



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Analýza pracovních charakteristik elektrických obloukových pecí

Analysis of operating characteristics of electric arc furnaces

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní odbor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Martin Čerňan

Petr Rázek

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Petr Rázek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Analýza pracovních charakteristik elektrických obloukových pecí**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled o elektrických obloukových pecích - princip, připojení do sítě, etapy pracovního cyklu.
- 2) Popište princip tvorby pracovních charakteristik pro různé podmínky provozu a najděte optimální nastavení.
- 3) Zpracujte přehled dopadů elektrické obloukové pece na kvalitu elektrické energie.
- 4) Analyzujte reálna data z měření na elektrické obloukové peci.

Seznam odborné literatury:

- [1] 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.
- [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] ČSN EN 50160

Vedoucí: Ing. Martin Čerňan

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

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 Praze, dne

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinovi Čerňanovi za cenné rady a výborný přístup při vedení diplomové práce.

Anotace

Předmětem této diplomové práce je analyzovat pracovní charakteristiky elektrické obloukové pece typu UHP. Součástí analýzy je zpracování naměřených dat, výpočet závislosti reaktančního poměru na účinníku a závislosti odporu oblouku na účinníku. Poslední část analýzy se bude zabývat výpočtem pracovních charakteristik elektrické obloukové pece a snížení jalového výkonu.

Klíčová slova: elektrická oblouková pec, reaktanční poměr, pracovní charakteristiky, jalový výkon, kvalita elektrické energie, vyšší harmonické

Abstract

The subject of this master thesis is to analyze the operating characteristics of electric arc furnace type UHP. The part of an analysis is data processing, calculation of the reactance ratio depending on the power factor and arc resistance depending on the power factor. The last part of the analysis will consider calculating the performance characteristics of the electric arc furnace and reducing the reactive power.

Key words: electric arc furnace, reactance ratio, harmonics, reactive power, electric energy quality, operating characteristics

Obsah

ÚVOD	9
1. ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE	11
1.1 Konstrukce elektrických obloukových pecí	12
1.1.1 Krátká cesta	13
1.1.2 Pecní transformátory	14
1.1.3 Pecní tlumivky	15
1.1.4 Indukční míchání taveniny.....	15
1.1.5 Elektrické schéma	16
1.2 Pracovní cyklus	17
1.2.1 Regulace elektrod	18
1.3 Požadavky na elektrizační soustavu v místě připojení	19
1.4 Vlivy na kvalitu elektrické energie	19
1.4.1 Napěťové nesymetrie	19
1.4.2 Kolísání napětí a flicker efekt	20
1.4.3 Vznik vyšších harmonických	20
1.4.4 Odebíraný jalový výkon	21
2. PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY	23
2.1 Konstrukce kruhového diagramu	23
2.1.1 Reaktanční poměr krátké cesty a odpor oblouku	25
2.2 Pracovní charakteristiky	27
3. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	28
3.1 Norma ČSN EN 50160	28
3.1.1 Síťová frekvence	29

3.1.2	Nesymetrie napájecího napětí.....	29
3.1.3	Odchyly napájecího napětí	29
3.1.4	Harmonická napětí	30
3.1.5	Flicker efekt	31
3.2	Opravdový účinník, deformační výkon.....	33
4.	SNÍŽENÍ VLIVU ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU	36
4.1	Kompenzace jalového výkonu	36
4.1.1	SVC zařízení	37
4.2	Omezení šíření vyšších harmonických.....	40
4.2.1	Pasivní filtry	41
4.2.2	Návrh pasivního filtru druhého řádu	44
4.3	Omezení flicker efektu	46
4.3.1	Úprava vstupního materiálu pro tavbu.....	46
4.3.2	Úprava výrobního procesu	47
4.3.3	Použití kyslíkových a plynových hořáků	47
4.3.4	Vhodná konfigurace sítě.....	48
4.3.5	Aktivní filtry	48
5.	PŘÍPADOVÁ STUDIE.....	51
5.1	Popis zkoumaného objektu	51
5.2	Výpočet závislosti reaktančního poměru na účinníku	52
5.3	Výpočet závislosti odporu oblouku na účinníku	54
5.4	Výpočet pracovních charakteristik	55
5.4.1	Pracovní charakteristiky	56
5.5	Výpočet kompenzační kapacity	62

5.6	Kompenzace jalového výkonu	63
	ZÁVĚR.....	69
	LITERATURA	71
	PŘÍLOHA A: PARAMETRY KRÁTKÉ CESTY.....	74
	PŘÍLOHA B: PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY	75
	PŘÍLOHA C: OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	86

Úvod

Již od počátku používání elektrických obloukových pecí pro průmyslové zpracování oceli se vyskytují problémy s rušením elektrizační soustavy spojené s jejich provozem. Protože se jedná o největší spotřebiče elektrické energie připojené k elektrizační soustavě, tak jejich vliv na kvalitu elektrické energie je značný. Proto je potřeba se zabývat analýzou jejich pracovních charakteristik. Problémy vznikající při provozu elektrických obloukových pecí můžeme rozdělit do dvou skupin, které spolu úzce souvisí, a to na problémy spojené s rušením elektrizační soustavy, do které je pec připojena a na problémy spojené s řízením tavby a její ekonomikou. Do první skupiny můžeme zařadit vznik napěťových nesymetrií, kolísání napětí způsobující flicker efekt, odběr jalového výkonu a vznik vyšších harmonických. Do druhé skupiny řadíme hlavně optimální nastavení pracovního bodu a s tím spojenou regulaci elektrod. Ať už se jedná o problémy rušení elektrizační soustavy či problémy spojené s řízením tavby a její ekonomiky, tak je potřeba tyto problémy řešit. Řešení těchto problémů nebývá vždy jednoduché, jelikož výskyt jednotlivých jevů je náhodný. Charakter rušivých jevů je zapříčiněn chováním elektrického oblouku. V této práci se budeme zabývat chováním elektrické obloukové pece z hlediska jejího vlivu na elektrizační soustavu a dále budeme zjišťovat vliv parametrů krátké cesty na pracovní charakteristiky.

V první části této práce si popíšeme elektrickou obloukovou pec z pohledu její konstrukce, jejího provozu a nepříznivých vlivů na elektrizační soustavu.

V druhé části popíšeme tvorbu pracovních charakteristik a vysvětlíme pojem reaktanční poměr.

Další část věnujeme aspektům kvality elektrické energie z pohledu normy ČSN EN 50160.

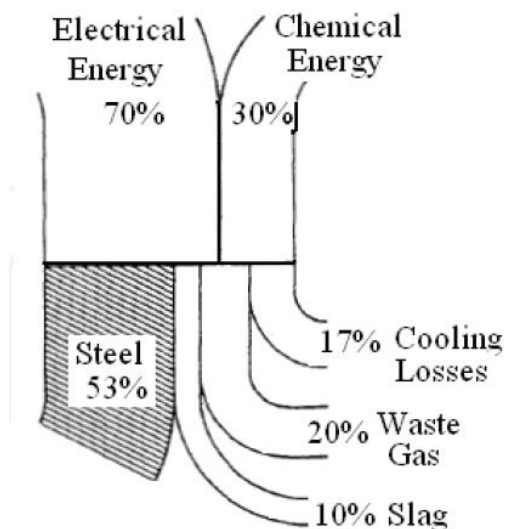
Ve čtvrté části se budeme zabývat návrhy opatření, která povedou ke snížení rušivých vlivů na elektrizační soustavu. V souvislosti s kompenzací jalové energie a filtrací vyšších harmonických popíšeme SVC zařízení. Dále si popíšeme aktivní filtry, které se využívají pro snížení flicker efektu.

Poslední částí této práce je případová studie, ve které se budeme zabývat chováním reálné elektrické obloukové pece. Zaměříme se na výpočet reaktančního poměru z naměřených dat a ukážeme si výpočet pracovních charakteristik. Na základě těchto charakteristik provedeme kompenzaci jalového výkonu a posoudíme vliv kompenzace na flicker efekt.

1. Elektrické obloukové pece

Princip tavby materiálu za pomoci elektrického oblouku je znám již od roku 1810, kdy Sir Humphry Davy provedl experiment tavby materiálu pomocí elektrického oblouku. V letech 1878 – 1879 získal William Siemens patent na elektrickou obloukovou pec. První komerčně využívaná elektrická oblouková pec byla sestrojena Paulem Héraoultem ve Spojených Státech Amerických roku 1907. [7]

Princip elektrické obloukové pece (EAF – Electric Arc Furnace) je založen na přeměně elektrické energie v tepelnou, pomocí elektrického oblouku hořícího mezi elektrodami a vsázkou. Teplo z elektrického oblouku přechází do vsázky sáláním. Další teplo v peci vzniká reakcí chemických prvků a průchodem proudu skrze vsázku. Výkonová bilance elektrické obloukové pece je na Obr. 1. [7]



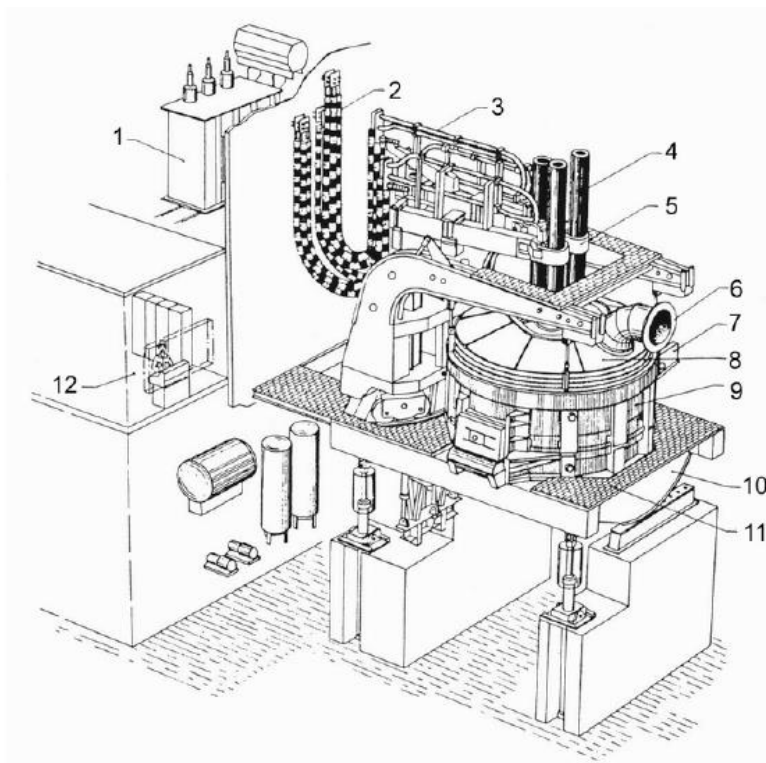
Obr. 1. Výkonová bilance elektrické obloukové pece [7]

Elektrické obloukové pece se především využívají k produkci ocelí z ocelového šrotu. Ocelový šrot je pomocí elektrické obloukové pece roztaven a výsledná tavenina je zušlechťována v pánvových pecích (LF – Ladle Furnace).

Spotřeba elektrické energie elektrických obloukových pecí se stále zmenšuje. V dnešní době se spotřeba elektrické energie u nejlepších pecí pohybuje mezi 320 kWh/t – 350kWh/t. Pro srovnání, teoretická energie potřebná k roztavení 1t ocelového šrotu je 300kWh. [7]

1.1 Konstrukce elektrických obloukových pecí

Elektrická oblouková pec na Obr. 2 se skládá z pecního transformátoru – 1, krátké cesty – 2, chladícího potrubí – 3, grafitových elektrod – 4. Elektrody jsou k přípojnicím připojeny za pomoci držáků elektrod – 5. Plynů vzniklé při tavně jsou odváděny z pece odvodem plynů – 6. Tavenina je z pece vylita za pomoci odtoku oceli – 7. Víko pece – 8 a pecní prostor – 9 jsou chlazené. Pec je postavena na naklápěcí platformě umožňující vylití taveniny – 10,11. Celá pec je řízena řídicím systémem – 12. [1]



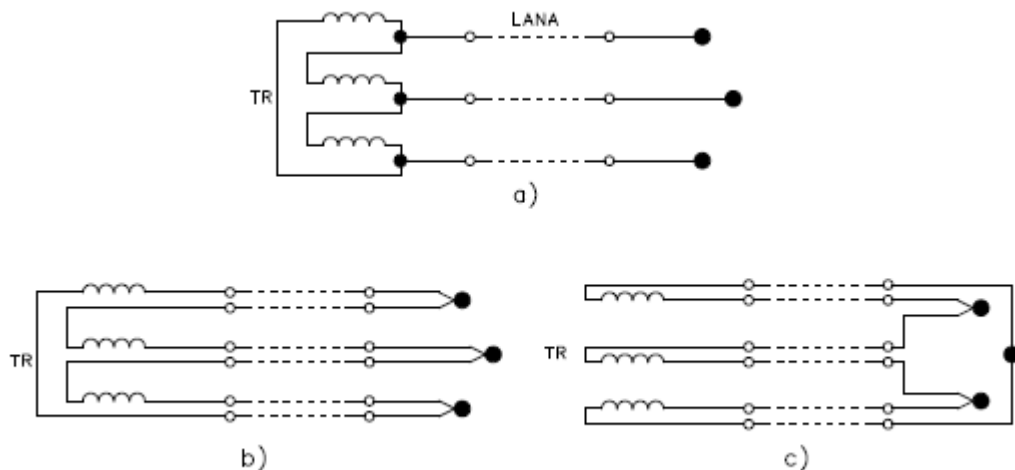
Obr. 2. Konstrukce elektrické obloukové pece[1]

1.1.1 Krátká cesta

Krátká cesta se skládá z lanových vodičů připojených k pecnímu transformátoru, pasových přípojníc a grafitových elektrod. Délka krátké cesty by měla být co nejkratší, odtud název krátká cesta. Elektrické parametry jednotlivých fází by měly být stejné a zatížení jednotlivých fázových vodičů by mělo být také stejné. To ovšem nelze v praxi dodržet a proto dochází k napěťovým nesymetriím. [2]

V blízkosti krátké cesty existuje silné elektromagnetické pole vybuzené průchodem vysokého proudu, který kromě 1. harmonické obsahuje i vyšší harmonické proudy. Z tohoto důvodu se v přímé blízkosti krátké cesty nesmějí nacházet žádné feromagnetické objekty, které by se vlivem indukovaných proudů mohly zahřívat. [2]

Příklady zapojení krátké cesty jsou na Obr. 3. Krátkou cestu je možné realizovat přímým připojením nebo bifilárním připojením vodičů. Pro realizaci bifilárního zapojení vodičů je třeba, aby uzly výstupního vinutí pecního transformátoru nebyly spojeny. Použitím bifilárního zapojení dojde k vyrovnání indukčností vodičů.



Obr. 3. Příklady zapojení krátké cesty – a) přímé zapojení, b) a c) bifilární zapojení

Obecně nelze říci, které zapojení krátké cesty je nejlepší. Návrh krátké cesty se přizpůsobuje konkrétní elektrické obloukové peci a je značně náročný.

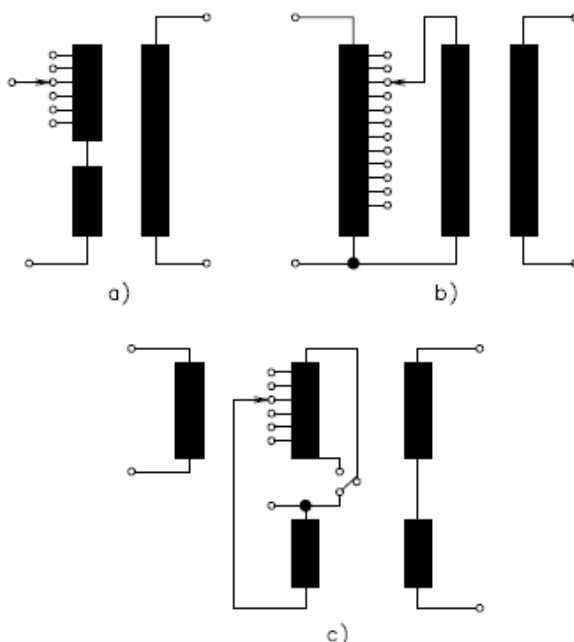
Jelikož pec pracuje s proudy v řádu až 10^5 A, tak je zapotřebí vodiče krátké cesty chladit.

1.1.2 Pecní transformátory

Jedná se o třífázové transformátory s olejovým chlazením. Tyto transformátory jsou konstruovány tak, aby vydržely náročný provoz obloukové pece. Musí vydržet časté zkraty a přetížení. Zkratový proud může být $I_K = (2,5 - 3) I_N$. [2] Oproti běžným energetickým transformátorům obsahují velké množství odboček a výkonový přepínač, který je schopen přepínat odbočky pod výkonem.

V praxi se využívají tři typy regulace [19]:

- *přímá regulace* je realizována přepínáním odboček vysokonapěťového vinutí, viz Obr. 4. a),
- *regulace s využitím autotransformátoru* kde je vysokonapěťové vinutí realizováno jako autotransformátor, pomocí kterého se děje regulace výstupního napětí, viz Obr. 4. b),
- *regulace pomocným transformátorem (Booster regulation)* využívá pomocného regulačního transformátoru připojeného k výstupnímu vinutí, viz Obr. 4. c).



Obr. 4. Různá zapojení pecních transformátorů [19]

Výkony pecních transformátorů se pohybují od desítek MVA až po zatím nejvýkonnější pecní transformátor o výkonu 300 MVA, vyrobený firmou Alstom.

Zapojení vinutí se obvykle používá Dd0, nebo Yd1. Výstupní vinutí je vždy zapojeno do trojúhelníka. Zapojení sekundárního vinutí do trojúhelníka se využívá z důvodu eliminace třetí harmonické a jejím násobkům. [2]

1.1.3 Pecní tlumivky

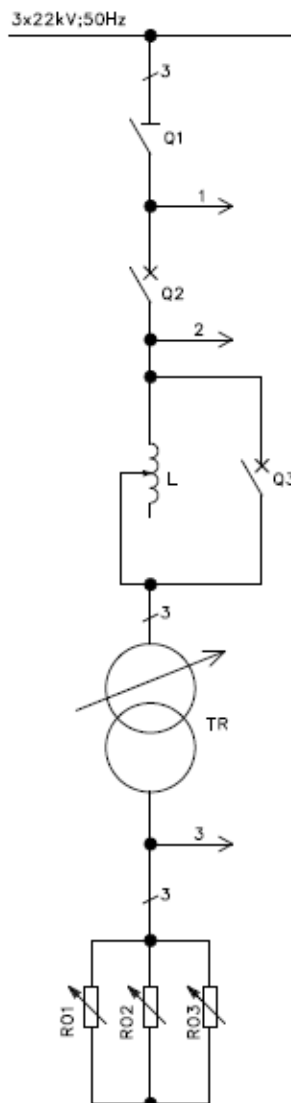
Ke stabilizaci hoření elektrického oblouku a k omezení zkratových proudů se používají pecní tlumivky. Lze je také využít pro snížení napěťových nesymetrií. Většinou se jedná o tlumivky se železným jádrem. Obsahují několik odboček, kterými lze nastavit požadovanou hodnotu reaktance. Tlumivky se používají buď odděleně, nebo jsou začleněny do nádoby pecního transformátoru. Výkon pecní tlumivky se odvíjí od výkonu samotné pece, pro kterou je navržena. [22]

1.1.4 Indukční míchání taveniny

Stejně jako u indukčních zařízení určených pro tavení kovů tak i u elektrických obloukových pecí dochází vlivem elektromagnetických sil k promíchávání taveniny. Tyto síly však nedosahují takových velikostí, které by zajistily dostatečné promíchávání taveniny. Proto se k elektrickým obloukovým pecím přidává indukční míchání, které má zajistit potřebný pohyb taveniny v peci. Míchání taveniny je důležité hned z několika hledisek. Pohyb taveniny homogenizuje rozložení teploty v objemu taveniny, pomáhá zanořovat lehké kusy šrotu do taveniny a zkracuje dobu tavby. Dále homogenizuje prolegování taveniny. Cirkulace tekutého kovu určitým směrem pomáhá hromadit nečistoty do jednoho místa a ty lze následně snadno odstranit. [22]

1.1.5 Elektrické schéma

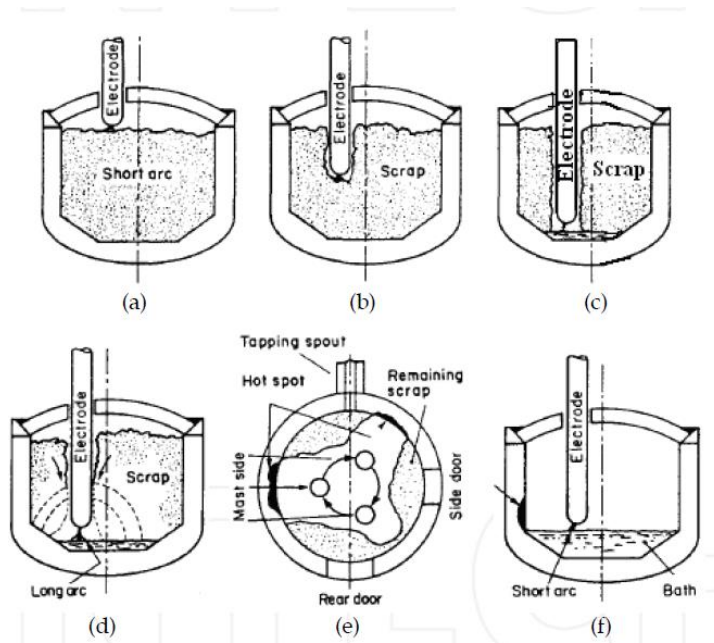
Na Obr. 5 je silové schéma zapojení obloukové pece. Pec je k elektrizační soustavě 3 x 22 kV/50Hz připojena přes odpojovač Q1. Za ním následuje výkonový vypínač Q2. Stabilizační tlumivka L obsahuje několik odboček a je překlenuta výkonovým vypínačem Q3. K tlumivce je připojen pecní transformátor a k němu jsou připojeny elektrody R₀₁, R₀₂, R₀₃. Obvod dále obsahuje měřící body 1 – 3. Elektrické schéma reálné pece je mnohem složitější a zahrnuje v sobě mimo dalšího měření i regulaci elektrod a další důležité technologické celky.



Obr. 5. Silové schéma zapojení obloukové pece [2]

1.2 Pracovní cyklus

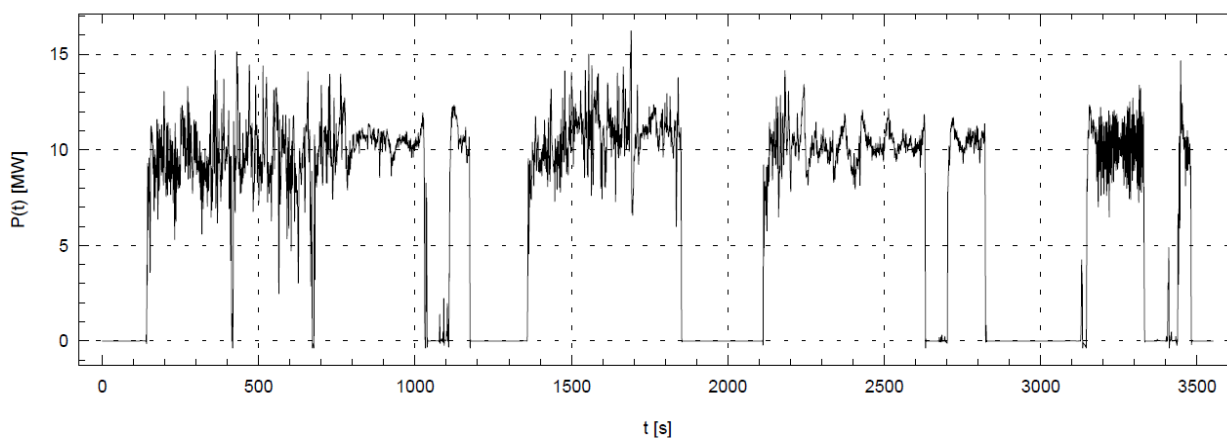
Abychom mohli popsat nežádoucí vlivy elektrické obloukové pece na elektrizační soustavu, tak je zapotřebí si nejprve popsat pracovní cyklus pece. Pracovní cyklus si můžeme teoreticky rozdělit do tří etap. V první etapě dochází k protavování oblouku ke dnu pece. Vzhledem k velké nehomogenitě ocelového šrotu dochází k velkým výkonovým změnám od stavu nakrátko, kdy nastane zkrat elektrod se šrotem, až po stav naprázdno, kdy dojde k přerušení oblouků. V počáteční fázi se taví krátkým obloukem, který je odhalen a sálá na vyzdívku pece, viz Obr. 6 a). Jak tavba postupuje, tak se oblouk protavuje ocelovým šrotem a sálání oblouku působí ve prospěch tavby, viz Obr. 6 b). Dosáhne-li oblouk dna pece, tak se přechází k tavbě s dlouhým obloukem zcela zakrytým v ocelovém šrotem, viz Obr. 6 c). Při tavbě šrotu dochází k sesunu neroztavených částí šrotu do taveniny, viz Obr. 6 d). Ve fázích a) až d) dochází k největším výkonovým změnám. Ty jsou způsobeny velkou nehomogenitou vsázky. Při roztavení všech pevných částí přejde pec do třetí fáze tavby, kdy pec pracuje s dlouhým obloukem zcela zakrytým v napěněné strusce, viz Obr. 6 f). V této fázi hoří oblouk neklidněji. Při třetí fázi dochází k rafinaci taveniny. [7]



Obr. 6. Fáze tavicího cyklu [7]

Ve skutečnosti pracují pece v cca hodinovém cyklu. Tento cyklus si lze rozdělit na čtyři intervaly. Doba tavy a počet intervalů se odvíjí od stáří pece a od použité technologie. V prvním intervalu se pec naplní prvním košem s lehkým šrotem. Použití lehkého šrotu na počátku tavy zajistí menší výkonové změny, protože neobsahuje velké kusy, které se sesouvají a výrazně mění délku oblouku. Při roztavení prvního koše se do taveniny vysype druhý koš s těžkým šrotem. Velké kusy šrotu jsou částečně ponořeny do taveniny. Tudíž nehrozí příliš časté sesouvání materiálu na elektrody a navíc roztavená ocel natavuje kusy šrotu do ní ponořené. Tímto opatřením se sníží kolísání výkonu a zkrátí se doba tavy. Po roztavení šrotu z druhého koše se pec naplní třetím posledním košem s těžkým šrotem. Ve čtvrté fázi se taví dlouhým obloukem zakrytým ve strusce a dochází k rafinaci taveniny.

