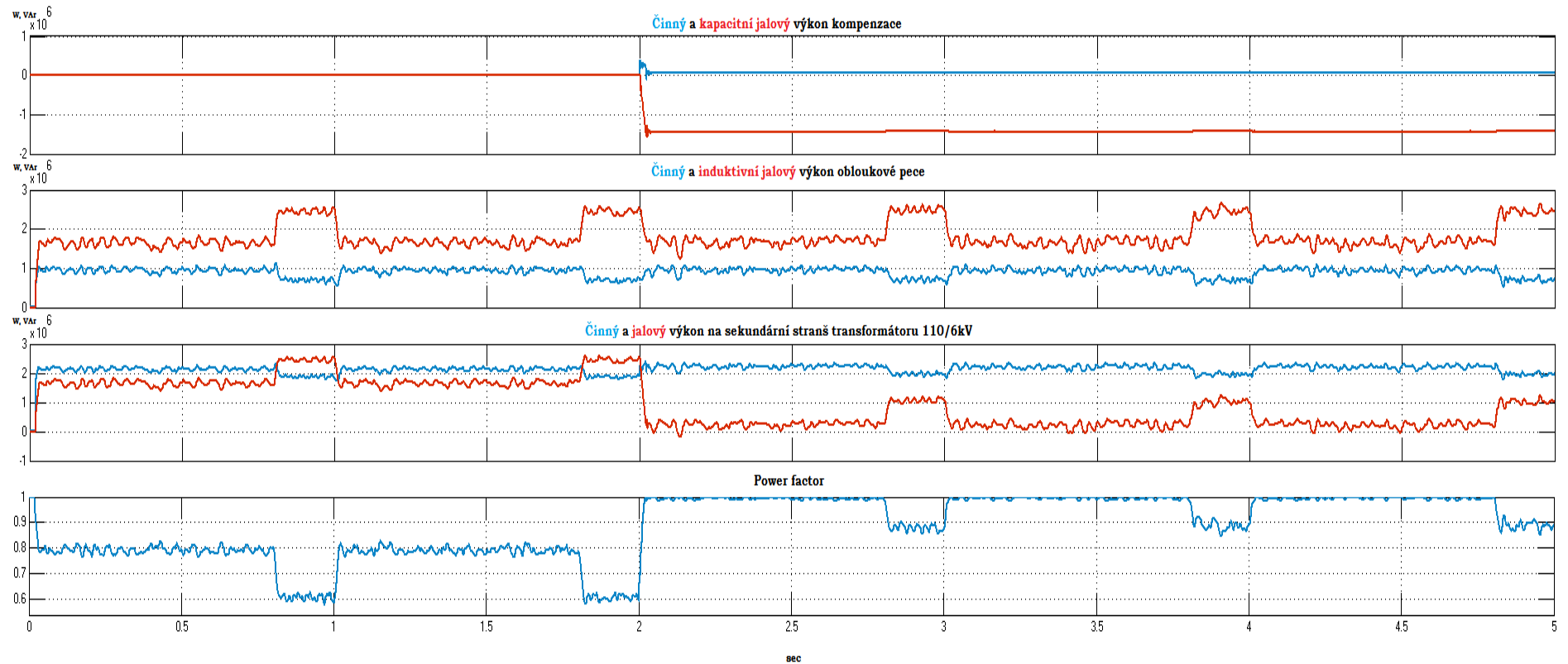
Při ustálené tabbě už nedochází k tak častým a velkým změnám délky oblouku a velikosti proudu obloukové pece. Díky tomu se výrazně sníží úroveň flicker efektu v síti. V této fázi tabby už má kompenzace malý vliv na změnu hodnoty flicker efektu a slouží především ke kompenzaci účinníku sítě.