Na Obr. 7 lze vidět hodinový tavící cyklus reálné obloukové pece. Lze si všimnout že třetí fáze je, co se týče výkonových změn, nejkolidnější. V této fázi dochází k hoření oblouku v napěněné strusce.



Obr. 7. Tavící cyklus elektrické obloukové pece – závislost $P(t)$ [MW]

Moderní pece zpracovávající ocelový šrot dokáží během třicetiminutového pracovního cyklu vytavit 100 – 130 t oceli. [7]

1.2.1 Regulace elektrod

Aby byly výkonové změny co nejmenší a oblouk hořel klidně s požadovaným účinníkem, tak je zapotřebí správně nastavit regulaci elektrod.

Regulace se děje na základě měření impedance oblouku. Nastavení správné regulace má vliv na chování celé pece. Lze jí např. omezit velké výkonové změny. Podrobněji je regulace elektrod popsána v 0.

1.3 Požadavky na elektrizační soustavu v místě připojení

Elektrizační soustava v místě připojení pece musí mít dostatečný zkratový výkon, aby se omezily rušivé vlivy pece na elektrizační soustavu. Dostatečný zkratový výkon elektrizační soustavy lze zajistit dvěma způsoby:

- a) rekonfigurací sítě,
- b) použitím kompenzace jalového výkonu.

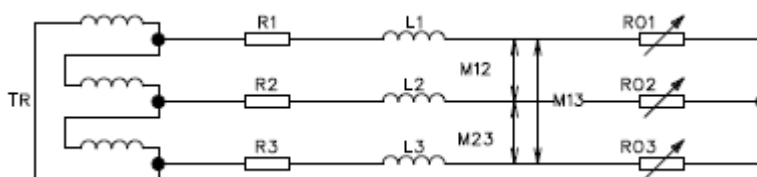
1.4 Vlivy na kvalitu elektrické energie

Provoz elektrických obloukových pecí sebou nese rušivé vlivy na elektrizační soustavu. V této kapitole popíšeme jednotlivé rušivé vlivy.

1.4.1 Napěťové nesymetrie

Vlivem rozdílných elektrických parametrů jednotlivých fázových vodičů krátké cesty R_1 , R_2 , R_3 , L_1 , L_2 , L_3 a jejich nestejnomořnému zatížení vznikají napěťové nesymetrie. Nestejnomořné zatížení vodičů je způsobeno proměnlivým hořením oblouků. Elektrické oblouky jsou reprezentovány odpory R_{O1} , R_{O2} , R_{O3} . Dalším faktorem způsobujícím napěťové nesymetrie je geometrické uspořádání vodičů krátké cesty. Protože jsou vodiče krátké cesty uloženy v jedné horizontální rovině, liší se jejich vzájemné indukčnosti M_{12} , M_{13} , M_{23} . [2] Jednotlivé parametry krátké cesty jsou vyobrazeny na Obr. 8.

Nesymetrie vzájemných indukčností způsobuje vznik mrtvé a živé fáze. Živou fází vlivem snížení reaktance protéká vyšší proud než ostatními fázemi. Navýšení proudu znamená navýšení sálavého výkonu oblouku. Tento výkon značně tepelně namáhá vyzdívku pece. [1]



Obr. 8. Elektrické parametry krátké cesty [2]

Napěťové nesymetrie nelze úplně odstranit. Jednou z možností jak je omezit je pomocí regulace elektrod. Další možností je použití aktivních FACTS zařízení na primární straně pecního transformátoru.

1.4.2 Kolísání napětí a flicker efekt

Kolísání souvisí se změnou impedance krátké cesty. Změna impedance je vyvozena změnou odporu oblouků a změnou reaktance krátké cesty související s pohybem ramen držáků elektrod. Změna odporu oblouku souvisí s délkou oblouku. Délka oblouku zejména na počátku tavby kolísá v širokém rozsahu od stavu nakrátko až po stav naprázdno, kdy dojde k přerušení oblouku. Změna impedance tedy způsobuje kolísání pecního proudu v širokém rozsahu hodnot. Tento proud prochází reaktancemi přívodní cesty. Na těchto reaktancích pak vznikají úbytky napětí dle rovnice:

$$\Delta \hat{U} = \hat{Z} \cdot \hat{I} = (R + jX) \cdot (I_c \pm jI_j)_{IND}^{KAP} \quad (1-1)$$

Z rovnice (1-1) plyne, že úbytky napětí způsobují i jalové proudy. Úbytky napětí následně způsobují kolísání napětí. S kolísáním napětí přímo souvisí flicker efekt, který se projevuje kolísáním světelného toku světelných zdrojů.

1.4.3 Vznik vyšších harmonických

Vyšší harmonické vznikají při hoření oblouku. Napětí na oblouku a proud procházející obloukem jsou deformované. Tyto průběhy obsahují široké spektrum vyšších harmonických. Harmonické proudy mají jalový charakter a vytvářejí dle odvození (1-2) i činné ztráty ve vodičích. Je tedy potřeba kompenzace těchto proudů.

V odvození (1-2) lze vidět vliv jalové složky na činné ztráty ΔP .

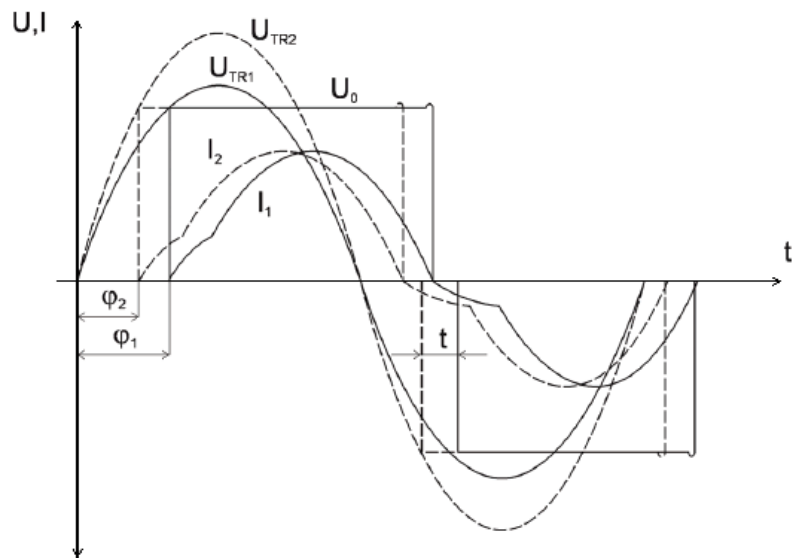
$$\begin{aligned}\Delta \hat{S} &= 3 \cdot \Delta \hat{U} \cdot \hat{I}^* = 3 \cdot \hat{Z} \cdot \hat{I} \cdot \hat{I}^* = 3 \cdot (R + jX) \cdot (I_c^2 \pm jI_j^2) \\ \Delta \hat{P} &= 3 \cdot R \cdot (I_c^2 \pm jI_j^2)\end{aligned}\tag{1-2}$$

Elektrická oblouková pec generuje nejen liché, ale i sudé násobky harmonických, interharmonické a subharmonické. Sudé násobky se projevují zvláště na počátku tavby, kdy má hoření oblouku mezi žhavou elektrodou a studenou vsázkou usměrňující charakter.

1.4.4 Odebíraný jalový výkon

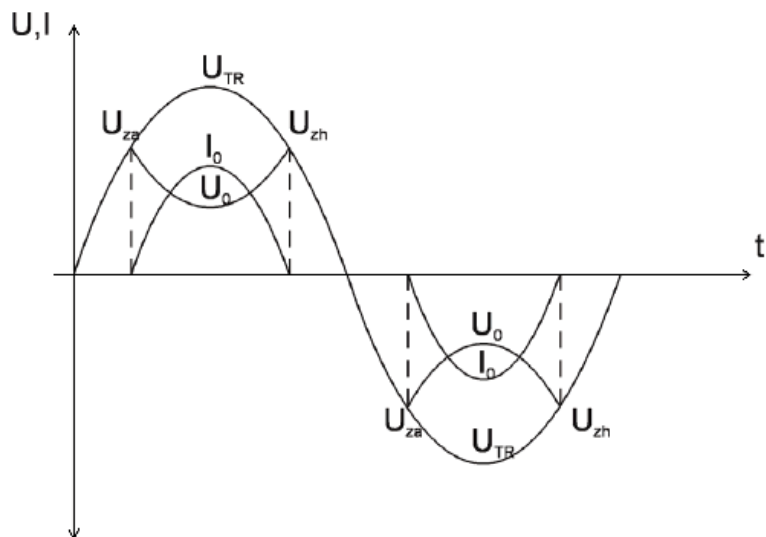
Aby elektrický oblouk hořel stabilně, tak potřebuje pracovat s induktivním účínkem. Induktivní charakter oblouku plyne z požadavků na stabilitu hoření oblouku. Jako optimální hodnota účínku se uvádí hodnota $\cos\varphi = 0,85$. Při takovémto účínku má napětí při průchodu proudu nulou dostatečnou velikost pro znovuzapálení oblouku a hoření oblouku je stabilní. Pro vyšší účínky dochází ke zhasínání oblouku a hoření oblouku je nestabilní. Naopak je tomu při nižších účínkách. Se snižujícím se účínkem roste stabilita hoření oblouku, ale navyšuje se odebíraný jalový výkon. Pece pracující s krátkým obloukem mají účínk $\cos\varphi = 0,75$. Pece UHP (Ultra High Power) pracují s dlouhým obloukem a tím i s vyšším účínkem. UHP pece pracují s účínkem $\cos\varphi = 0,85$. Ve skutečnosti dochází ke kolísání účínků v širokém rozsahu hodnot. Tento jalový výkon je potřeba kompenzovat. [2]

Stabilizace oblouku se provádí zařazením indukčnosti do proudové cesty. Velikost indukčnosti musí být navržena tak, aby při dosažení zápalného napětí oblouku klesl proud oblouku k nule. Princip stabilizace střídavého oblouku indukčnostmi je vidět na Obr. 9. [1],[2]



Obr. 9. Princip stabilizace hoření oblouku indukčností [1]

Další možností jak stabilizovat hoření oblouku je použití stabilizačního odporu. Při použití odporu jako stabilizačního prvku vzniká bezproudá pauza. Ta vznikne poklesem proudu oblouku k nule při poklesu napětí na elektrodě pod zhášecí napětí oblouku. Ke znovuzapálení oblouku dojde až po dosažení zápalného napětí oblouku mezi elektrodou a vsázkou. Z tohoto chování plyne, že tento způsob regulace není vhodný pro střídavý oblouk. Princip lze pozorovat na Obr. 10. [1],[2]



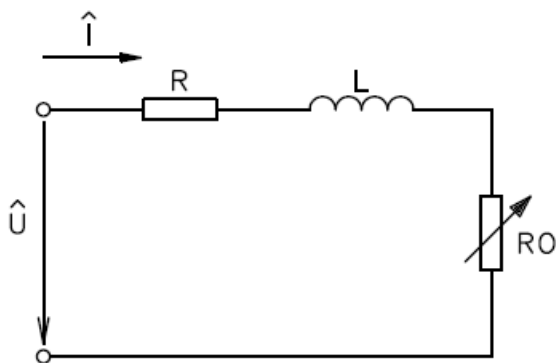
Obr. 10. Stabilizace oblouku odporem [1]

2. Pracovní charakteristiky

Pro elektrické obloukové pece stejně jako pro asynchronní motory lze sestavit kruhový diagram a z něj pracovní charakteristiky pece. Z pracovních charakteristik nebo přímo z kruhového diagramu se určuje optimální nastavení parametrů pece tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti. Výpočet optimálních parametrů se provádí pro jednu konkrétní napěťovou odbočku pecního transformátoru, jednu fázi a pro první harmonickou proudu.

2.1 Konstrukce kruhového diagramu

Kruhový diagram je geometrickým vyjádřením proudu oblouku. Lze jej sestavit na základě znalostí parametrů elektrické obloukové pece, nebo na základě naměřených elektrických veličin. Sestavuje se pro jednu fázi, první harmonickou proudu a pro jednu napěťovou odbočku pecního transformátoru. Kruhový diagram slouží k nastavení optimálního proudu oblouku, který je řízen regulátorem zdvihu elektrod. Matematický popis kruhového diagramu lze provést dle zjednodušeného náhradního schématu jedné fáze na Obr. 11. [2],[14]



Obr. 11. Náhradní schéma jedné fáze

Indukčnost L v sobě zahrnuje vlastní indukčnost krátké cesty, indukčnost přívodu pecního transformátoru, vzájemné indukčnosti fázových vodičů atd. Odpor R v sobě zahrnuje veškeré činné odpory krátké cesty. Odpor R_0 je odpor oblouku.

Odpor oblouku je v čase proměnný a jeho velikost závisí na délce oblouku. Náhradní schéma můžeme popsat následující rovnicí:

$$\begin{aligned} \hat{I} &= \frac{\hat{U}}{\hat{Z}} = \frac{\hat{U}}{R + R_o + j\omega L} = \frac{\hat{U}(R + R_o - j\omega L)}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} = \\ &= \frac{\hat{U}(R + R_o)}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\hat{U}\omega L}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

V rovnici (2-1) značí \hat{U} napájecí napětí, \hat{I} proud oblouku, R a L odpor a indukčnost krátké cesty a R_o odpor oblouku.

Fázor proudu \hat{I} lze rozložit na dvě složky x a y :

$$x = \frac{\hat{U}(R + R_o)}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} \quad (2-2)$$

$$y = - \frac{\hat{U}\omega L}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} \quad (2-3)$$

Tyto dvě složky definují křivku, po níž se v komplexní rovině pohybuje koncový bod fázoru \hat{I} . Po provedení matematických úprav a dosazením do rovnice kružnice dojdeme k následujícímu vztahu pro střed kružnice n :

$$n = |r| = \frac{U}{2\omega L} \quad (2-4)$$

Ze středu kružnice lze určit poloměr kružnice r . Poloměr kružnice definuje rozsah hodnot pecního proudu. Z poloměru kružnice lze určit proud nakrátko I_k . Ten lze určit buď jako dvojnásobek poloměru kružnice, nebo z parametrů krátké cesty pro stav nakrátko dle rovnice:

$$I_k = 2|r| = \frac{U}{Z_k} \quad (2-5)$$

Parametr Z_k v rovnici (2-5) značí impedanci krátké cesty nakrátko pro stav nakrátko.

Výkon oblouku P_o se mění s jeho odporem. Odpor oblouku závisí na jeho délce. Ostatní parametry R a L se považují za konstantní. Lze najít takovou hodnotu odporu oblouku, při které bude dosaženo maximálního P_o . Pro určení maximálního výkonu oblouku vychází z rovnice:

$$P_o = R_o I^2 = R \frac{U^2}{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2} \quad (2-6)$$

Následně se rovnice (2-6) derivuje dle odporu oblouku a položí se rovna nule:

$$\frac{dP_o}{dR_o} = \frac{(R + R_o)^2 + (\omega L)^2 - 2R_o(R_o + R)}{[(R + R_o)^2 + (\omega L)^2]^2} U^2 = 0 \quad (2-7)$$

Vyřešením rovnice (2-7) lze získat výslednou hodnotu R_o při které je výkon oblouku maximální:

$$R_o = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2-8)$$

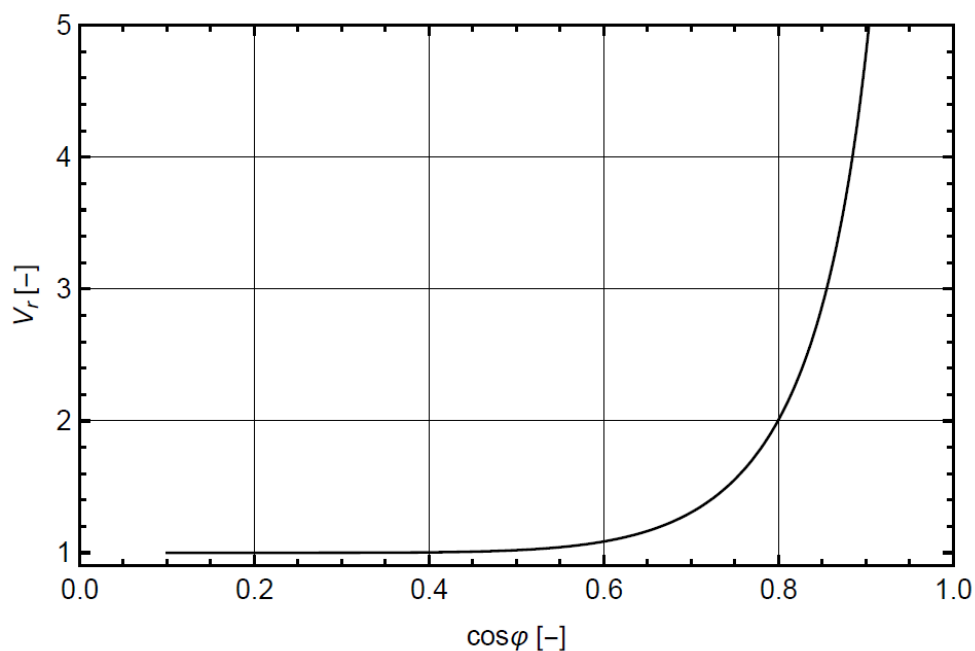
Z rovnice (2-8) vyplývá, že aby bylo dosaženo maximálního výkonu oblouku, tak se odpor oblouku musí rovnat impedanci celého přívodu. [2]

2.1.1 Reaktanční poměr krátké cesty a odpor oblouku

Vlivem regulace výkonu oblouku dochází ke změně pracovní reaktance krátké cesty. Tato změna je závislá na aktuálním účinníku pece $\cos\varphi$ a lze ji vyjádřit jako poměr pracovní reaktance X_p a reaktance nakrátko X_k dle následující rovnice:

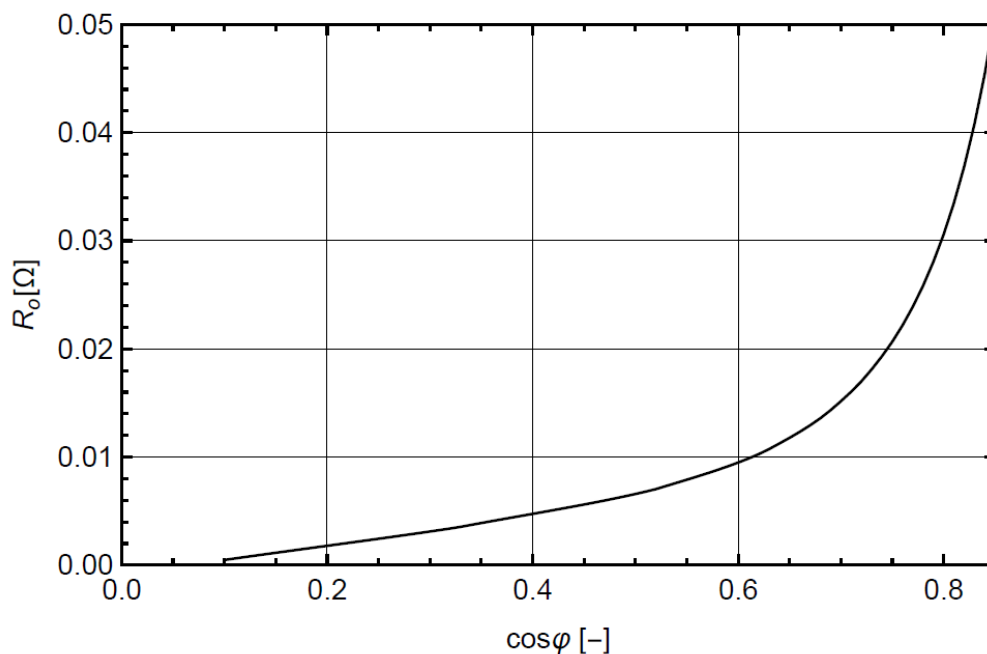
$$V_r(\cos\varphi) = \frac{X_p(\cos\varphi)}{X_k} \quad (2-9)$$

Na Obr. 12 lze vidět závislost reaktančního poměru na účinníku.



Obr. 12. Příklad závislosti reaktančního poměru na účinníku

Faktory ovlivňující reaktance jednotlivých fází mají také vliv na odpor oblouku. Proto lze najít závislost odporu oblouku na účinníku. Příklad této závislosti je možné vidět na Obr. 13.

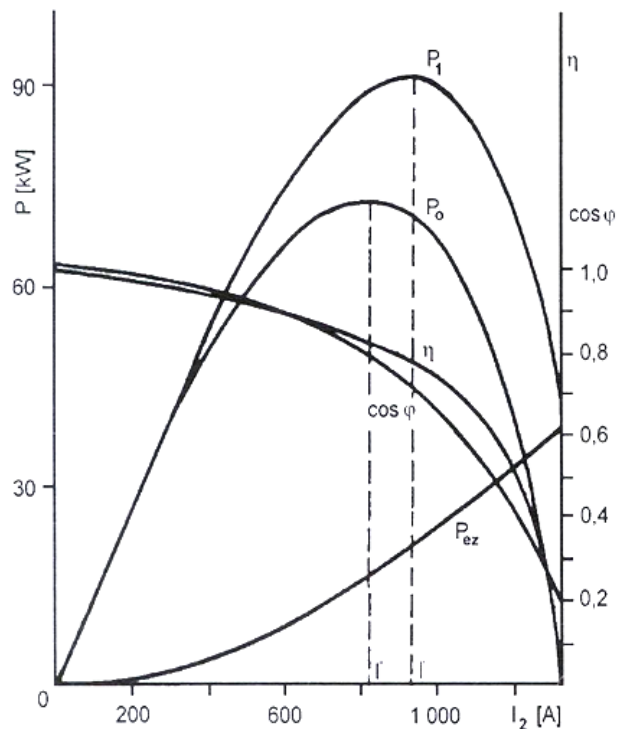


Obr. 13. Příklad závislost odporu oblouku na účinníku

2.2 Pracovní charakteristiky

Z kruhového diagramu lze pro jednu napěťovou odbočku sestavit pracovní charakteristiku elektrické obloukové pece. V praxi se tyto charakteristiky určují na základě měření z několika taveb. Takto získané pracovní charakteristiky, jsou daleko přesnější než ty, které byly získány odvozením z kruhového diagramu. Výsledné charakteristiky je třeba korigovat o tepelné ztráty a Jouleovy ztráty ve vodičích. [2],[14]

Na Obr. 14 je zobrazen příklad pracovní charakteristiky.



Obr. 14. Příklad pracovní charakteristiky [2]

V Obr. 14 je P_1 výkon pece, P_o výkon oblouku, P_{ez} elektrické ztráty ve vodičích, $\cos \varphi$ účiník pece, η účinnost pece.

3. Kvalita elektrické energie

Dodržování kvality elektrické energie je důležité pro provoz energetické soustavy a pro provoz zařízení k ní připojených. Již od počátku využívání elektrické energie je kladen důraz na její kvalitu. Požadavky na kvalitu elektrické energie se stále zpřísňují. To je způsobeno rozvojem citlivých, ale zároveň efektivních elektronických zařízení a také požadavkem na vyšší bezpečnost energetických soustav. Požadavky na kvalitu elektrické energie jsou popsány normou ČSN EN 50160 a normou ČSN 33 0122, která vysvětluje používání evropské normy ČSN EN 50160.

3.1 Norma ČSN EN 50160

Norma popisuje charakteristiky napětí v napájecích bodech za normálních provozních podmínek. Norma neřeší napájecí systém zákazníka. Nevztahuje se na nestandardní stavy, které nemůže provozovatel distribuční sítě ovlivnit. Mezi tyto stavy se řadí např. mimořádné povětrnostní podmínky, vandalismus, nařízení úřadů, vyšší moc a další.
[5]

Norma stanovuje závazné charakteristiky napětí s definovanými povolenými hodnotami [6]:

- síťový kmitočet,
- odchylky napájecího napětí,
- rychlé změny napětí, flicker efekt,
- nesymetrie napájecího napětí,
- harmonická napětí,
- mezipharmonická napětí,
- napětí signálů vysílaných po síti HDO.

Dále jsou definovány informativní charakteristiky dle [6]:

- poklesy napětí,
- dlouhá přerušení,
- krátká přerušení,
- dočasná a přechodná přepětí.

3.1.1 Síťová frekvence

Vyhodnocení síťové frekvence se děje na základě střední hodnoty získané z efektivních hodnot frekvence naměřených během 10 sekundového intervalu. V Tab. 1 jsou uvedeny mezní hodnoty síťové frekvence pro hladiny NN, VN a VVN. [5]

Tab. 1. Tolerance síťové frekvence pro systém se synchronním připojením k propojenému systému [5]

Hladina	f_n [Hz]	Δf [%]	Časový interval
NN, VN, VVN	50	± 1	99% roku
NN, VN, VVN	50	+4; -6	100% času

3.1.2 Nesymetrie napájecího napětí

Hodnota netočivé složky napětí má být nejvýše 2% složky sousledné, ve výjimečných případech může být i 3%. Měření se provádí v desetiminutových intervalech po dobu jednoho týdne. Aby byly splněny požadavky na kvalitu elektrické energie, tak musí být 95% hodnot v povolených mezích. Nesymetrie v elektrizační soustavě vznikají nesymetrickým zatížením jednotlivých fází. [5]

3.1.3 Odchyłky napájecího napětí

Odchyłky napájecího napětí se hodnotí na základě střední hodnoty napětí, která je získána z naměřených efektivních hodnot napětí během desetiminutového intervalu. Délka měření je dle normy nejméně týden. Charakteristiky napájecího napětí lze vidět v Tab. 2. [5]

Tab. 2. Charakteristiky napájecího napětí [5], [13]

Hladina	Odchyly	Procento vyhovujících hodnot	Provozní stav
NN	$\pm 10\% U_n$	95%	normální
	$+10\% U_n ; -15\% U_n$	95%	ostrovní provoz
			dálkově řízená spotřeba
VN	$\pm 10\% U_c$	99%	normální
	$+10\% U_c ; -15\% U_c$	99%	ostrovní provoz
			dálkově řízená spotřeba
			řešení provozních problémů
$\pm 15\% U_c$	100%	normální	
VVN	řešeno individuálními smlouvami		

Na hladině NN se naměřené výsledky vztahují k jmenovitému napětí sítě, kdežto na hladině VN se výsledky vztahují k dohodnuté hodnotě napětí U_c .

3.1.4 Harmonická napětí

Pro hladiny NN, VN a VVN jsou dány dva limity platící současně a vymezející harmonická napětí. Měření opět probíhá nejméně týden po deseti minutových intervalech, kdy jsou měřeny efektivní hodnoty jednotlivých harmonických. Z těchto hodnot se pak vypočítají střední hodnoty a 95% jich musí splňovat dané limity. Pro hladiny NN a VN se zavádí činitel harmonického zkreslení napětí THD zahrnující všechny harmonické až do řádu 40. Ten musí být menší jak 8%. Na hladině VVN záleží na dohodě. [5]

Rovnice (3-1) vyjadřuje činitel harmonického zkreslení napětí. Veličina U_1 vyjadřuje hodnotu napětí první harmonické a veličina U_i označuje napětí ostatních harmonických.

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} \quad (3-1)$$

Harmonická napětí vyššího řádu než prvního vznikají připojením zařízení s nelineární volt – ampérovou charakteristikou k napájecí soustavě. V Tab. 3 jsou uvedeny povolené limity jednotlivých harmonických.

Tab. 3. Limitní hodnoty obsahu vyšších harmonických [5]

Řád harmonické h	NN U_h [% U_1]	VN U_h [% U_1]	VVN U_h [% U_1]
2	2	2	1,9
3	5	5	3
4	1	1	1
5	6	6	5
6 – 24 (sudé)	0,5		
7	5	5	4
9	1,5	1,5	1,3
11	3,5	3,5	3
13	3	3	2,5
15	0,5	0,5	0,5
17	2	2	zkoumá se
19	1,5	1,5	zkoumá se
21	0,5	0,5	0,5
23	1,5	1,5	zkoumá se
25	1,5	1,5	zkoumá se
THD _u	8%	8%	dohoda

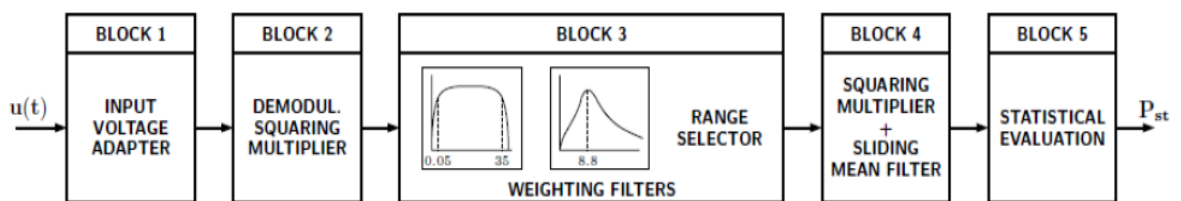
3.1.5 Flicker efekt

Flicker efekt je normou ČSN EN 50160 definován jako „vjem nestálosti zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase“. [5] Již z této definice je jasné, že flicker efekt je subjektivní veličina, a její objektivní hodnocení je obtížné. Hodnocení se děje na základě statistického zpracování. Pro kvantitativní hodnocení se používá krátkodobá hodnota míry vnímání flickeru P_{st} a dlouhodobá míra vnímání flickeru P_{lt} . P_{st} , neboli desetiminutový flicker, je měřen po dobu deseti minut. Měření probíhá podle mezinárodního standardu IEC 61000-4-15:2010. [13]

Dlouhodobá hodnota míry vnímání flickeru je dána:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3-2)$$

Pro měření flicker efektu se používá flickermetr, který má v sobě zabudovaný algoritmus dle IEC 61000-4-15:2010. [13] Blokové schéma flickermetru lze vidět na Obr. 15.

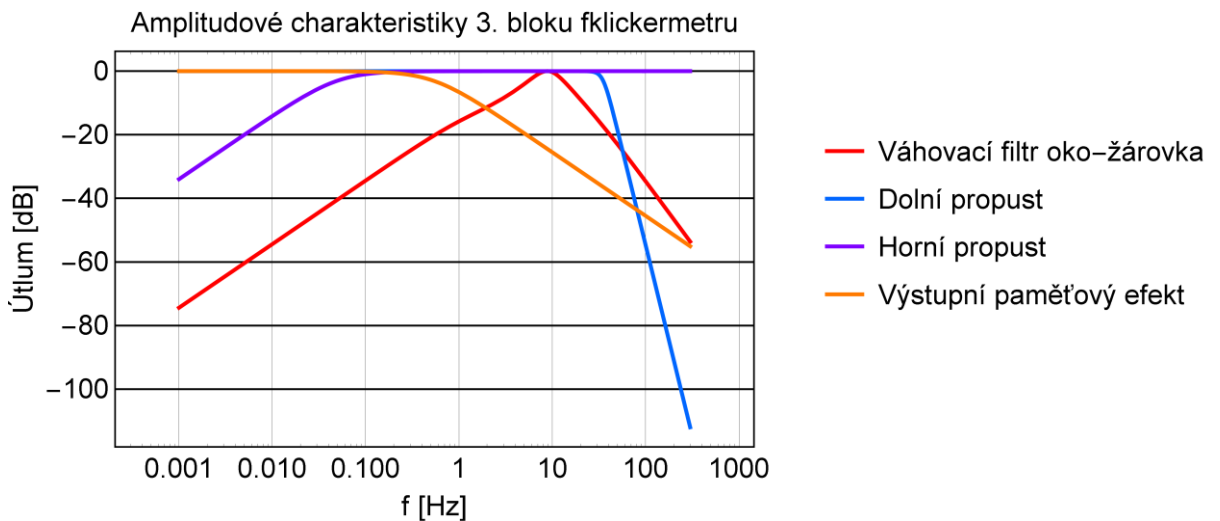


Obr. 15. Blokové schéma standardizovaného flickermetru [17]

Flicker efekt je způsobený kolísáním amplitudy napětí. Kolísání napětí je způsobeno spínáním velkých zátěží, provozem elektrických obloukových pecí, periodickým odběrem velkých výkonů (katr), kolísajícím odběrem jalového výkonu atd. Dalšími faktory ovlivňující flicker efekt jsou subharmonické složky napětí.

Pokud je frekvence kolísání napětí blízká 8,8 Hz, což je prahová frekvence vnímání oka, tak pozorovatel pociťuje nepříjemné míhání světelného zdroje. Nejvýrazněji se flicker efekt projevuje ve frekvenčním pásmu 5 – 18 Hz.

Na Obr. 16 jsou vyobrazeny amplitudové charakteristiky 3. bloku flickermetru. Hornopropustný filtr a dolnopropustný filtr slouží k výběru frekvenčního rozsahu. Paměťový efekt slouží pro statistické zpracování. Nejdůležitější součástí je pásmová propust, která plní funkci váhovacího filtru oko - žárovka. Jeho charakteristika je sestrojena tak, aby měla maximum právě na prahové frekvenci vnímání oka 8,8 Hz.



Obr. 16. Amplitudové charakteristiky 3. bloku flickermetru [17]

Protože je lidské oko velice citlivé na změnu světelného toku, tak je potřeba změny napětí držet ve velice úzkých mezích. Právě z tohoto důvodu je zapotřebí flicker efekt měřit a zabraňovat jeho šíření soustavou.

Měření probíhá libovolných pět pracovních a dva víkendové dny v roce. Aby bylo možné považovat velikost flickeru za přijatelnou, tak se musí 95% hodnot vejít do limitu 1 a to pro NN, VN a VVN hladiny. [5]

3.2 Opravdový účinník, deformační výkon

Provoz zátěží s nelineární volt – ampérovou charakteristikou zatěžuje napájecí soustavu proudy vyšších harmonických. Tyto proudy se projeví ve zdánlivém výkonu nárůstem jalového výkonu a zavedením tzv. deformačního výkonu. Pro ukázání vlivu vyšších harmonických provedeme následující odvození.

Činný výkon harmonického spektra je dán jako:

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \cos\varphi_i \quad (3-3)$$

V rovnici (3-3) veličiny U_0 a I_0 značí stejnosměrnou složku napětí a proudu. Veličiny U_i , I_i a $\cos\varphi_i$ jsou hodnoty veličin jednotlivých harmonických.

Jalový výkon harmonického spektra je dán jako:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \sin\varphi_i \quad (3-4)$$

Zdánlivý výkon průběhu se spočte jako:

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{i=1}^{\infty} U_i^2} \sqrt{I_0^2 + \sum_{i=1}^{\infty} I_i^2} \quad (3-5)$$

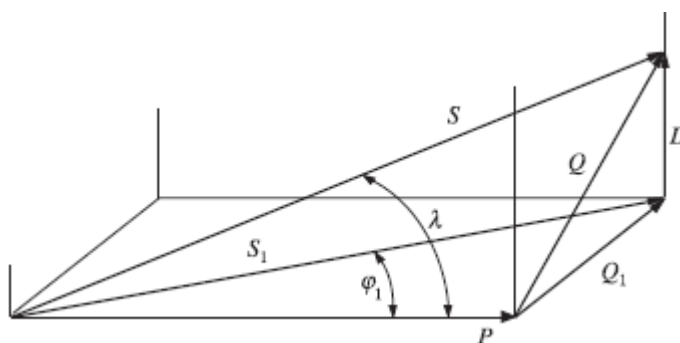
Vypočítáme – li zdánlivý výkon z rovnic (3-3) a (3-4) a porovnáme – li ho se zdánlivým výkonem v rovnici (3-5), tak zjistíme, že zdánlivý výkon dle (3-5) je větší. Tato nerovnost je způsobena proudy vyšších harmonických, které vyvozují tzv. deformační výkon a navyšují jalový výkon. Deformační výkon D je podle [4] interakce mezi základní harmonickou napětí a vyššími harmonickými proudy. Popisuje ho následující rovnice:

$$D = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2} \quad (3-6)$$

Zdánlivý výkon pak lze zjistit dle následující rovnice:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3-7)$$

Na Obr. 17 je vidět význam deformačního výkonu.



Obr. 17. Význam deformačního výkonu [4]

Z odvození výše lze určit opravdový účinník λ jako podíl činného výkonu první harmonické a celkového zdánlivého výkonu:

$$\lambda = \frac{P_1}{S} \quad (3-8)$$

Od účinníku pro první harmonickou se liší tím, že je navýšen o vyšší harmonické. Protože zdrojem vyšších harmonických je zařízení, tak je jejich charakter jalový. Proto se jejich vliv neprojeví na činném výkonu zařízení, ale projeví se na ztrátách na vedení dle (1-2). Účinník pro první harmonickou je tedy větší než opravdový účinník. Účinník první harmonické je vyjádřen následující rovnicí:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (3-9)$$

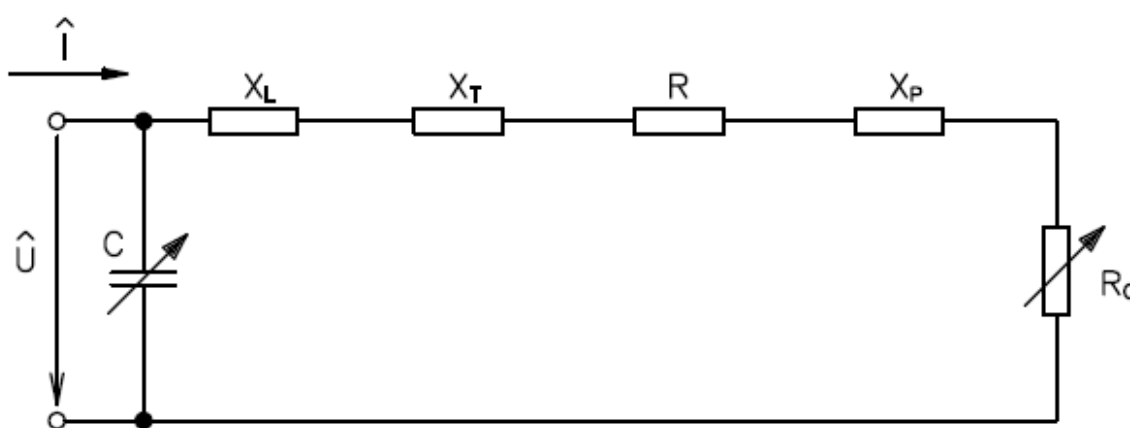
4. Snížení vlivu elektrické obloukové pece na elektrizační soustavu

Provoz elektrické obloukové pece sebou nese negativní vlivy mající náhodný charakter. Náhodnost je způsobena charakterem prostředí, ve kterém hoří oblouk. Generovaná rušení negativně ovlivňují energetickou soustavu v místě připojení pece. Vzhledem k velikosti odebíraného výkonu pecí je potřeba tato rušení řešit. V této kapitole popíšeme nástroje k eliminaci nejčastějších rušení, která se při provozu obloukové pece vyskytují.

4.1 Kompenzace jalového výkonu

Aby bylo hoření oblouku v peci stabilní, tak musí pec pracovat s induktivním účínkem o určité velikosti, viz kap. 1.4.4. Celkový jalový výkon odebíraný pecí je navýšen o jalový výkon vzniklý na reaktancích proudové cesty a jalový výkon vyšších harmonických proudů. Nutnost kompenzace jalového výkonu plyne z požadavků na dodržení účínku, který musí být po 95% času v mezích 0,95 – 1 induktivní oblasti. [13]

Pro odvození kompenzace budeme vycházet z náhradního schématu na Obr. 18.



Obr. 18. Náhradní schéma jedné fáze pro určení kompenzační kapacity

V Obr. 18 značí reaktance X_L reaktanci pecní tlumivky, X_T je reaktance pecního transformátoru, R je odpor krátké cesty, X_p značí pracovní reaktanci krátké cesty a proměnný odpor R_o je odpor oblouku.

Impedanci obvodu vyjádříme rovnicí:

$$\hat{Z} = \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot (jX_L + jX_T + jX_p + R + R_o)}{\frac{1}{j\omega C} + jX_L + jX_T + jX_p + R + R_o} \quad (4-1)$$

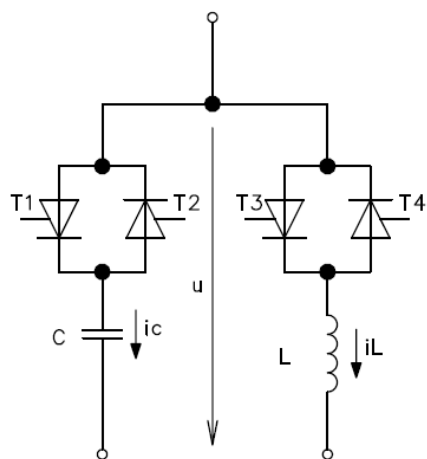
Po vykompenzování jalové složky platí:

$$Im\{\hat{Z}\} = 0 \quad (4-2)$$

Z této podmínky určíme velikost kompenzační kapacity C . Při provozu pece se odebíraný jalový výkon mění v širokém rozsahu hodnot, proto musí kompenzační kapacita být říditelná v závislosti na odebíraném jalovém výkonu. K tomu se v praxi používají systémy FACTS, mezi které patří SVC zařízení.

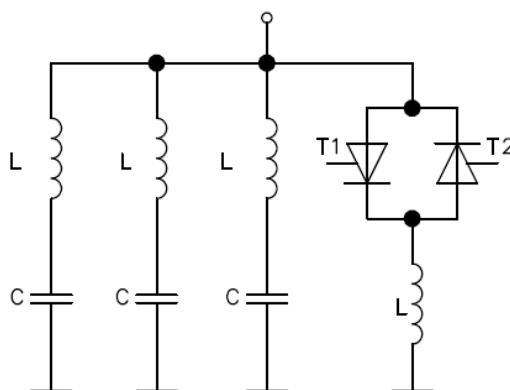
4.1.1 SVC zařízení

V energetice má SVC zařízení široké použití. Používají se pro řízení jalové energie, omezení flicker efektu a pro filtraci vyšších harmonických. V oblasti přenosu elektrické energie slouží ke stabilizaci napěťových poměrů v sítí řízením jalového výkonu v uzlech. Pro tuto oblast se používají zařízení kombinující TCC (Thyristor controlled capacitor) s TCR (Thyristor controlled reactor), viz Obr. 19. Jalový výkon je kompenzován za pomoci spínaného kondenzátoru a plynule říditelné tlumivky. Kondenzátor není plynule říditelný, buď je připojen nebo je odpojen. Toto omezení je způsobeno velkým odebíraným proudem při spínání kondenzátoru, protože tento proud výkonově zatěžuje polovodičové struktury, které jsou náchylné na jakékoli přetížení.



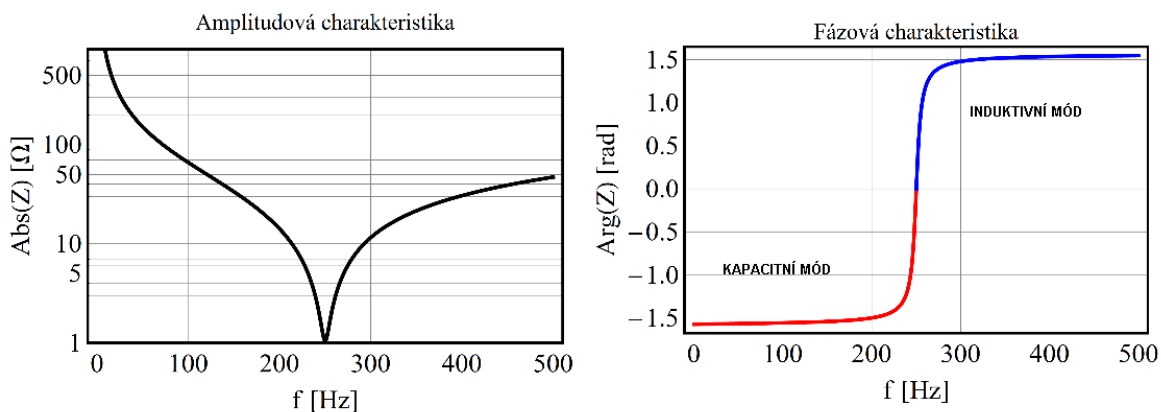
Obr. 19. SVC zařízení

V průmyslových aplikacích se SVC zařízení používají primárně ke kompenzaci jalového výkonu. Pro kompenzaci induktivního jalového výkonu se používá kombinace TCR jednotky s pasivními filtry vyšších harmonických jako na Obr. 20.



Obr. 20. SVC zařízení kombinované s pasivními filtry vyšších harmonických

Filtry jsou naladěny na požadované harmonické, ale pro první harmonickou mají kapacitní charakter, viz Obr. 21. Těto vlastnosti filtrů se využívá pro kompenzaci jalové energie.



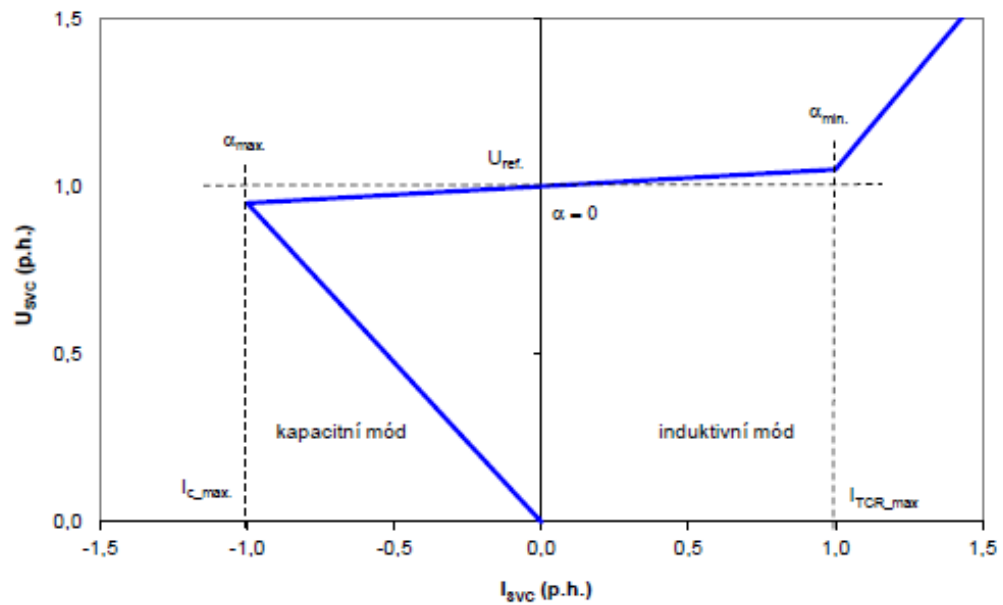
Obr. 21. Příklad amplitudové charakteristiky filtru a fázové charakteristiky filtru [18]

Velikost kondenzátorů musí být navržena tak, aby při odpojené tlumivce hradila maximální jalový výkon odebíraný zařízením. Jalový výkon je tedy řízen plynule říditelnou tlumivkou, která kompenzuje přebytečný jalový výkon kondenzátorů. Reaktance tlumivky X_L tedy musí být rovna reaktanci kondenzátorové baterie X_C dle:

$$X_L = X_C \quad (4-3)$$

Dynamika SVC zařízení není velká, proto jej nelze použít ke kompenzaci rychlých přechodných dějů.

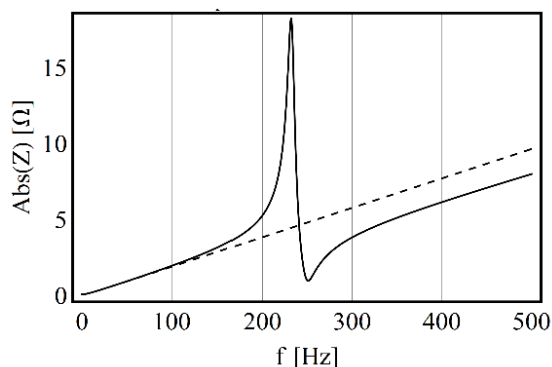
Řízení spínání polovodičových prvků se děje na základě řídicího úhlu získaného výpočtem z naměřeného jalového výkonu. Oblasti řízení jsou na Obr. 22. Změnou řídicího úhlu dochází k deformaci napětí a proudu. Tato deformace způsobuje vznik vyšších harmonických. Právě vznik vyšších harmonických je velkou nevýhodou SVC zařízení.



Obr. 22. Oblasti řízení SVC s řízeným kondenzátorem a řízenou tlumivkou [13]

4.2 Omezení šíření vyšších harmonických

Šíření vyšších harmonických v energetické soustavě je závislé na impedanci sítě pro danou harmonickou v místě připojení zdroje vyšších harmonických. Závislost impedance na frekvenci udává amplitudovou charakteristiku sítě. Dokážeme – li vhodně změnit impedanci sítě pro danou harmonickou, tak omezíme její šíření dále do soustavy. Změnu impedance provedeme zapojením pasivních, nebo aktivních filtrů vyšších harmonických do soustavy. Příklad amplitudové charakteristiky sítě s a bez použití filtru je na Obr. 23.



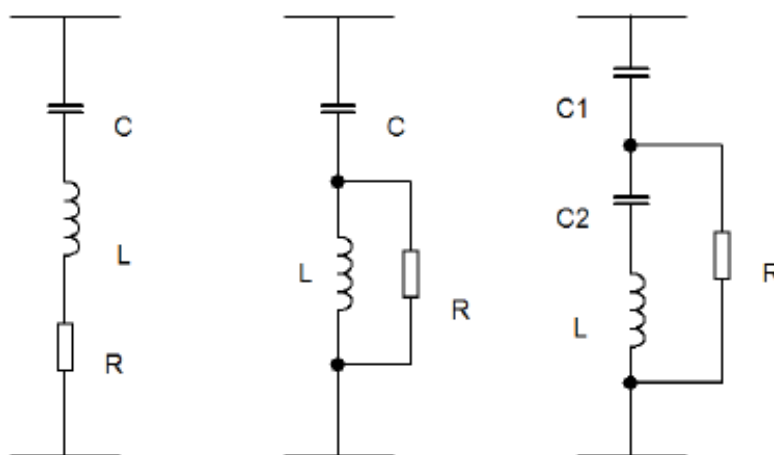
Obr. 23. Příklad amplitudové charakteristiky sítě: čárkovaně – charakteristika bez filtru, plná čára – charakteristika s připojeným filtrem [18]

Další metodou, jak zamezit šíření harmonických do soustavy, je vhodné zapojení vinutí transformátoru. Vhodným zapojením vinutí transformátoru se zamezí šíření třetí harmonické a jejich násobků. V následující podkapitole popíšeme pasivní filtry. Aktivní filtry popíšeme v souvislosti s omezením flickeru v odstavci 4.3.