Z matematického modelu vyplývá, že hodnota flicker efektu při natavování vsázky klesla na straně VN 6kV z 5,3 bez kompenzace na hodnotu 4,4 s kompenzací. I tato hodnota nevyhovuje normě ČSN EN 61000-3-3 ed.3, která požaduje úroveň flicker efektu $P_{ST} \leq 1$, ale v reálném provozu může být situace odlišná a vliv kompenzace na úroveň flicker efektu větší. Power factor, tedy účinník spočítaný z celkového jalového výkonu včetně harmonických a meziharmonických, se zlepšil z hodnoty mezi 0,55 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.15 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). Při ustálené tabbě se úroveň flicker efektu skoro nezměnila. Power factor se z hodnoty mezi 0,6 - 1 na hodnotu 0,75 - 1 viz. obr. č. 4.16 (od 0s do 2s kompenzace vypnutá a od 2s do konce je kompenzace zapnutá). V síti s obloukovou pecí se v reálném provozu nachází další odběry činné a jalové energie, a tak by se účinník s použitím kompenzace pohyboval zase okolo hodnoty mezi 0,95 a 1.

V matematickém modelu kompenzace zvládne kompenzovat účinník pouze při hodnotě jalového výkonu nad 50 kVAr, ale v reálném provozu je hodnota odběru činného a jalového výkonu i při vypnuté obloukové peci dostatečně velká na to, aby první stupeň kompenzace 50 kVAr vyhověl požadavku na to, aby se účinník pohyboval v dovolených mezích.



Obr. č. 4.15 Průběhy výkonů a účinníku při natavování vsázky



Obr. č. 4.16 Průběhy výkonů a účinníku při ustálené tavně

6. Závěr

Cílem této práce bylo především prezentovat parametry pro posouzení kvality elektrické sítě a to konkrétně v síti s elektrickou obloukovou pecí. Parametry pro posouzení kvality sítě vycházejí z platných zákonů a norem České republiky. Dále jsem se pokusil poukázat na problémy, které způsobuje provoz elektrické obloukové pece v síti. Především jsem se zaměřil na zhoršení úrovně flicker efektu a zhoršení účinníku v síti s obloukovou pecí. Samozřejmě, že tyto dva parametry nejsou jediné, které se při provozu pece zhorší. Dále by se šlo zabývat zvýšením hodnoty harmonických, nesymetrickým zatížení sítě, atd. .

Tato práce mi posloužila k hlubšímu porozumění parametrů, které slouží pro posouzení kvality elektrické sítě a to především se spojitostí s elektrickou obloukovou pecí. Jelikož se touto tématikou zabývám i ve svém zaměstnání, snažil jsem si vybrat pro svůj návrh zlepšení kvality elektrické energie reálnou aplikaci, pro kterou jsem navrhl kompenzační zařízení. Bohužel však do dnešního dne nedošlo k instalaci kompenzačního rozváděče a tak jsem nemohl ověřit reálný pozitivní přínos kompenzace na síť s obloukovou pecí. Z těchto důvodů byl pro posouzení přínosu kompenzace použit matematický model obloukové pece. Matematický model jsem se snažil co nejvíce přiblížit reálným parametrům pece v závodě Metalurgie Chrudim, ale i tak se model od reálné pece v různých parametrech liší. I přes tyto rozdíly se ale prokázal pozitivní přínos kompenzace na zlepšení úrovně flicker efektu a účinníku v síti s obloukovou pecí. Doufám, že v budoucnosti bude možnost ověřit výsledky této práce i na reálném zařízení.

Seznam použité literatury

[1] ČSN EN 50160

[2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. Voltage quality in electrical power systems. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755

[3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

[4] TLUSTÝ, J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999

[5] ČSN EN 61000-3-3 ed. 3

[6] PNE 33 3430-1

[7] PNE 33 3430-4

[8] CHAPMAN, David. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Příčiny a účinky. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[9] FASSBINDER, Stefan. Kvalita elektrické energie – průvodce. Harmonické – Kondenzátory v prostředích s vyšším obsahem harmonických. <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-2-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

[10] TAVAKOLI Abdolreza, Mehdi EHSAN a Seyed Mohammad Tagie BATAHIEE. A SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Inactive Power Compensation by Using STATCOM. Journal of Applied Mathematics: Islamic Azad University of Lahijan. 2006, vol. 3, no.