4.2.1 Pasivní filtry

Princip pasivních filtrů používaných v energetice pro filtraci harmonických je založen na sériové rezonanci mezi kondenzátorem a tlumivkou. Filtry uzavírají proudy vyšších harmonických mezi zdrojem harmonických a zemí. Tím zamezí šíření vyšších harmonických dál do elektrizační soustavy. Tyto filtry patří mezi jednoduché, avšak účinné a spolehlivé filtrační prostředky. Výhodou těchto filtrů je, že je lze navrhnout pro širokou škálu výkonů až po desítky MVar. Další výhodou těchto filtrů je, že kromě filtrace vyšších harmonických fungují jako kompenzace jalového výkonu pro první harmonickou. [18] Na Obr. 24 jsou vyobrazeny tři základní typy pasivních filtrů, používaných v průmyslu pro filtraci vyšších harmonických. Tyto tři typy jsou:

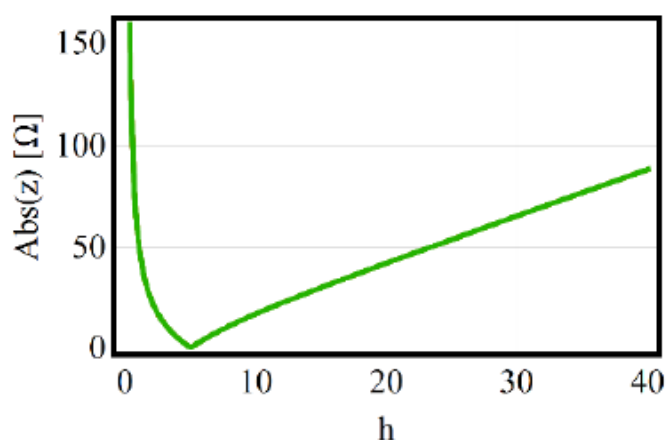
- filtr druhého řádu,
- zatlumený filtr druhého řádu,
- C type filtr.



Obr. 24. Základní pasivní filtry – filtr druhého řádu, zatlumený filtr druhého řádu, C type filtr [18]

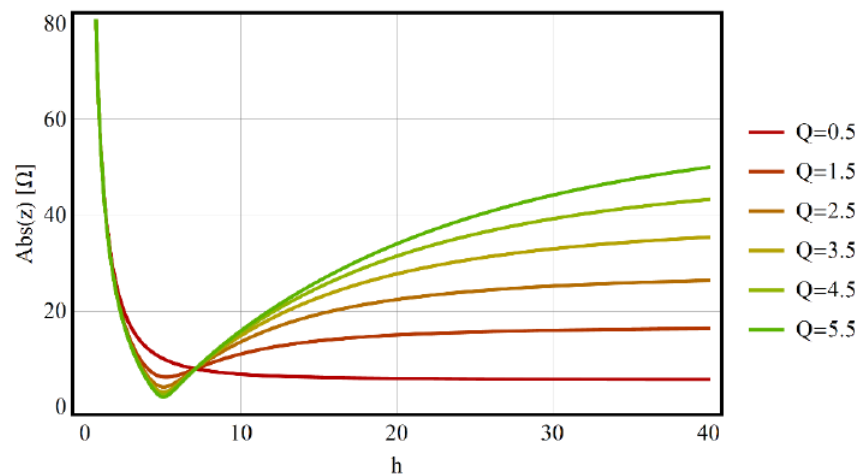
Pasivních filtrů existuje celá řada. Podrobnějším popisem a návrhem pasivních filtrů se zabývá např. [8], [9].

Filtr druhého řádu, viz Obr. 24 vlevo, je nejjednodušší a nejčastěji používaný filtr. Jeho výhodou je jeho jednoduchá konstrukce, která obsahuje pouze dva prvky, tlumivku a kondenzátorovou baterii. Odpor je vlastní odpor tlumivky. Amplitudová charakteristika tohoto filtru je taková, že filtruje danou harmonickou. Příklad amplitudové charakteristiky lze vidět na Obr. 25. [18]



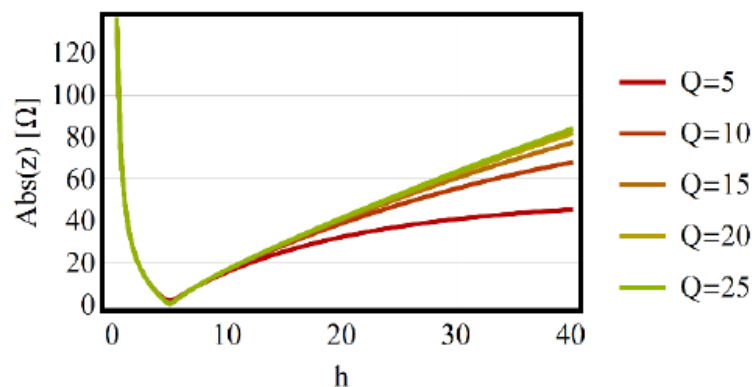
Obr. 25. Příklad amplitudové charakteristiky filtru druhého řádu [18]

Zatlumený filtr druhého řádu, viz Obr. 24 uprostřed, lze použít v aplikacích, kde nepotřebujeme plně odfiltrovat danou harmonickou, nebo je potřeba zabránit nežádoucím rezonancím. Dále se používají v aplikacích, ve kterých chceme omezit velikost dané harmonické a navíc chceme omezit další harmonické. Tvar amplitudové charakteristiky filtru závisí na činiteli jakosti filtru Q . Příklad amplitudové charakteristiky zatlumeného filtru pro různé činitele jakosti lze vidět na Obr. 26. [18]



Obr. 26. Příklad amplitudových charakteristik ztlumeného filtru pro různé činitele jakosti filtru [18]

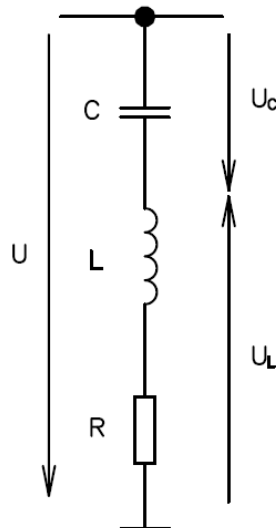
C type filtr, viz Obr. 24 vlevo, se se svou amplitudovou charakteristikou blíží filtru druhého řádu, má však nižší činné ztráty. Příklad amplitudové charakteristiky filtru pro různé činitele jakosti filtru lze vidět na Obr. 27.[18]



Obr. 27. Příklad amplitudových charakteristik C type filtru pro různé činitele jakosti filtru [18]

4.2.2 Návrh pasivního filtru druhého řádu

Popis návrhu frekvenčního filtru si ukážeme na pasivním filtru druhého řádu na Obr. 28. [13], [18]



Obr. 28. Filtr druhého řádu

Pro impedanci obvodu platí rovnice:

$$\hat{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (4-4)$$

Pro stav rezonance platí, že impedance obvodu je rovna reálné složce. Úhlovou frekvenci, při které je imaginární složka impedance nulová, nazýváme rezonanční frekvencí ω_r a popisuje ji Thomsonův vztah rovnicí:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4-5)$$

Rezonanční frekvence tedy odpovídá frekvenci harmonické, kterou chceme omezit. Pro úhlovou frekvenci dané harmonické platí rovnice:

$$\omega_h = \omega_r = h \cdot \omega_1 \quad (4-6)$$

V rovnici (4-6) ω_1 vyjadřuje úhlovou frekvenci základní harmonické v síti a h je řád harmonické vyjádřený rovnicí:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4-7)$$

Vlivem indukčnosti je na kondenzátoru vyšší napětí. Toto zvýšení si vyjádříme parametrem a , který udává o kolik je napětí na kondenzátoru vyšší. Při odvození tohoto parametru zanedbáme odpor filtru a lze psát:

$$a = \frac{U_C}{U} = \frac{X_C}{X_C - X_L} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \quad (4-8)$$

Známe – li napětí na kondenzátoru, tak můžeme určit jeho kompenzační výkon podle vztahu:

$$Q_C = 3 \cdot U_{C1}^2 \cdot \omega_1 \cdot C + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{3 \cdot I_h^2}{\omega_h \cdot C} \quad (4-9)$$

Kompenzační výkon je navýšen o jalové výkony vyvozené jednotlivými harmonickými proudy Q_{Ch} . Aby byly kondenzátory maximálně využity, tak platí podmínka:

$$\frac{Q_{C1}}{Q_{Ch}} \leq 3 \quad (4-10)$$

Kompenzační výkon kondenzátoru je snížen o jalový výkon tlumivky. Výsledný vztah pro kompenzační výkon Q_{CF} pak bude roven:

$$Q_{CF} = 3aU_1^2\omega_1 \cdot C \quad (4-11)$$

Aby nedocházelo k přetěžování kondenzátoru danou vyšší harmonickou proudem, tak musí být navržen na minimální kompenzační výkon Q_{CFmin} dle rovnice:

$$Q_{CFmin} = 3\sqrt{\frac{a}{h}} I_h^2 \omega_1 \cdot U_1 \quad (4-12)$$

Celkový kompenzační výkon je nutné navýšit minimálně a – krát, aby nedocházelo k jeho přetěžování. Platí tedy rovnice pro Q_{CF} :

$$Q_{komp} = \frac{Q_{CF}}{a} \quad (4-13)$$

Ze známého kompenzačního výkonu určíme parametry jednotlivých prvků podle rovnic:

$$C_h = \frac{Q_{CF}}{aU_1^2\omega_1} \quad (4-14)$$

$$L_h = \frac{aU_1^2}{Q_{CF}\omega_1 h^2} \quad (4-15)$$

$$R_h = \frac{L_h\omega_1 h}{Q} \quad (4-16)$$

V rovnici (4-16) pro odpor vyjadřuje Q činitel jakosti cívky.

4.3 Omezení flicker efektu

Omezení šíření flickeru můžeme realizovat jednoduššími a méně ekonomicky náročnými způsoby od úpravy vstupního materiálu až po sofistikovanější řešení, jakými jsou např. použití aktivních filtrů.

4.3.1 Úprava vstupního materiálu pro tavbu

Jak již víme, tak flicker efekt je zapříčiněn kolísáním napětím, které je způsobeno prudkými změnami odebíraného výkonu. Tyto změny ve výkonu se nejvýrazněji projevují na počátku tavby prvního koše, kdy dochází k výraznému kolísání délky oblouku. Cílem tedy bude omezit kolísání délky oblouku a zkrátit čas tavby prvního koše. Kolísání délky oblouku lze omezit roztríděním šrotu na lehký šrot a těžký šrot. Na počátku tavby se pec naplní prvním košem s lehkým šrotem, kde jednotlivé kusy šrotu mají přibližně stejnou velikost. Následně se tato vsázka co nejrychleji roztaví až na tekutý kov. [13], [14]

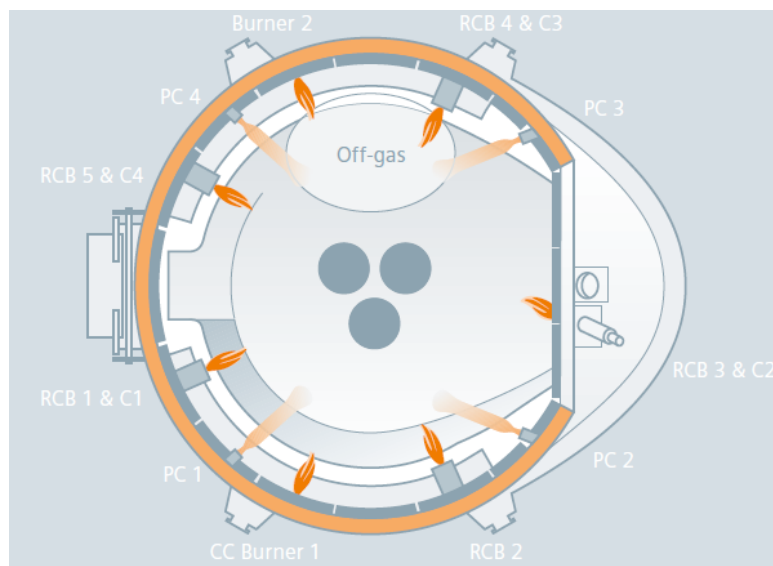
V další etapě lze pec naplnit velkými kusy šrotu, které již budou ponořeny v roztaveném kovu. Roztavený kov působí ve prospěch tavby tím, že pomáhá natavovat ponořené kusy šrotu.

4.3.2 Úprava výrobního procesu

Je dobré, když na počátku tavby prvního koše zůstane na dně pece optimální množství taveniny z předchozí tavby. Tepelná ionizace způsobená žhavou taveninou způsobí stabilnější hoření oblouku. Dále je pro optimální průběh tavby nutné mít správně nastavenou regulaci elektrod. [13], [14]

4.3.3 Použití kyslíkových a plynových hořáků

Použitím plynových a kyslíkových hořáků se do procesu přivede další tepelná energie, čímž se urychlí roztavení materiálu. To se kladně projeví na hodnocení flickeru, jelikož se zkrátí doba tavby a omezí se kolísání napětí. Aby bylo použití hořáků efektivní, musejí být vhodně rozmístěny. Příklad rozmístění kyslíkových a plynových hořáků navržené firmou Siemens je na Obr. 29.



Obr. 29. Rozmístění hořáků v peci [21]

4.3.4 Vhodná konfigurace sítě

Velikost flickeru lze ovlivnit vhodnou konfigurací sítě. Proud, který pec odebírá, prochází přes reaktance přívodní cesty, na kterých způsobuje úbytky napětí. Mění-li se velikost proudu v čase, dochází ke kolísání napětí. Reaktanci lze snížit několika způsoby:

- použitím filtračně kompenzačního zařízení SVC,
- připojením pece do soustavy s vyšším zkratovým výkonem,
- snížením reaktance přívodního vedení např. jeho zdvojením,
- použitím transformátorů s nižším napětím nakrátko.

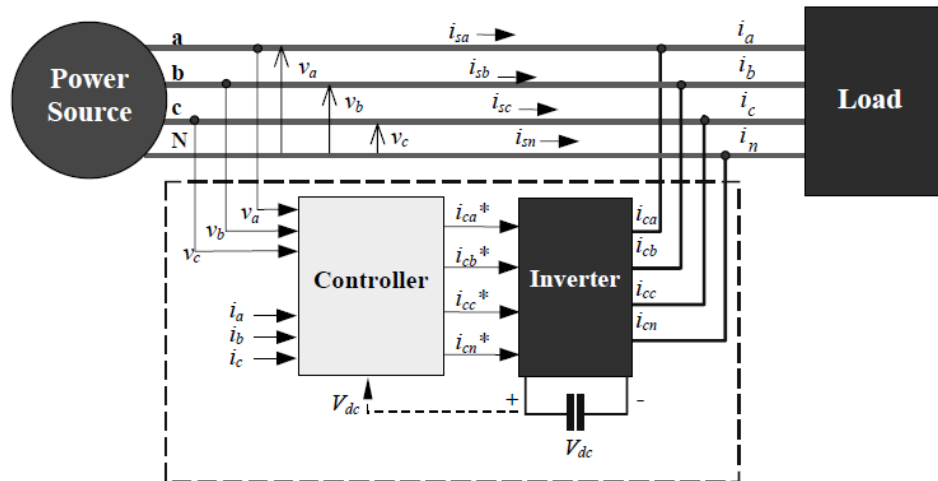
4.3.5 Aktivní filtry

Aktivní filtry řadíme stejně jako SVC zařízení mezi FACTS systémy. Ty se v oblasti přenosu nejčastěji používají k řízení výkonových toků a ke stabilizaci napěťových poměrů v napájecích uzlech. V oblasti průmyslu lze použít pro filtry vyšších harmonických, kompenzaci jalového výkonu, symetrizaci a pro omezení flicker efektu. Aktivní filtry se vzhledem k finanční náročnosti systému zařízení závislého na velikosti aplikace příliš nehodí přímo pro kompenzaci jalového výkonu pece a pro filtraci vyšších harmonických generovaných pecí. Pro kompenzaci jalového výkonu a filtraci vyšších harmonických se použije SVC v kombinaci s pasivními filtry a aktivní filtry se použijí na kompenzaci vzniklého flickeru. Hlavní výhodou aktivních filtrů pro použití kompenzace flickeru je jejich dynamika, která dovoluje rychle reagovat na poklesy napětí. Daní za vyšší dynamiku jsou vyšší ztráty vzniklé spínáním polovodičových prvků. Řízení aktivních filtrů se děje pomocí PWM modulace spínacích signálů. Spínací signály jsou generovány na základě výpočtu z měření časově proměnných hodnot napětí a proudu. [10],0,[12]

Řízení aktivních filtrů probíhá dle následujícího postupu. Naměřené veličiny v souřadném systému abc se pomocí Clarkovy transformace převedou do souřadného systému $\alpha\beta 0$. Následně se na základě matematického modelu provedou výpočty kompenzačních výkonů. V dalším kroce se provede zpětná Clarkova transformace.

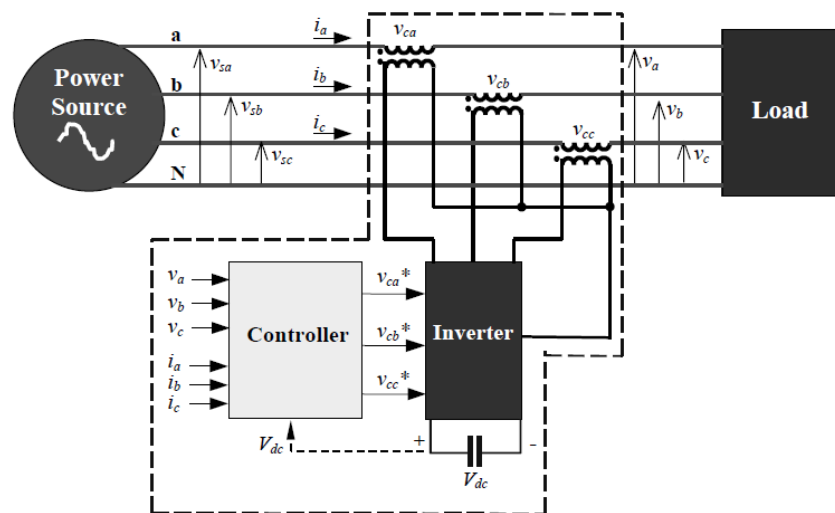
V posledním kroku se provede výpočet spínacích impulzů. Více o řízení polovodičových měničů lze najít v [10], [12].

Pro omezení flickeru se používají tři základní typy filtrů. Prvním typem je paralelní filtr taktéž nazývaný STATCOM, viz Obr. 30. Paralelní filtr funguje na základě injekce proudu do uzlu.



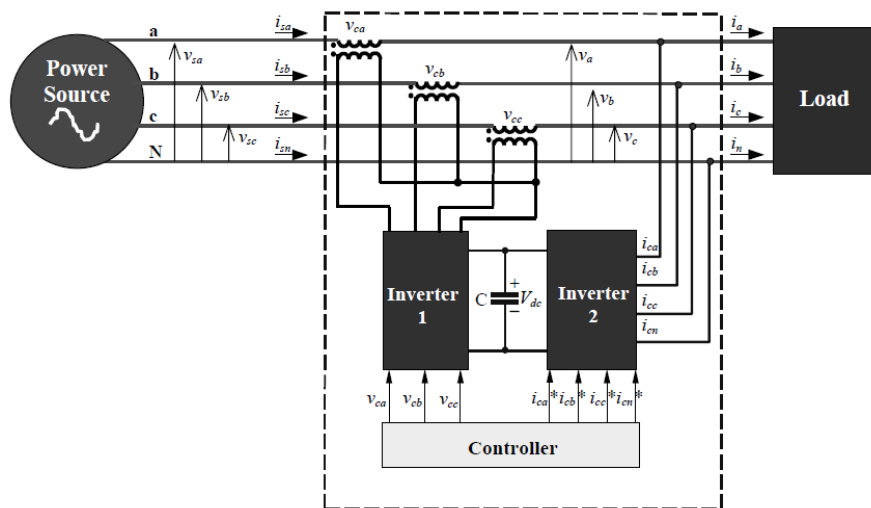
Obr. 30. STATCOM [10]

Dalším používaným zařízením je sériový filtr – SSSC, viz Obr. 31. Ten funguje jako napěťový zdroj zařazený sériově k napájecímu zdroji.



Obr. 31. SSSC filtr [10]

Posledním typem je kombinace STATCOM a SSSC nazývaná UPFC, viz Obr. 32. Tato konfigurace kombinuje výhody obou předchozích zapojení a je univerzálně použitelná.



Obr. 32. UPFC filtr [10]

5. Případová studie

V případové studii se zaměříme na analýzu pracovních charakteristik reálné elektrické obloukové pece a na kompenzaci jalového výkonu pece. Pro analýzu využijeme reálně naměřená data z několika taveb. Z těchto dat postupně určíme závislost reaktančního poměru na účinníku pece a závislost odporu oblouku na účinníku pece. Z těchto zjištěných parametrů napočítáme pracovní diagramy pro jednotlivé odbočky a fáze. Zjištěné pracovní charakteristiky využijeme pro výpočet kompenzačního kondenzátoru a posoudíme vliv kompenzace na kvalitu elektrické energie.

5.1 Popis zkoumaného objektu

Výpočty budeme provádět pro UHP obloukovou pec sloužící k přípravě taveniny v hutnickém podniku zaměřeného na výrobu bezešvých ocelových rour. Parametry pece a pecních zařízení jsou vypsány v Tab. 4.

Tab. 4. Parametry pece

Parametry pecního transformátoru	
S_n	50 MVA
U_n	22 kV
Počet odboček	25
Parametry pecní tlumivky	
U_n	22 kV
Počet odboček	6
Reaktance použité odbočky X	2,5 Ω
Parametry krátké cesty	
X_k	6,2 m Ω
R_k	0,4 m Ω

Výpočty budeme provádět pro konkrétní odbočky pecního transformátoru. Z tavebních listů pece jsme zjistili, že se při tavně výhradně používají odbočky 18, 20 a 21. Parametry těchto odboček jsou vypsány v Tab. 5.

Tab. 5. Použité odbočky pro výpočet

Odbočka	U_s [V]	I_s [A]
18	682	42300
20	715	40400
21	732	39400

Poměrné napětí nakrátko u_k pro jednotlivé odbočky neznáme. Pro výpočty zavedeme napětí nakrátko $u_k = 0.1$. Dále jsme z provozu pece zjistili, že pecní tlumivka je stále připojená přes odbočku 6.

Pro další výpočty si určíme parametry pece nakrátko pro jednotlivé odbočky. Proud nakrátko pro 21. odbočku určíme z rovnice:

$$I_k = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot |\hat{Z}_k|} = \frac{732}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,4 \cdot 10^{-3})^2 + (6,2 \cdot 10^{-3})^2}} = 68 \text{ kA} \quad (5-1)$$

Pro ostatní odbočky provedeme obdobný výpočet. Hodnoty zkratových proudů pro jednotlivé odbočky jsou vypsány v Tab. 6.

Tab. 6. Zkratové proudy používaných odboček

Odbočka	U_s [V]	I_k [kA]
18	682	63,38
20	715	66,44
21	732	68

Abychom byli schopni provést další výpočty, tak si z naměřených dat musíme určit reaktanční poměr pro jednotlivé odbočky. Získání reaktančního poměru je vysvětleno v následující kapitole.

5.2 Výpočet závislosti reaktančního poměru na účinníku

Reaktanční poměr určíme z naměřených dat následujícím způsobem. Nejdříve si definujeme, pro jakou napěťovou odbočku jej budeme počítat. Následně musíme vybrat vhodná data pro jeho výpočet. Vybíráme taková data, která se co nejvíce blíží symetrickému stavu. Výběrem symetrických stavů omezíme vliv napěťových nesymetrií, které vznikají zkraty elektrod se vsázkou. Tímto opatřením můžeme zavést

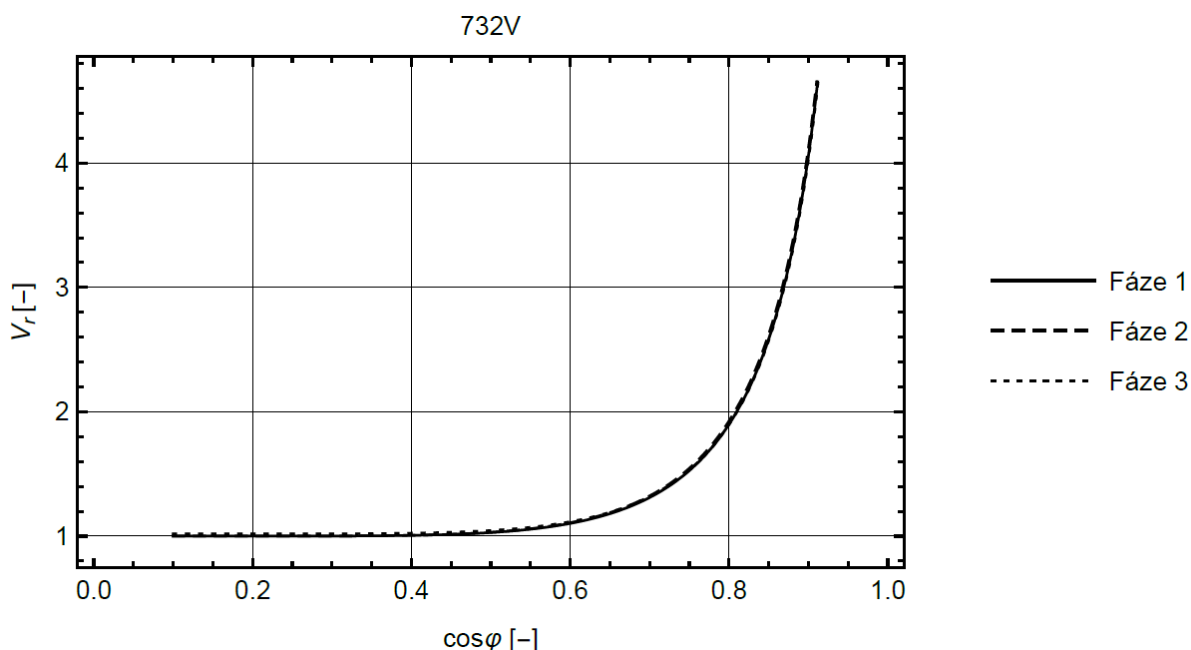
ve výpočtu reaktančního poměru zjednodušení, že oblouky hoří proti zemi. Máme – li vybraná data, tak vypočítáme reaktanční poměr dle rovnice:

$$V_r(\cos\varphi) = \frac{X_p(\cos\varphi)}{X_k} = \frac{1}{X_k} \cdot \left(\frac{u_s}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{1}{q(\cos\varphi)} \quad (5-2)$$

V rovnici (5-2) je napětí u_s naměřená hodnota sekundárního napětí pecního transformátoru, q je naměřený jalový výkon jedné fáze. Pracovní reaktance X_p je závislá na okamžitém účinníku fáze. Účinník získáme výpočtem z naměřeného jalového a činného výkonu. Výpočet účinníku provedeme následujícím způsobem:

$$\cos\varphi = \text{Cos}[\text{Arg}[p + j q]] \quad (5-3)$$

Veličiny p a q v rovnici (5-3) jsou hodnoty naměřených výkonů. Protože je provoz pece regulován na vysoké hodnoty účinníku, tak musíme najít vhodnou funkci, kterou vypočítané hodnoty proložíme. Tímto proložením získáme hodnoty i pro nízké účinníky. Jak jsme v průběhu výpočtů zjistili, tak výběr funkce má zásadní vliv na správnost navazujících výsledků. Zjištěné závislosti reaktančních poměrů pro 21. odbočku lze vidět na Obr. 33.

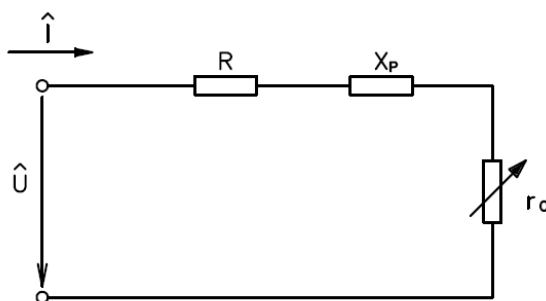


Obr. 33. Závislost $V_r(\cos\varphi)$ pro odbočku 732 V

Zjištěné charakteristiky reaktančních poměrů pro jednotlivé fáze jsou stejné. Ve skutečnosti však dochází k odchýlkám jednotlivých reaktančních poměrů, které jsou způsobené nesymetrií elektrických parametrů krátké cesty. Reaktanční poměry pro ostatní odbočky jsou stejné, jelikož se jedná o konstrukční parametr krátké cesty. Proložení zjištěných charakteristik vypočítanými hodnotami reakčních poměrů je vloženo do přílohy A. V příloze A si lze všimnout, že vypočtené reaktanční poměry se pohybují ve velmi úzkém intervalu účinníků. Tento jev je způsoben regulací elektrod.

5.3 Výpočet závislosti odporu oblouku na účinníku

S měnícím se účinníkem a reaktančním poměrem dochází také ke změnám odporu oblouku. Při výpočtu závislosti odporu oblouku na účinníku využijeme zjištěnou závislost reaktančního poměru z předešlé kapitoly. Výpočet provedeme tak, že budeme lineárně měnit hodnotu odporu oblouku. V závislosti na ní se bude měnit impedance a účinník obvodu. Impedanci obvodu si popíšeme na základě zjednodušeného náhradního schématu na Obr. 34.



Obr. 34. Náhradní schéma pro výpočet závislosti odporu oblouku na účinníku

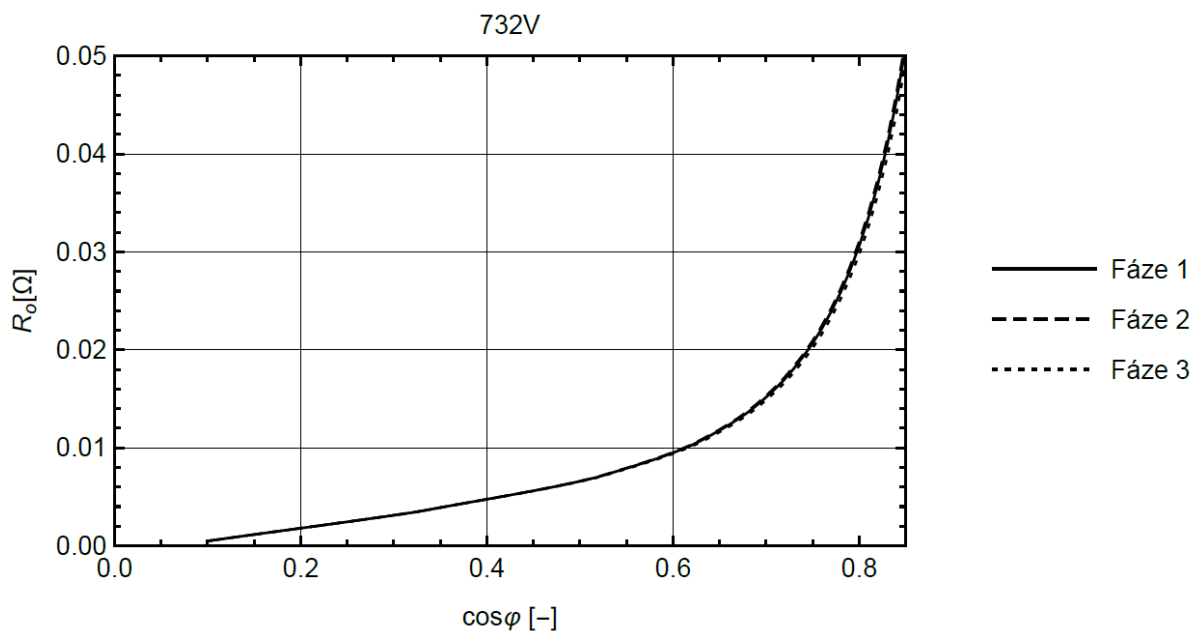
Impedanci náhradního schématu popíšeme následující rovnicí:

$$\hat{Z} = R_k + r_0 + j(V_r x_k) \quad (5-4)$$

Z (5-4) určíme účinník jako:

$$\cos \varphi = \cos \left[\left(\text{Arg} (R_k + r_0 + j(V_r x_k)) \right) \right] \quad (5-5)$$

Výsledné závislosti pro 21. odbočku jsou vyobrazeny na Obr. 35. Na obrázku si lze všimnout, že se jednotlivé charakteristiky příliš neliší. To je způsobeno závislostí na reaktančním poměru, který je pro všechny tři fáze stejný.



Obr. 35. Závislosti odporů na účinníku pro odbočku 732 V

Pomocí výpočtů jsme zjistili, že závislost odporu oblouku na účinníku je pro ostatní odbočky stejná.

5.4 Výpočet pracovních charakteristik

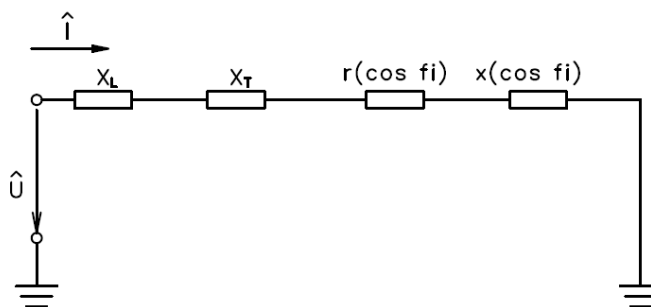
Výpočet pracovních charakteristik vychází z parametrů vypočítaných v kapitolách 5.2 a 5.3. Postupně zjistíme následující pracovní charakteristiky pece:

- na straně elektrod,
- na primární straně pecního transformátoru,
- na primární straně s kompenzací jalového výkonu.

Z hlediska vlivu pece na elektrizační soustavu jsou důležité body b) a c) a jejich vzájemné porovnání.

5.4.1 Pracovní charakteristiky

Obvod elektrické obloukové pece si popíšeme zjednodušeným náhradním schématem pro jednu fázi, viz Obr. 36. Toto zjednodušení lze provést výběrem symetrických stavů z naměřených hodnot. Výpočet charakteristik provedeme pro 21. odbočku.



Obr. 36. Náhradní schéma pro výpočet pracovních charakteristik

Impedance náhradního schématu je popsána rovnicí:

$$\hat{Z} = r(\cos\varphi) + j(X_T + X_L + x(\cos\varphi)) \quad (5-6)$$

Parametr X_T reprezentuje reaktanci pecního transformátoru, X_L reprezentuje reaktanci pecní tlumivky. Parametry, $r(\cos\varphi)$ a $x(\cos\varphi)$ charakterizují krátkou cestu.

Ze známé impedance obvodu si vypočítáme proudy dle rovnice :

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3} \cdot \hat{Z}} \quad (5-7)$$

Napájecí napětí \hat{U} budeme uvažovat ideální bez fázového posunu.

Teď už zbývá určit činný a jalový výkon. Nejdříve určíme velikost zdánlivého výkonu dle rovnice:

$$\hat{S} = \hat{U} \cdot \hat{I}^* \quad (5-8)$$

Následně určíme činný výkon jako:

$$P = Re\{\hat{S}\} \quad (5-9)$$

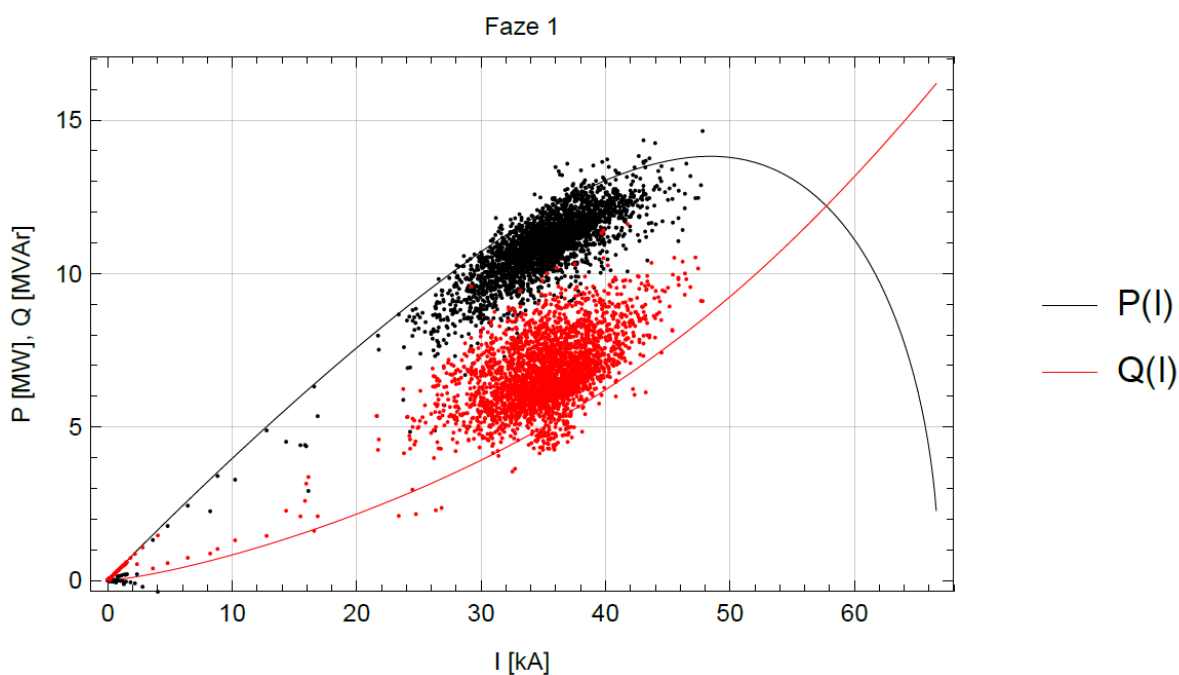
Nakonec určíme jalový výkon podle rovnice:

$$Q = \text{Im}\{\hat{S}\} \quad (5-10)$$

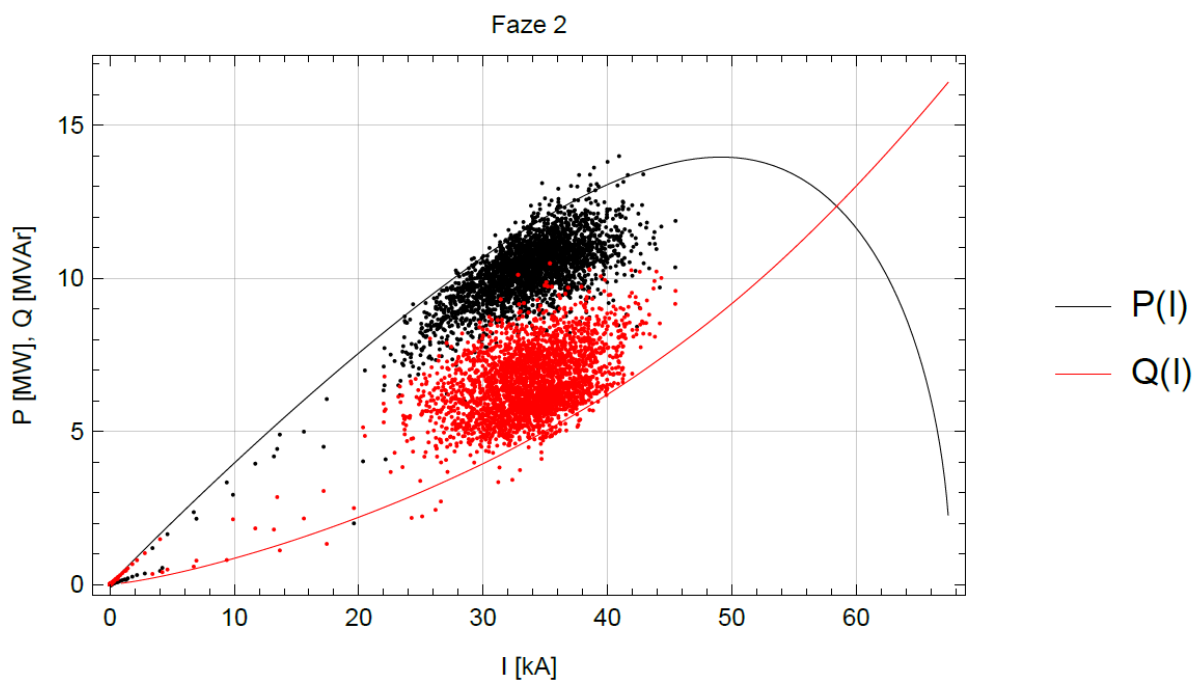
Dále určíme účinník obvodu jako:

$$\cos\varphi = \text{Cos}[\text{Arg}(\hat{S})] \quad (5-11)$$

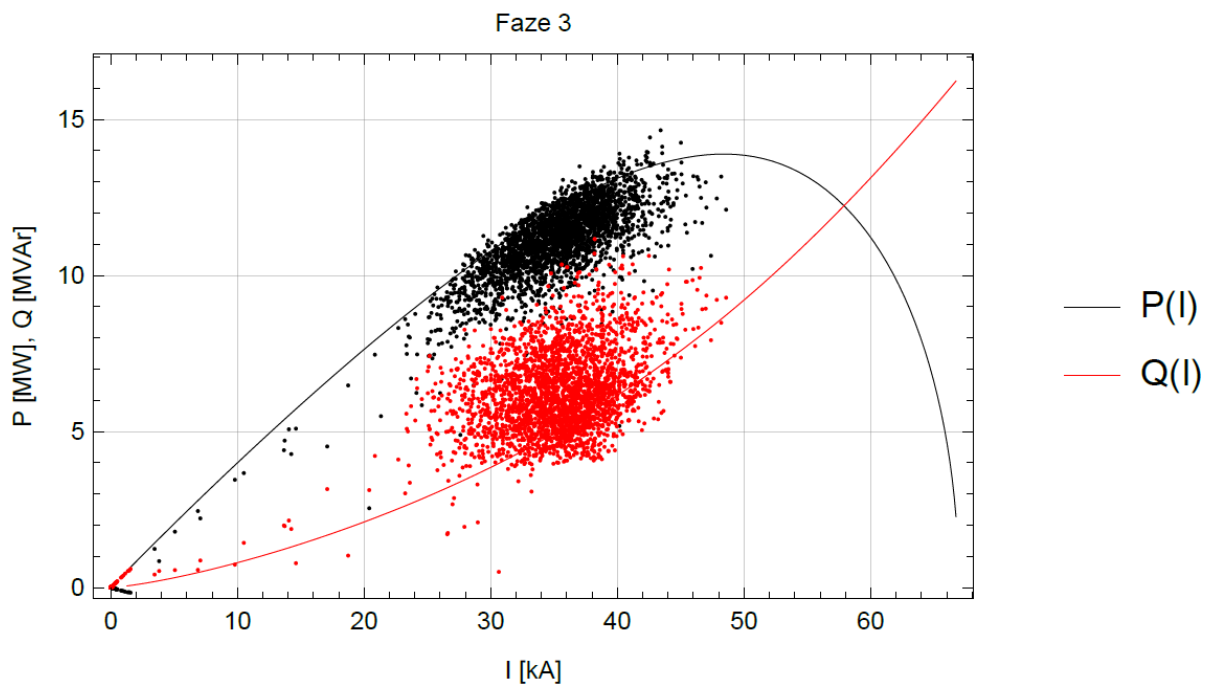
Výsledné pracovní charakteristiky jednotlivých fází získáme vynesáním výkonů P a Q v závislosti na pecním proudu I . Abychom si ověřili správnost výpočtů, tak provedeme proložení vypočítaných pracovních charakteristik naměřenými daty. Výsledné pracovní charakteristiky proložené naměřenými daty lze vidět na Obr. 37, Obr. 38 a Obr. 39. Pracovní charakteristiky ostatních odboček jsou vloženy do přílohy B.



Obr. 37. Ukázka proložení vypočítaných pracovních charakteristik naměřenými daty pro fázi 1



Obr. 38. Ukázka proložení vypočítaných pracovních charakteristik naměřenými daty pro fázi 2

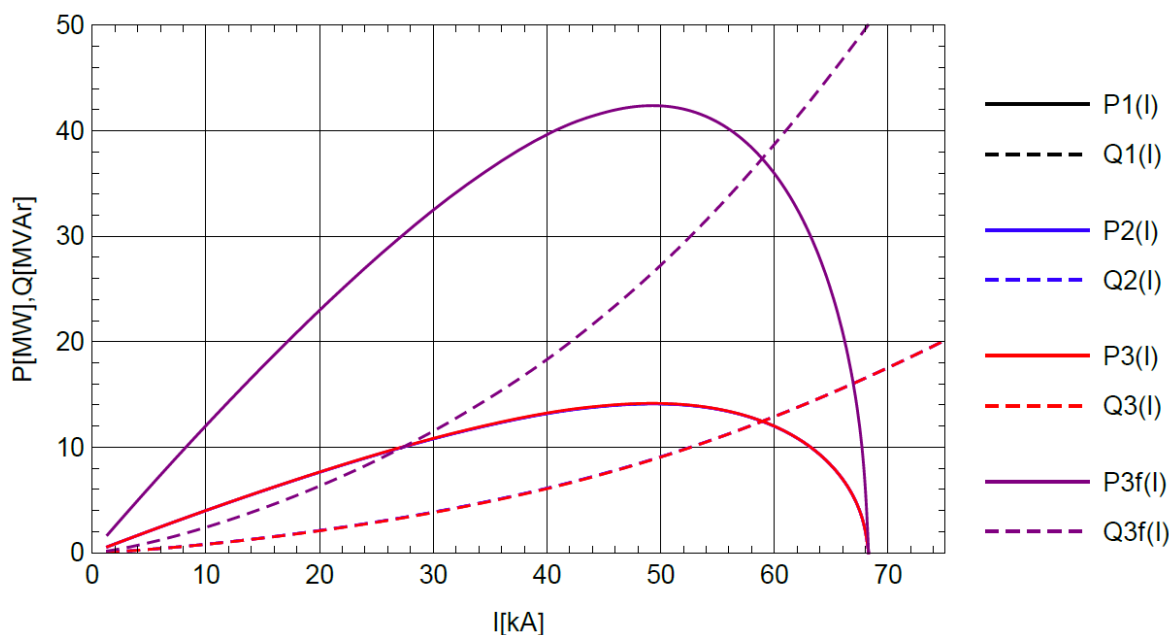


Obr. 39. Ukázka proložení vypočítaných pracovních charakteristik naměřenými daty fázi 3

Z proložení dat napočítanými charakteristikami je vidět, že výpočet reaktančního poměru proběhl správně. Odchyly od naměřených dat, které lze pozorovat v Obr. 37

až Obr. 39, jsou závislé na správnosti výpočtu reaktančního poměru. Při výpočtech jsme zjistili, že pracovní charakteristiky jsou velmi citlivé na volbu reaktančního poměru. Již drobné změny v reaktančním poměru vyvozují velké změny v pracovních charakteristikách. Abychom byli schopni napočítat přesné charakteristiky, museli bychom provést podrobnější měření.

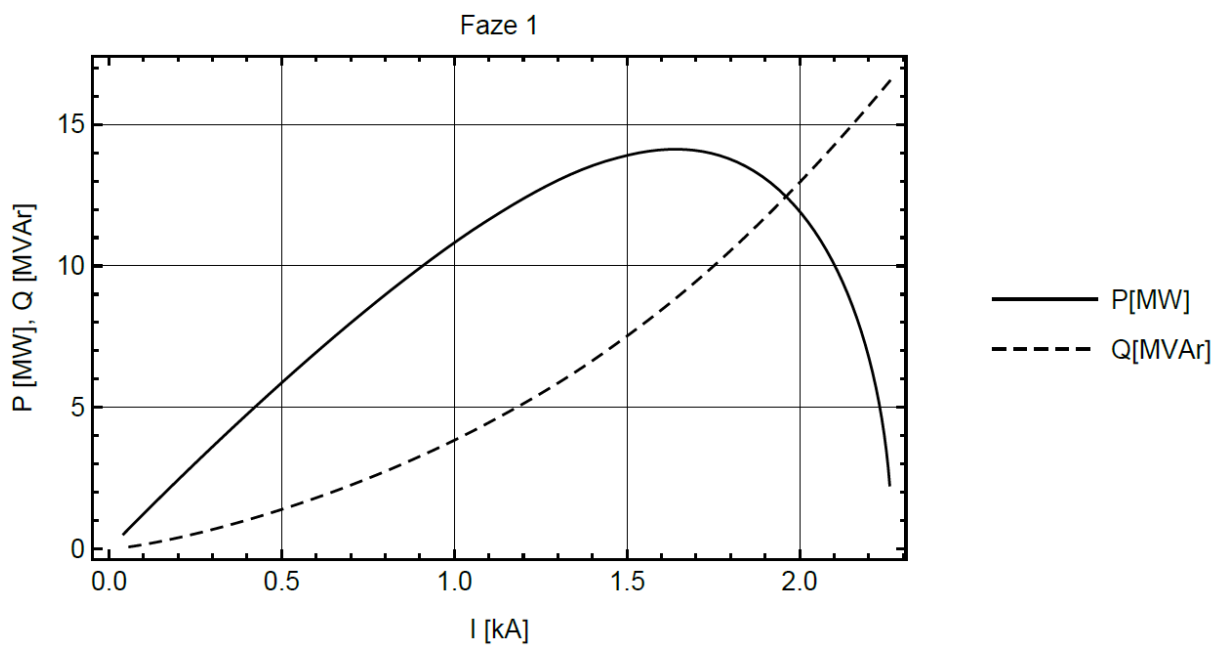
Na Obr. 40 jsou vyobrazeny pracovní charakteristiky pro jednotlivé fáze.



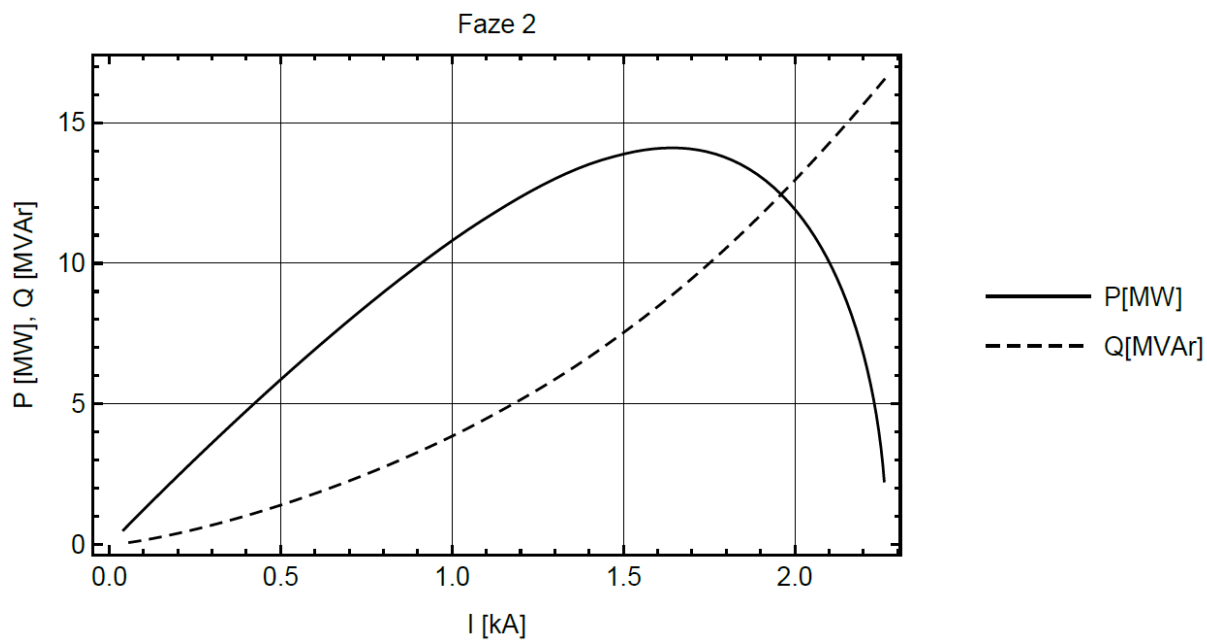
Obr. 40. Pracovní charakteristiky elektrické obloukové pece pro odbočku 732 V

V Obr. 40 křivky P_1, Q_1 , P_2, Q_2 , P_3, Q_3 odpovídají pracovním charakteristikám jednotlivých fází. Lze si všimnout, že napočítané charakteristiky jsou stejné. To je způsobeno zjednodušeními provedených ve výpočtech. Ve skutečnosti se mohou pracovní charakteristiky lišit v závislosti na elektrických parametrech krátké cesty. Křivky P_{3f}, Q_{3f} jsou třífázové charakteristiky pece.

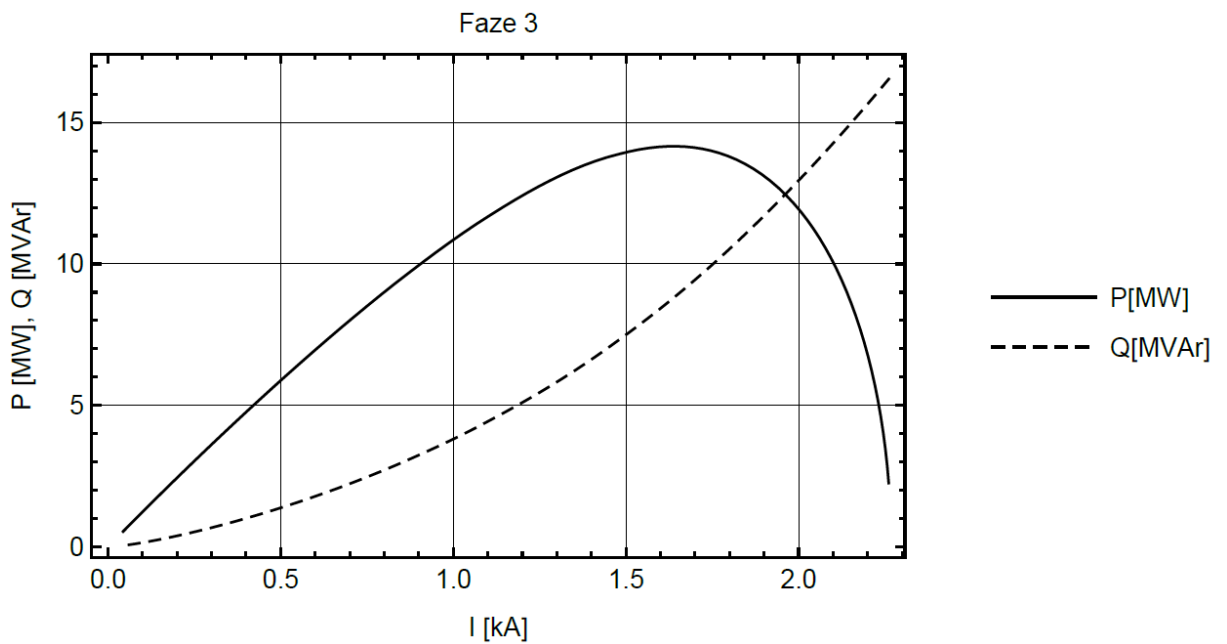
V dalším kroku provedeme přepočítání pracovních charakteristik na napěťovou hladinu 22 kV. Přepočítání provedeme na základě znalosti převodu transformátoru. Tyto charakteristiky jsou důležité z hlediska posouzení vlivu pece na elektrizační soustavu a pro návrh opatření vedoucích ke zlepšení kvality elektrické energie. Tyto charakteristiky lze vidět na Obr. 41 až Obr. 43. Charakteristiky pro ostatní odbočky jsou v příloze B.



Obr. 41. Přepočtená pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 1

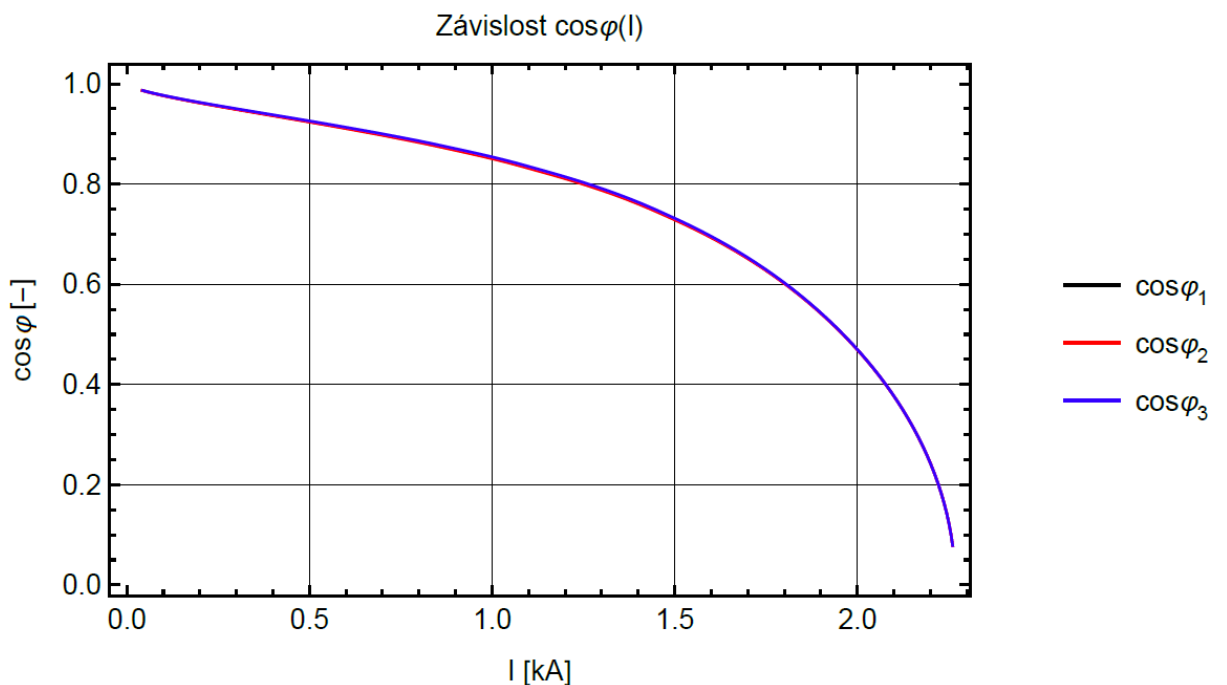


Obr. 42. Přepočtená pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 2



Obr. 43. Přepočtená pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 3

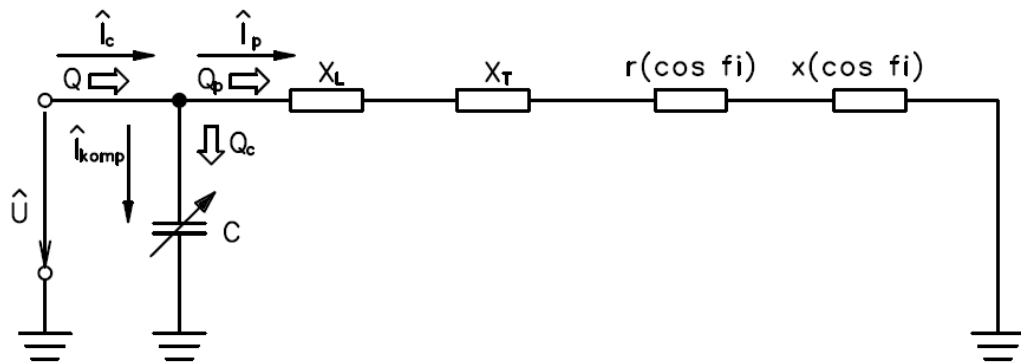
Pro tyto charakteristiky si vyneseme závislosti účinníku na pecním proudu pro všechny tři fáze. Výsledné závislosti jsou na Obr. 44. Z těchto závislostí plyne, že se zvyšujícím se proudem klesá účinník a roste jalový výkon.



Obr. 44. Závislosti účinníku na odebíraném pecním proudu pro všechny fáze

5.5 Výpočet kompenzační kapacity

Pro odvození kompenzační kapacity vyjdeme z náhradního schématu na Obr. 45.



Obr. 45. Náhradní schéma jedné fáze s kompenzací

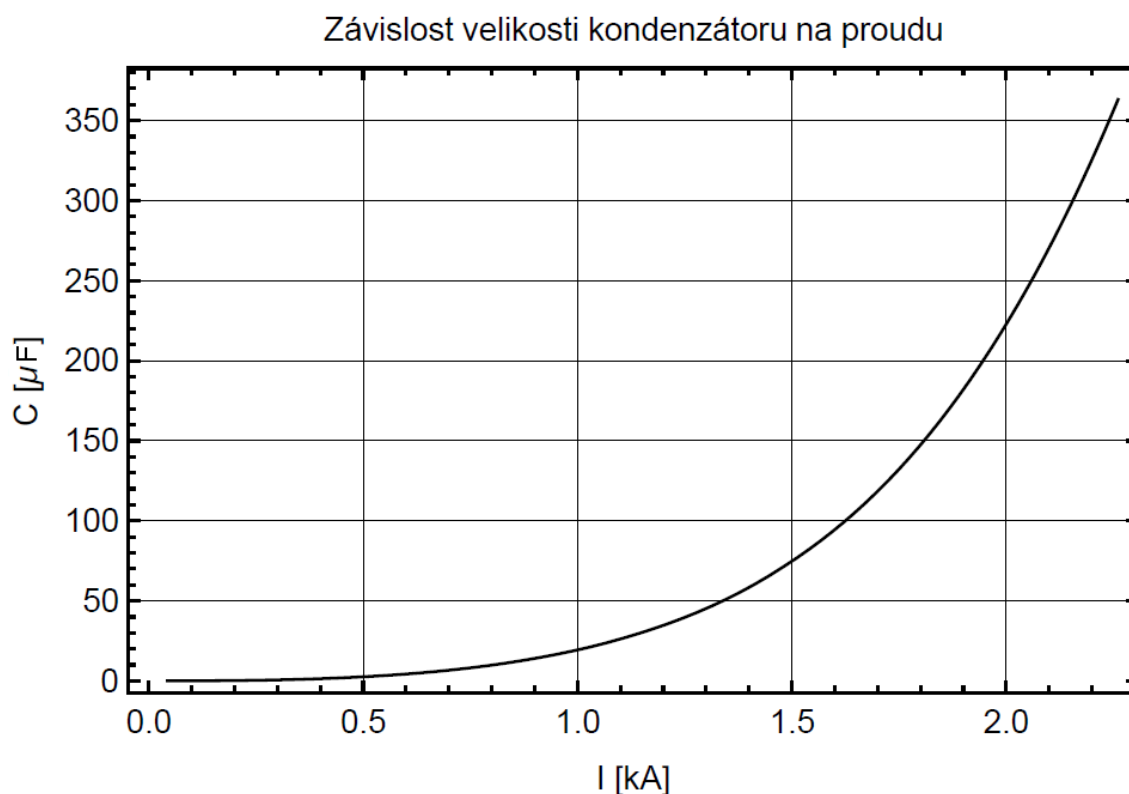
Abychom vykompenzovali induktivní jalový výkon pece Q_p , tak musí platit následující podmínka:

$$Q_c = Q_p \quad (5-12)$$

Toho docílíme tím, že reaktance kondenzátoru X_c bude rovna pracovní reaktanci pece X_p podle rovnice:

$$X_c = X_p \quad (5-13)$$

V kapitole 5.4.1 jsme vypočítali jalový výkon jedné fáze. Tento jalový výkon je potřeba kompenzovat, abychom splnili požadavky na účinnost uvedené v kapitole 4.1. Při výpočtu velikosti kondenzátoru vyjdeme z odvození v kapitole 4.2, které aplikujeme na zjištěné pracovní charakteristiky. Výsledná závislost kapacity na proudu odebíraném pecí je na Obr. 46. Na zjištěné charakteristice si lze všimnout, že její průběh je podobný průběhu reaktančního poměru.

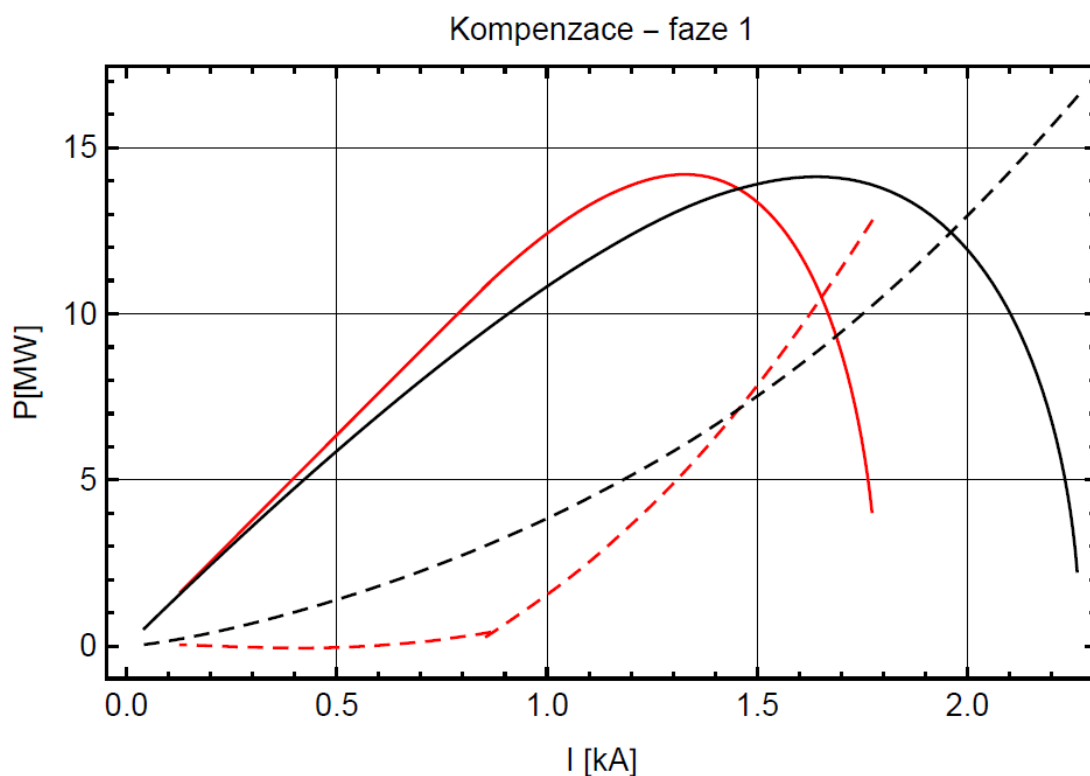


Obr. 46. Závislost velikosti kompenzační kapacity na proudu pece

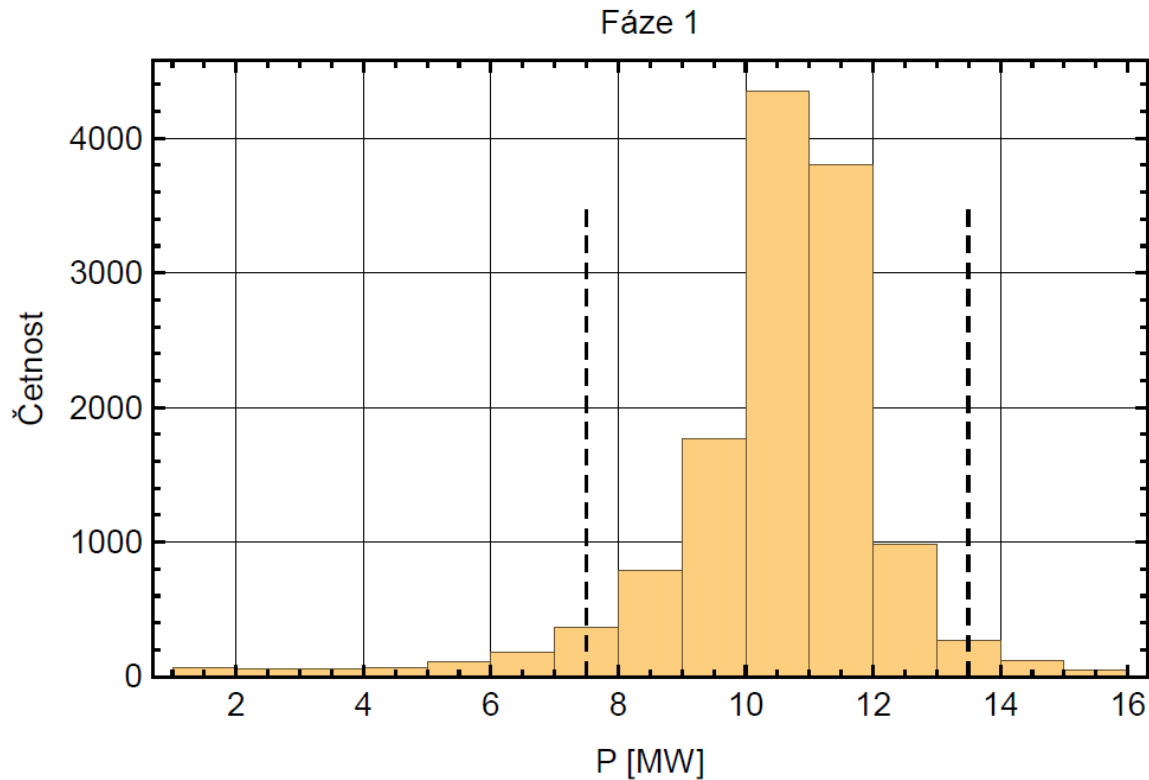
Ve skutečnosti se hodnoty pecního proudu pohybují v relativně úzkém intervalu hodnot. Pro kompenzaci jalového výkonu by tedy stačilo použít menší velikost kompenzačního kondenzátoru, to ale není možné. Aby se předcházelo přetěžování kondenzátoru, tak se volí velikost kapacity vyšší.

5.6 Kompenzace jalového výkonu

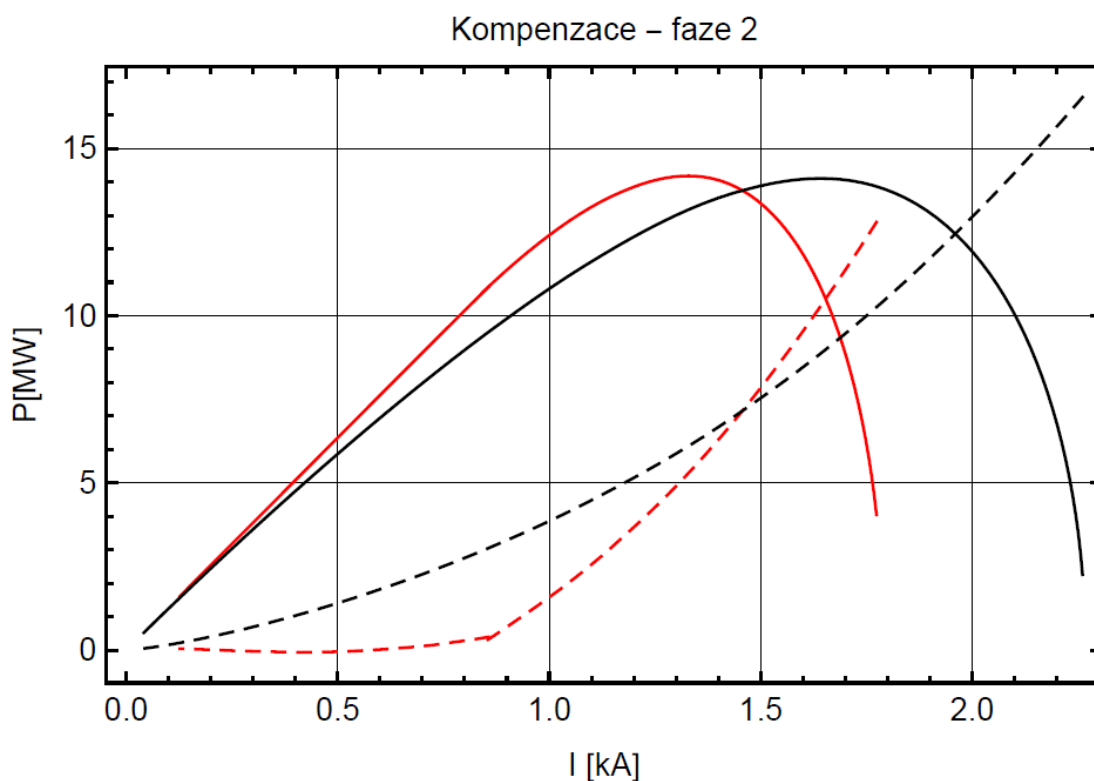
Známe – li hodnoty kompenzačních kapacit, tak můžeme provést kompenzaci jalového výkonu. Na Obr. 47, Obr. 49, Obr. 51 jsou vyobrazené zjištěné kompenzované pracovní charakteristiky. Dále si pro každou fázi zjistíme výkonů oblouku viz Obr. 48, Obr. 50, Obr. 52 a vyznačíme si oblast, ve které se vyskytuje 95 % hodnot. Na základě tohoto pak budeme hodnotit vliv kompenzace na provoz pece.



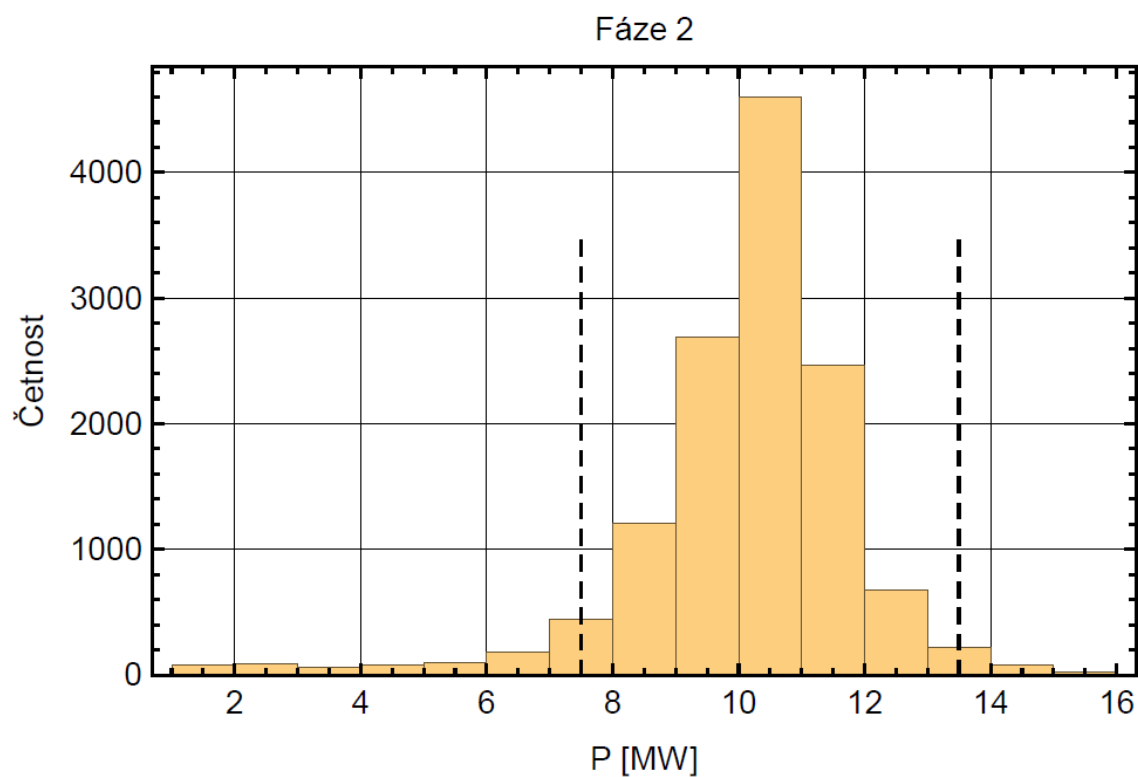
Obr. 47. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára



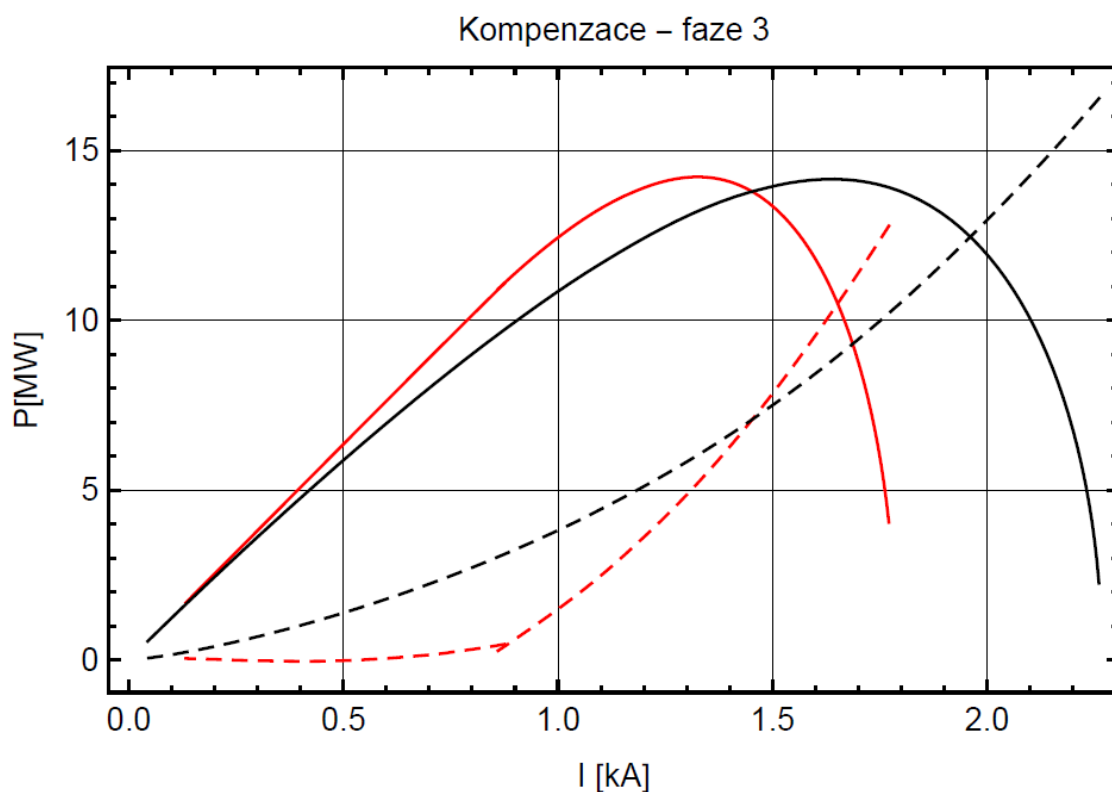
Obr. 48. Četnost naměřených výkonů pro fázi 1



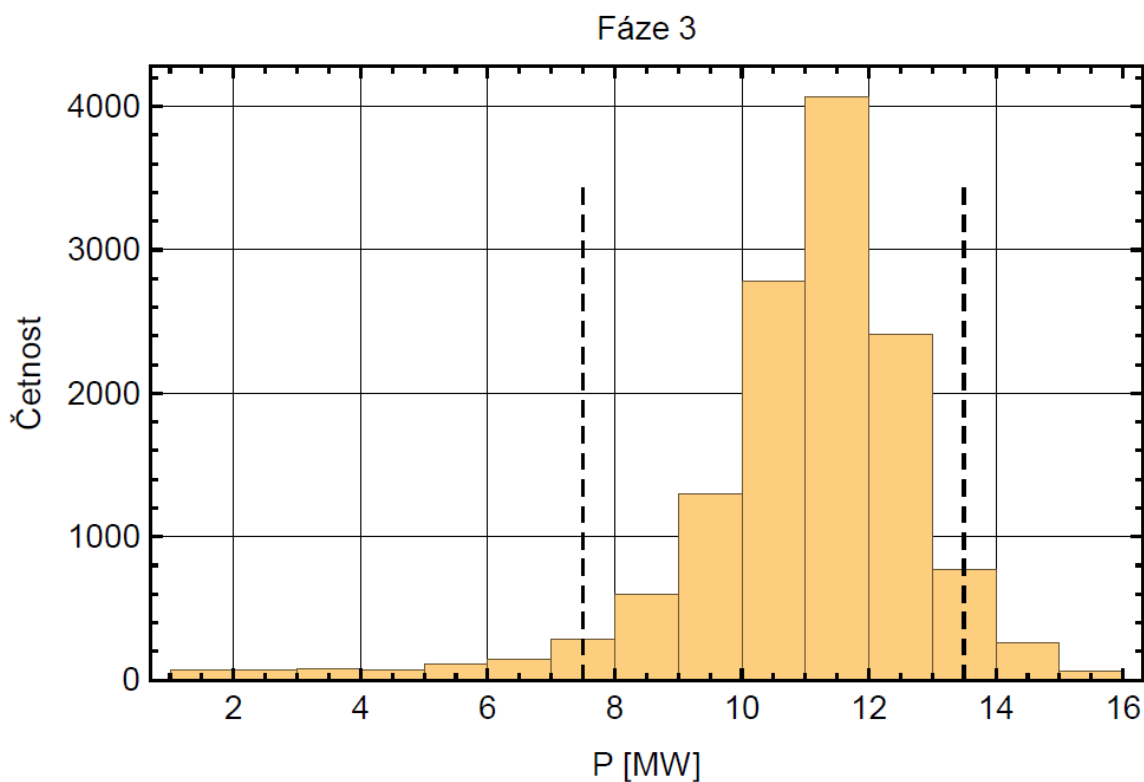
Obr. 49. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára



Obr. 50. Četnost naměřených výkonů pro fázi 2



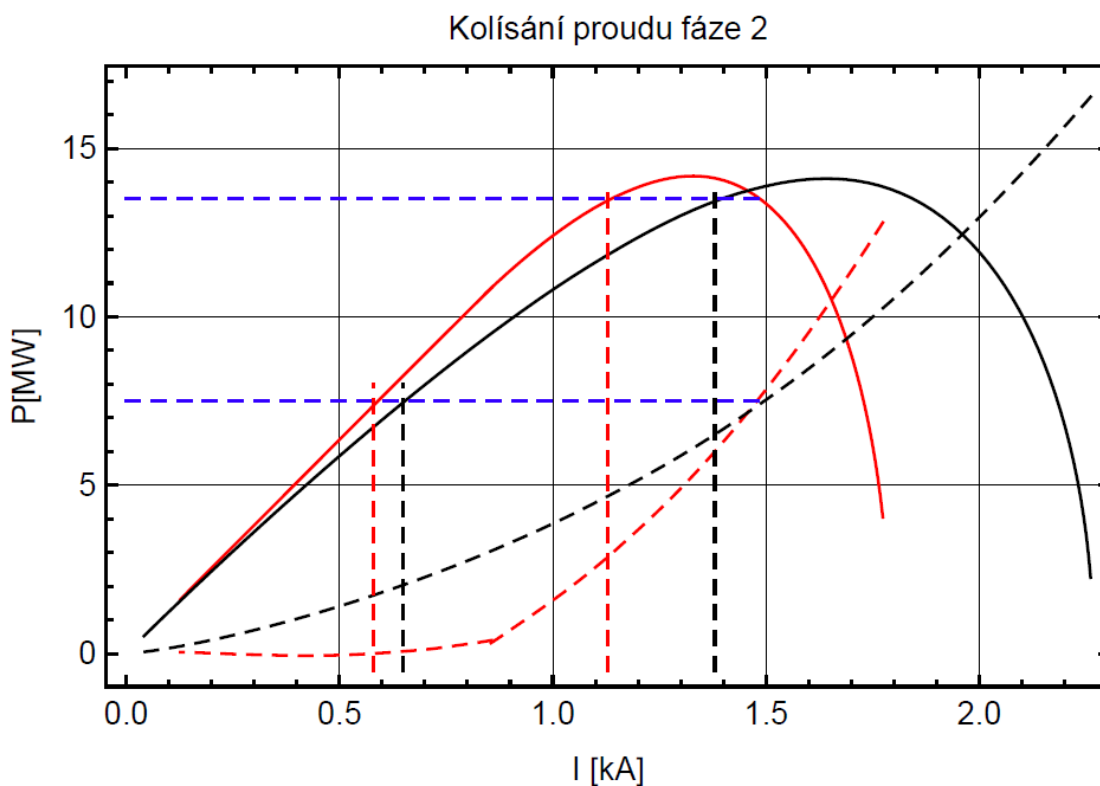
Obr. 51. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára



Obr. 52. Četnost naměřených výkonů pro fázi 3

Z výsledných charakteristik lze vyčíst, že jalový výkon je zcela kompenzován jen v části charakteristiky a od jistého okamžiku již není kompenzována celá hodnota jalového výkonu. Jalový výkon je zcela kompenzován v oblasti vyšších účinníků a to do hodnoty účinníku 0,65. Toto chování souvisí s průběhem reaktančního poměru, který je od účinníku 0,65 velmi blízký jedné. Od hodnoty účinníku je reaktanční poměr roven jedné a při dalším poklesu již zůstává konstantní, viz Obr. 34. Podíváme – li se však na průběh odporu oblouku, tak zjistíme, že jeho hodnota s klesajícím účínkem postupně klesá k nule, viz Obr. 35. Klesající odpor oblouku způsobuje růst pecního proudu. Právě nárůst proudu při konstantní reaktanci způsobí růst jalové energie. Protože je kompenzace jalového výkonu nastavena na reaktanci krátké cesty, tak není tento jalový výkon zcela kompenzován.

Abychom mohli posoudit kolísání pecního proudu, tak si v pracovních charakteristikách vyznačíme pracovní oblast, ve které se nachází 95% všech hodnot činných výkonů oblouku. Vliv kompenzace na kolísání pecního proudu si ukážeme na pracovních charakteristikách pro fázi 2, viz Obr. 53.



Obr. 53. Ukázka vlivu kompenzace jalového výkonu na kolísání pecního proudu

V Obr. 53 je modrou čárkovanou čarou vyznačena oblast, ve které se nachází 95 % výkonů oblouku druhé fáze. Červená čárkovaná čára vymezuje oblast kolísání pecního proudu po provedení kompenzace a černá čárkovaná čára označuje oblast kolísání pecního proudu před provedením kompenzace.

Z Obr. 53 je vidět, že se vlivem kompenzace jalového výkonu snížila velikost intervalu kolísání pecního proudu z hodnoty 750 A na hodnotu 550 A. Snížením kolísání pecního proudu dojde ke snížení kolísání napětí. Kolísání napětí je způsobeno úbytky napětí na reaktancích způsobené proudovými rázy. Díky kompenzaci dojde ke snížení odběru a kolísání jalových proudů odebíraných ze sítě. Omezení kolísání jalových proudů výrazně sníží kolísání napětí. Snížením přenosu jalových proudů se kladně projeví na hodnocení ztrát na vedení a na navýšení přenosové schopnosti vedení.

Provedeme – li tuto analýzu u všech fází a odboček, tak dojdeme ke stejným závěrům.

Výsledky v této kapitole ukazují, že vhodnou kompenzací jalového výkonu snížíme odebíraný jalový výkon a omezíme flicker efekt způsobený kolísáním odebíraného proudu.

Závěr

Tato práce se zabývá analýzou pracovních charakteristik reálné elektrické obloukové pece. V rámci této analýzy jsme se zaměřili zejména na ty faktory, které mají vliv na pracovní charakteristiky obloukové pece.

V první části této práce jsme popsali základní konstrukční prvky elektrické obloukové pece. Dále jsme popsali pracovní cyklus pece, jehož znalost je potřebná k pochopení rušivých vlivů, které pec generuje. Nakonec jsme popsali jednotlivé rušivé vlivy pece na elektrizační soustavu.

Ve druhé části práce jsme popsali tvorbu kruhového diagramu a pracovních charakteristik. Popsali jsme reaktanční poměr, který, jak se ukázalo při výpočtech, má zásadní vliv na chování pece.

Ve třetí části jsme popsali problematiku kvality elektrické energie z pohledu jak na ni nahlíží norma ČSN EN 50160. Na základě této normy jsme definovali limity pro jednotlivé rušivé vlivy. Definovali jsme flicker efekt a jeho nepříznivé vlivy na lidský organismus.

V další části práce jsme se věnovali snížení rušivých vlivů elektrické obloukové pece na elektrizační soustavu. Zvláště jsme se zaměřili na možnosti kompenzace jalového výkonu pomocí SVC zařízení. V oblasti zamezení šíření vyšších harmonických jsme se zaměřili na popis pasivních filtrů a návrh filtru vyšších harmonických druhého stupně. V poslední řadě jsme popsali zamezení vzniku a omezení šíření flicker efektu.

V poslední části jsme provedli výpočet pracovních charakteristik reálné obloukové pece. Při konstrukci pracovních charakteristik jsme vycházeli z naměřených dat. V prvním kroku jsme museli vybrat vhodná data pro zpracování. Vybírali jsme symetrické stavy. Tímto krokem jsme vyloučili vliv plovoucího středu hořících oblouků a mohli jsme využít zjednodušené schéma, kde uvažujeme, že oblouk hoří proti zemi. Z těchto dat jsme určili reaktanční poměr. Protože nám chyběla data pro nízké účinníky, tak jsme vycházeli z teoretické závislosti reaktančního poměru a provedli jsme proložení vypočítaných dat vhodnou funkcí. Jak se později ukázalo, volba správné

funkce reaktančního poměru měla zásadní vliv na výpočet pracovních charakteristik a na výpočet kompenzace jalového výkonu. Ze známého reakčního poměru jsme získali závislost odporu oblouku na účinníku. Závislost reaktančního poměru a odporu oblouku na účinníku jsme využili pro výpočet pracovních charakteristik. Nakonec jsme provedli výpočet kompenzace jalového výkonu. Podařilo se nám snížit odběr jalového proudu v části pracovní oblasti k nule. Při správném nastavení kompenzace jalového výkonu lze výrazně snížit kolísání pecního proudu. Omezením kolísání pecního proudu snížíme kolísání napětí a tím snížíme míru vnímání flickeru.

Závěrem můžeme konstatovat, že znalost pracovních charakteristik obloukových pecí je nezbytná pro správný návrh filtračně kompenzační stanice, která kromě filtrace vyšších harmonických a kompenzace jalového výkonu také zmenšuje velikost intervalu kolísání proudu odebíraného pecí. Právě snížení kolísání proudu se kladně projevuje na hodnocení míry vnímání flickeru. Pro omezení flickeru lze tedy použít aktivní filtr o menším výkonu což se kladně projeví na jeho ceně.

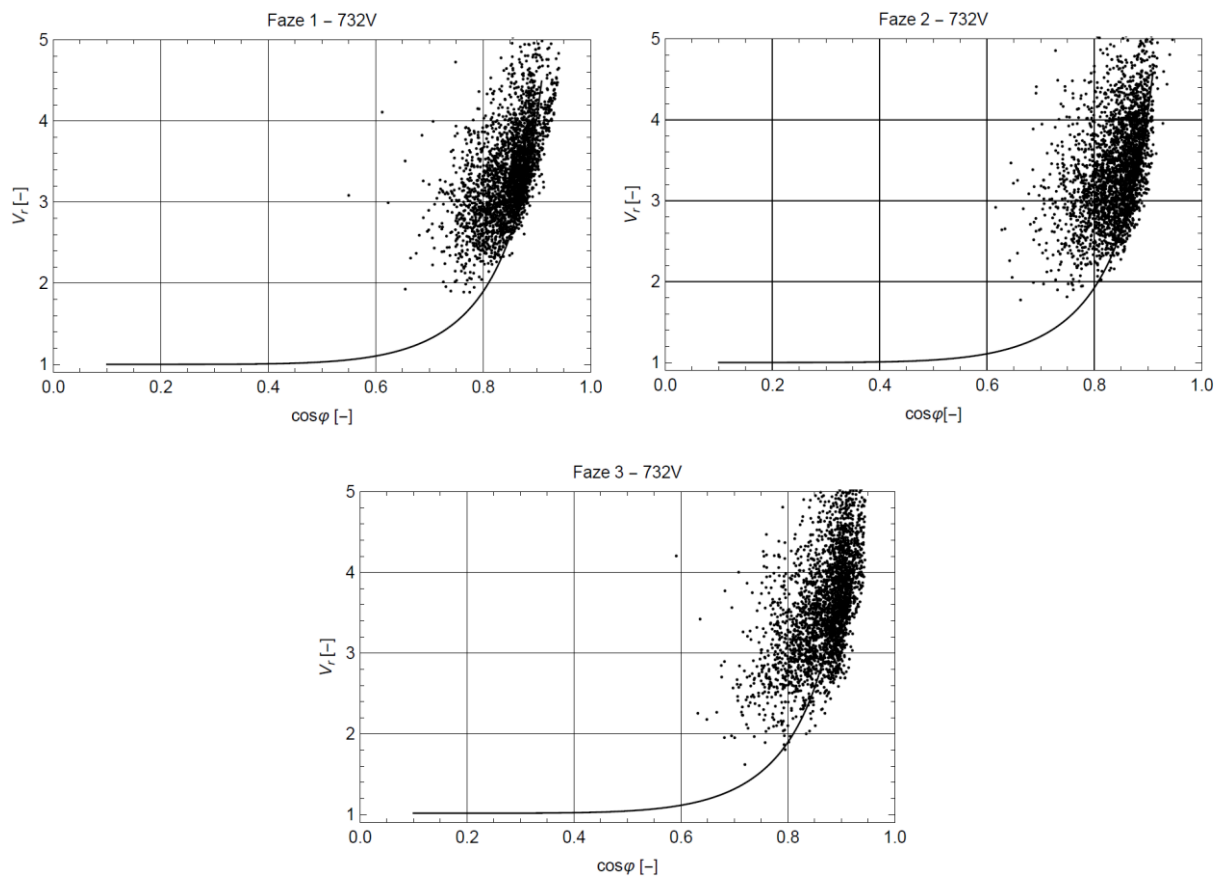
Literatura

- [1] 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.
- [2] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s.
- [3] Power Quality Impacts of an Electric Arc Furnace and Its Compensation. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2006, vol. 1, issue 2, s. 153-160. DOI: 10.5370/jeet.2006.1.2.153.
- [4] 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.
- [5] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie z veřejných distribučních sítí*. 3. dopl. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] ČSN 330122. Pokyn na používání evropské normy EN 50160. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [7] 2011. Power quality and electrical arc furnaces. *Power Quality* [online]. InTech [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.5772/595. ISBN 978-953-307-180-0. Dostupné z: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/14961.pdf>
- [8] HÁJEK, Karel. 2002. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 535 s. ISBN 80-730-0023-7
- [9] GAJDOŠÍK, Libor. 2013. *Návrh analogových filtrů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 239 s. ISBN 978-80-7300-468-2.
- [10] AFONSO, João, Maurício AREDES, Edson WATANABE a Júlio MARTINS. Shunt Active Filter for Power Quality Improvement [online]. 2000 [cit.2015-5-4]. Dostupné z: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1762/1/028-UIE2000.pdf>

- [11] NOROOZIAN, M., N.A. PETERSSON, B. THORVALDSON, A.B. NILSSON a C.W. TAYLOR. *Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/db4151de52e1c959c1256fda00496207/Benefits%20of%20SVC%20and%20STATCOM,%20Sept%202003,%20w%20Taylor.pdf>
- [12] AKAGI, Hirofumi, Edson Hirokazu WATANABE a Maurício AREDES. 2007. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley, xiv, 379 p. ISBN 04-701-0761-8.
- [13] ČERŇAN, Martin. Zlepšenie kvality elektrickej energie v priemyslových sieťach. Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
- [14] SÝKORA, Tomáš. *Kvalita elektrické energie v distribučních sítích*. Praha, 2010. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
- [15] RAO, P., M.L. CROW a Z. YANG. *STATCOM control for power system voltage control applications* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=891520>
- [16] ČERŇAN, Martin. Podklady ke 2. cvičení z předmětu *Elektrické zdroje a soustavy*.
- [17] ČERŇAN, Martin. Podklady ke 3. cvičení z předmětu *Elektrické zdroje a soustavy*.
- [18] ČERŇAN, Martin. Podklady ke 4. cvičení z předmětu *Elektrické zdroje a soustavy*.
- [19] *SEA: OTF - Electric arc and ladle furnace* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.seatrasformatore.it/en/otf-electric-arc-and-ladle-furnace.html>

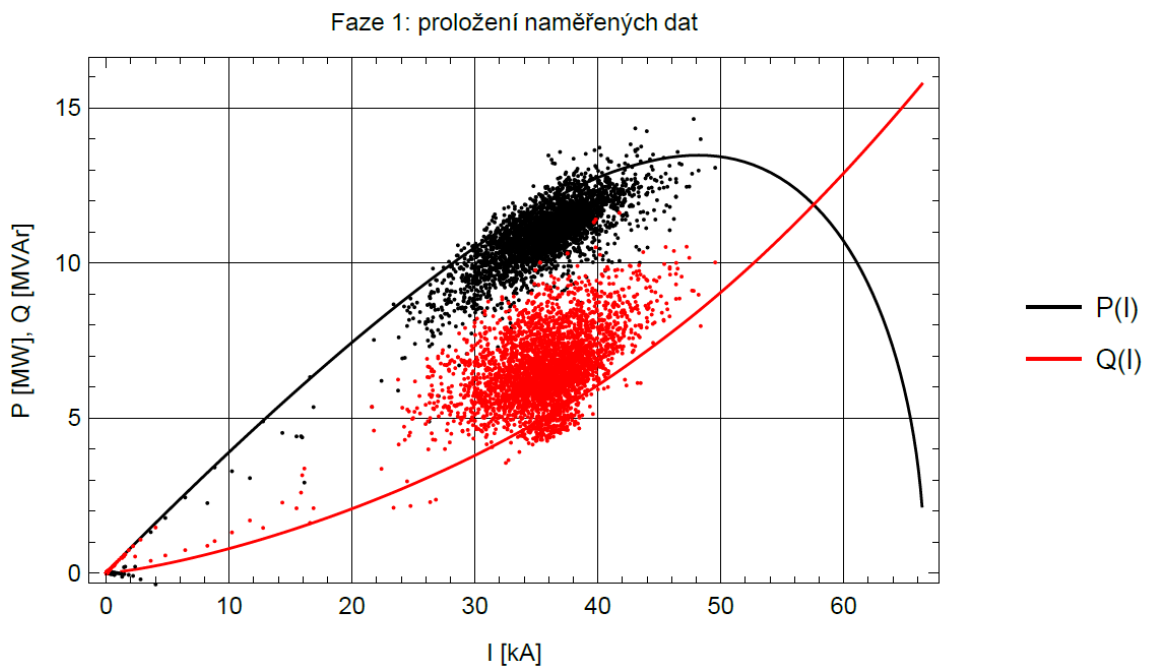
- [20] PEENS, Marius. *Modelling and Control of an Electrode System for a Three-Phase Electric Arc Furnace*. University of Pretoria, 2006. Dostupné z: <http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-04122007145140/unrestricted/00dissertation.pdf>. Dissertation. University of Pretoria, Faculty of Engineering. Vedoucí práce Professor I. K. Craig.
- [21] SIEMENS VAI. *Siemens VAI: Metals Technologies GmbH* [online]. 2011 [cit. 2015-5-9]. Dostupné z: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/si-metal/en/SIMETAL-EAF-en.pdf>
- [22] DEJL, Jaromír; WÜNSCHE, Edgar.: *Elektrické obloukové pece*. Praha: SNTL, 1964. 208 s.

Příloha A: Parametry krátké cesty

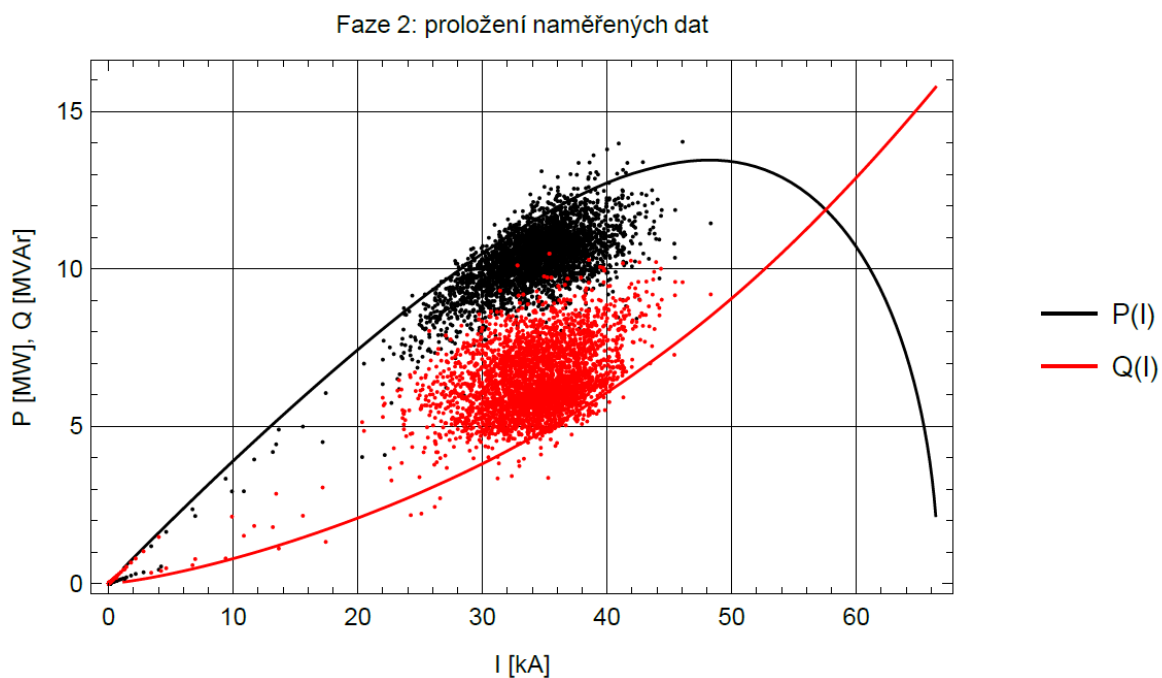


Obr. A1. Reakční poměry jednotlivých fází pro odbočku 732 V – proložení naměřenými daty

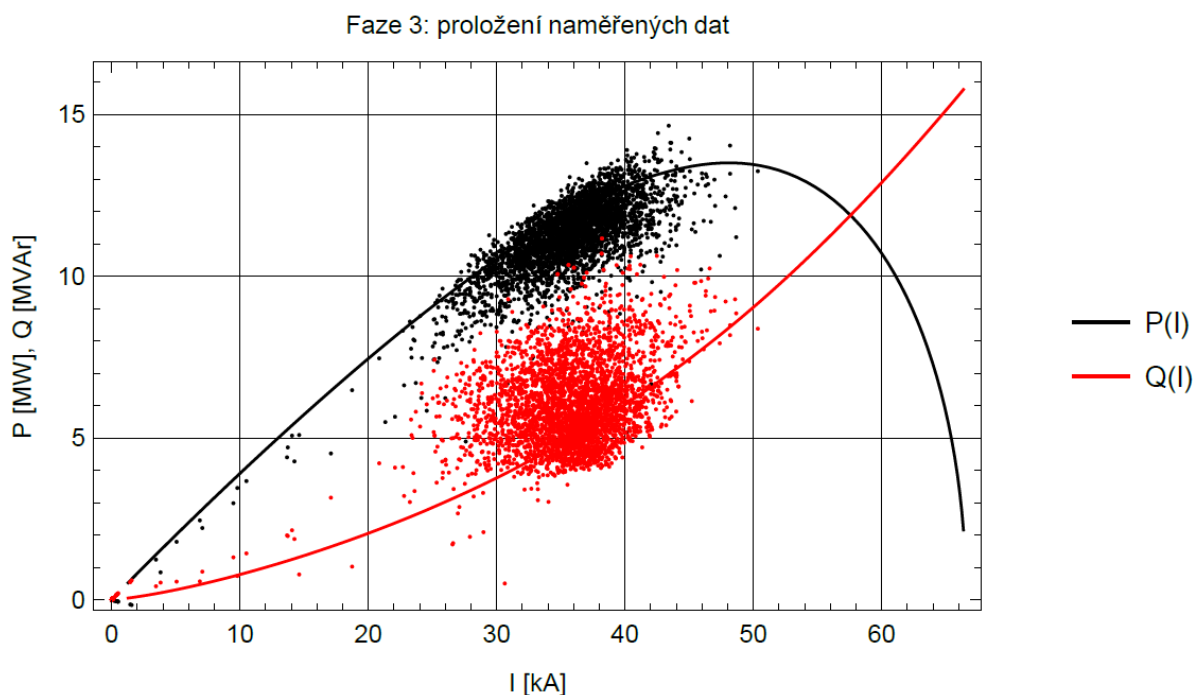
Příloha B: Pracovní charakteristiky



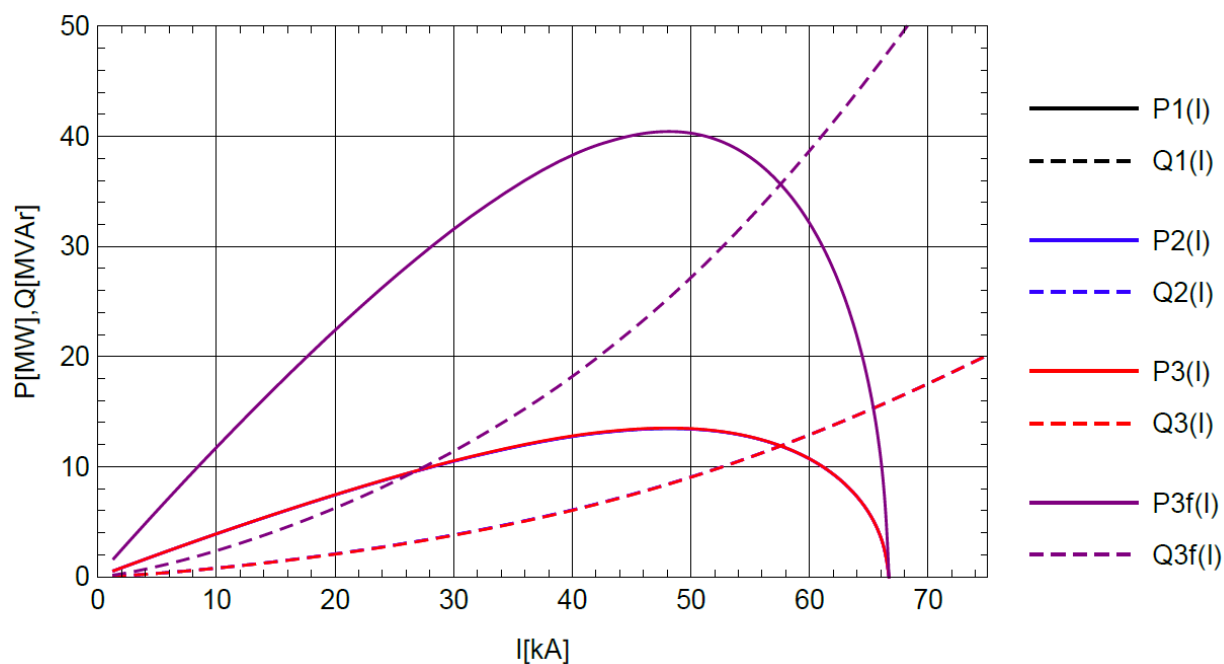
Obr. B1. Pracovní charakteristika pro fázi 1 – odbočka 715 V



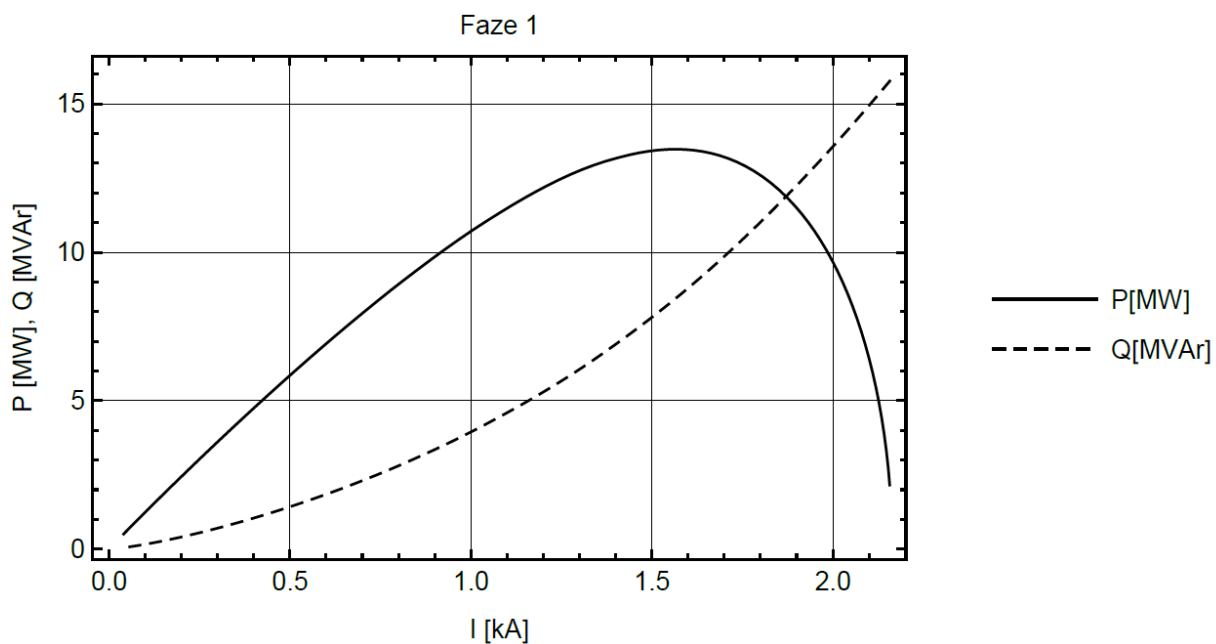
Obr. B2 Pracovní charakteristika pro fázi 2 – odbočka 715 V



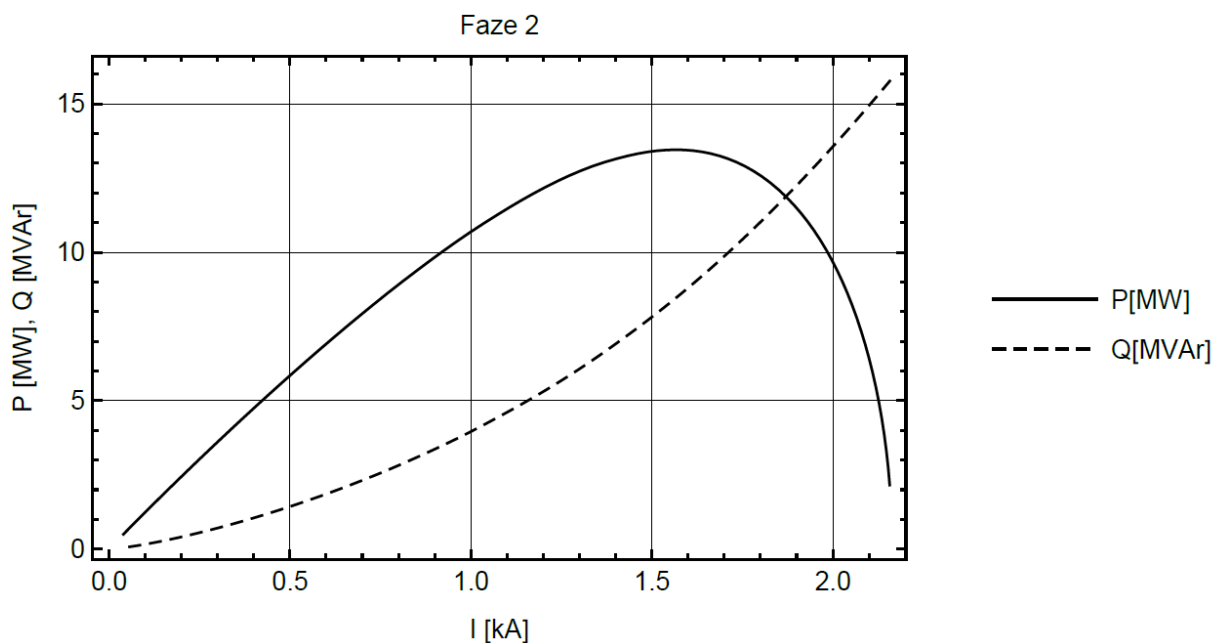
Obr.B3. Pracovní charakteristika pro fázi 3 – odbočka 715 V



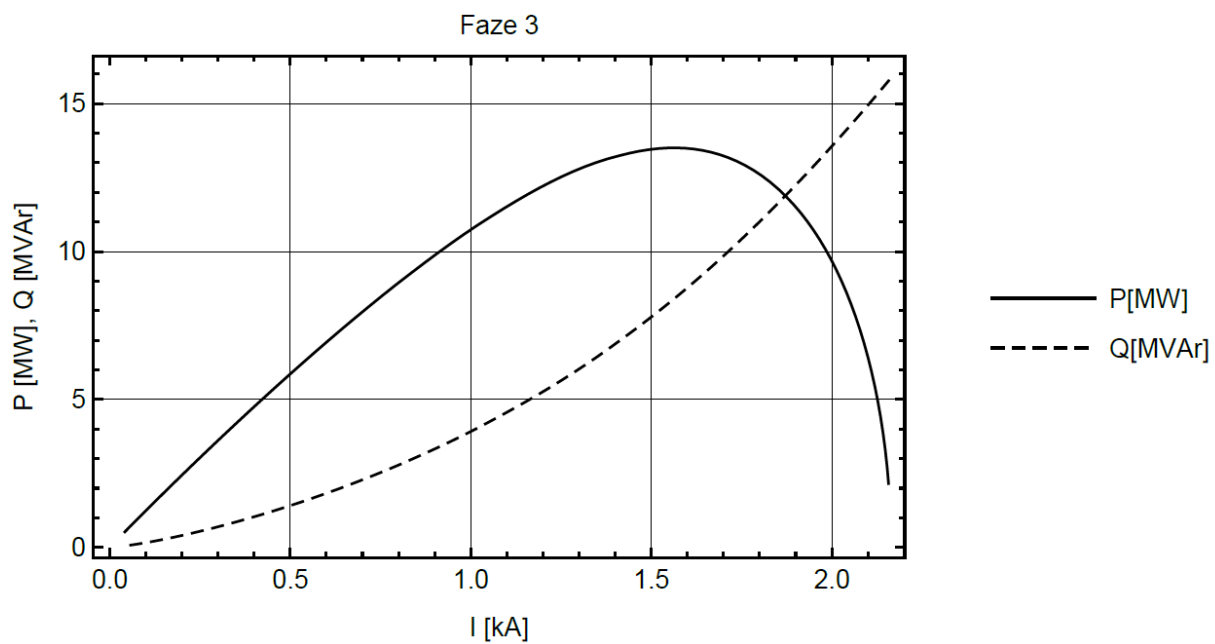
Obr.B4. Pracovní diagramy jednotlivých fází (černá, modrá, červená) a třífázový diagram (fialová) – odbočka 715V



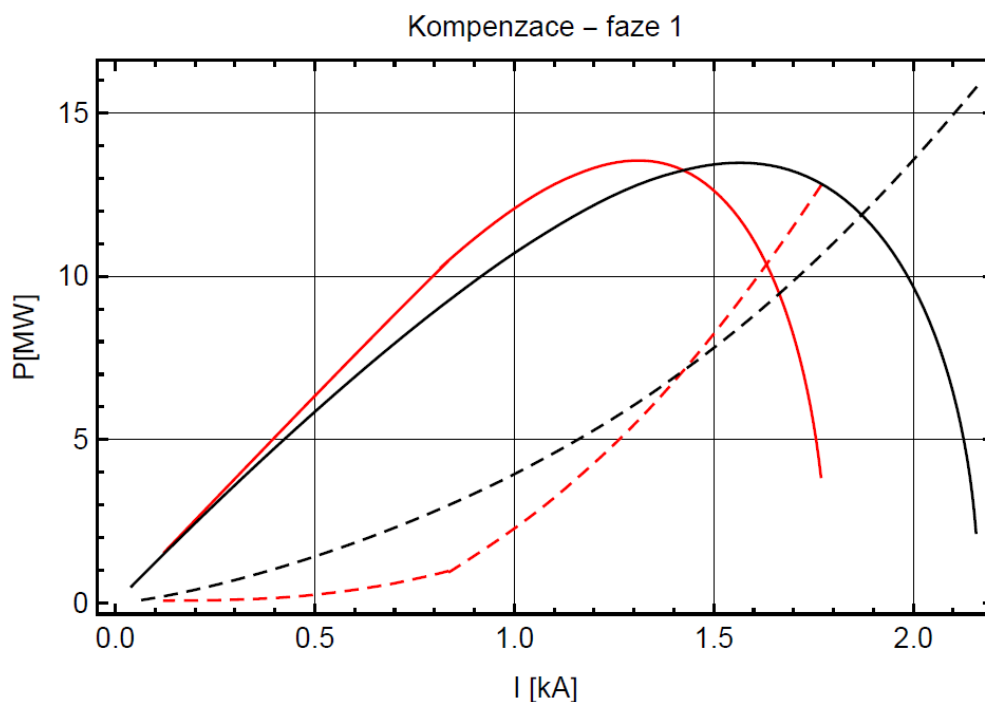
Obr.B5. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 1 – odbočka 715 V



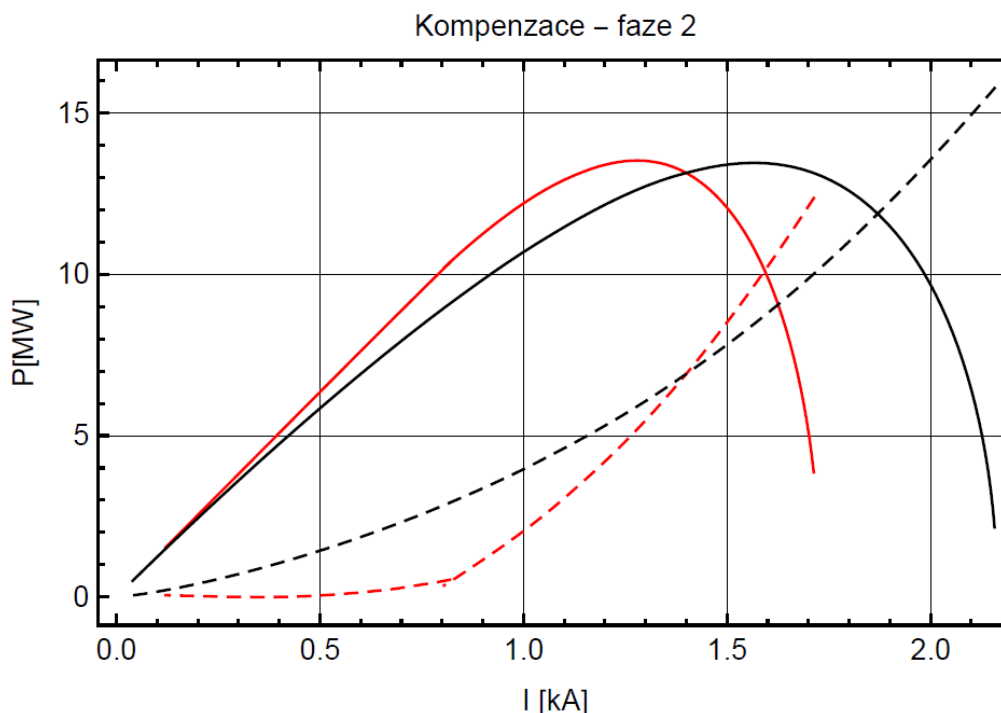
Obr.B6. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 2 – odbočka 715 V



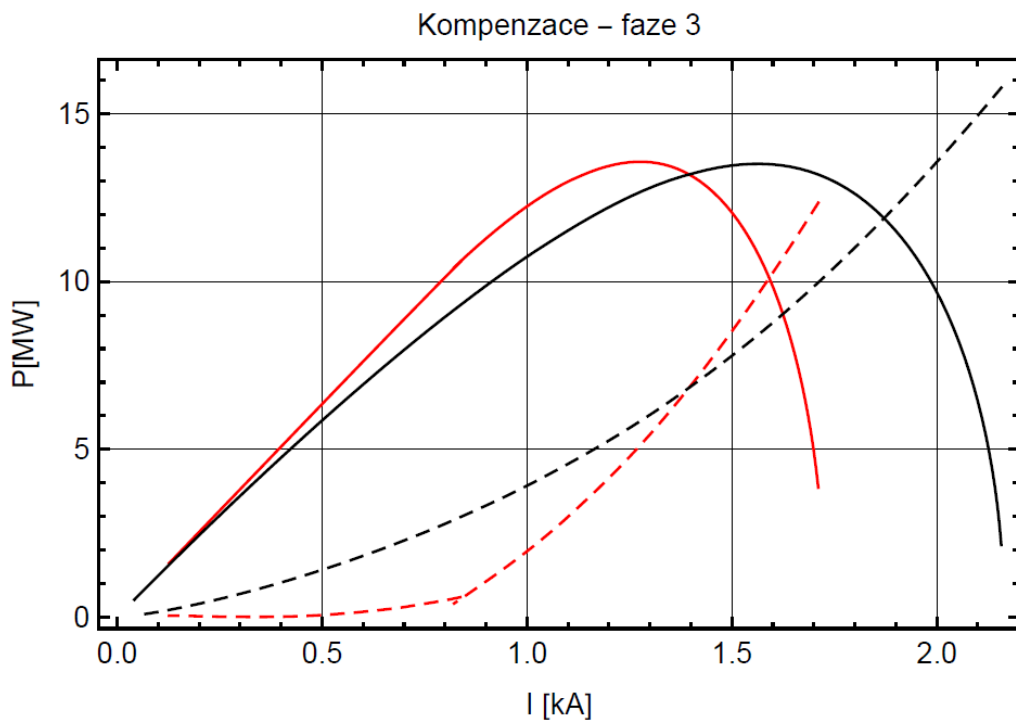
Obr.B7. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 3 – odbočka 715 V



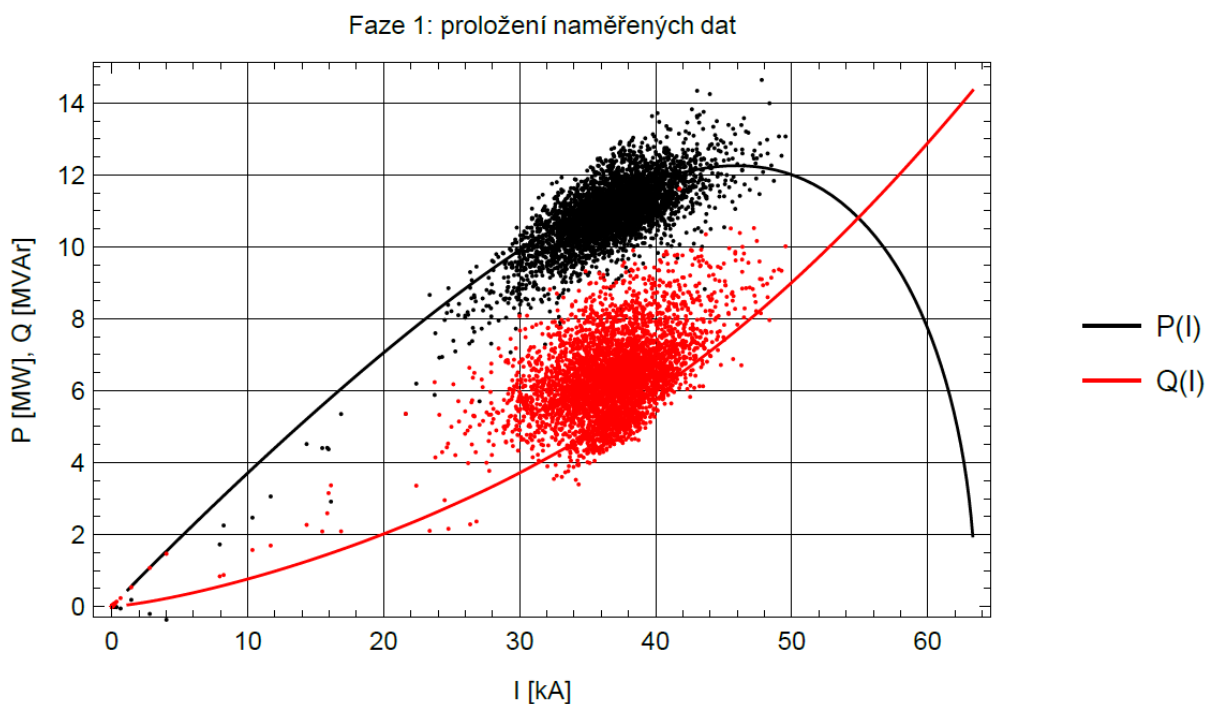
Obr.B8. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 715 V



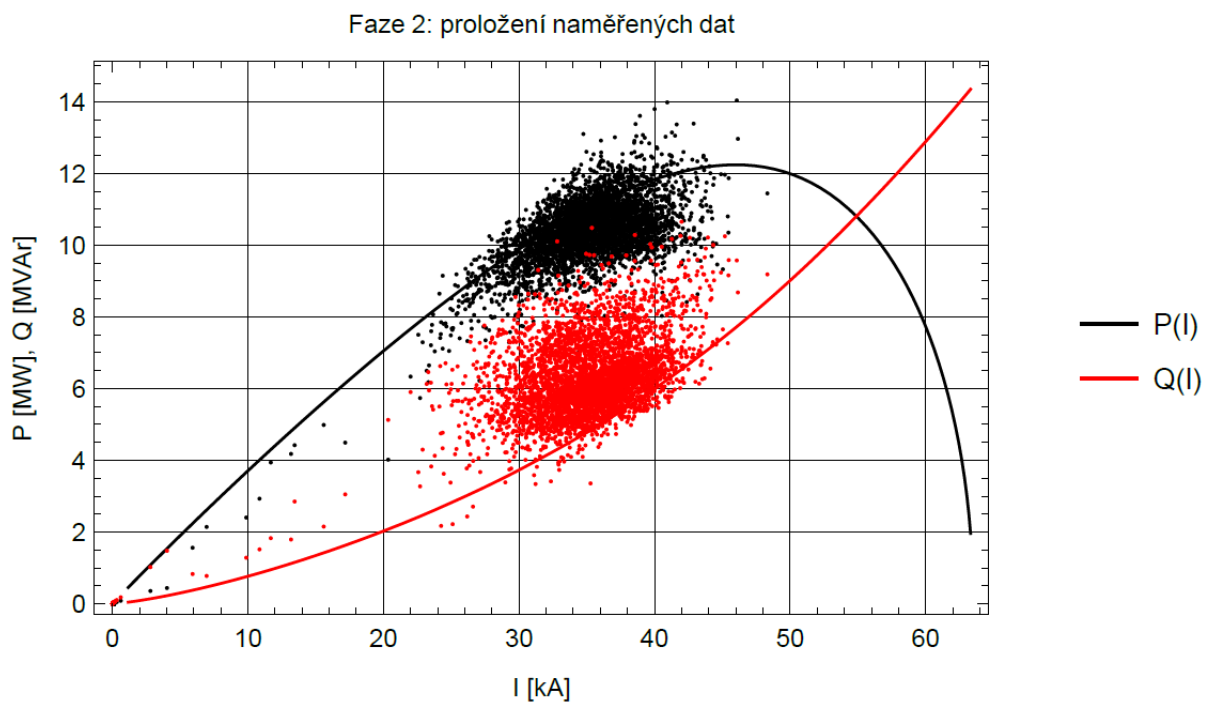
Obr.B9. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 715 V



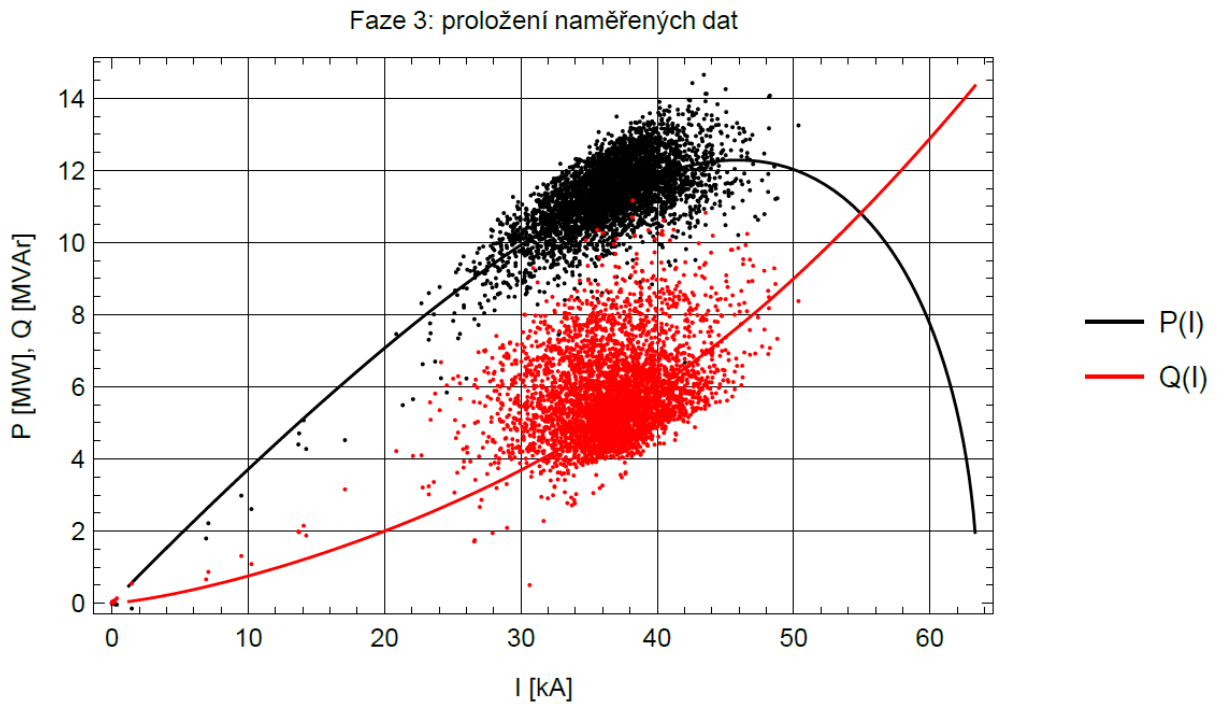
Obr.B10. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 715 V



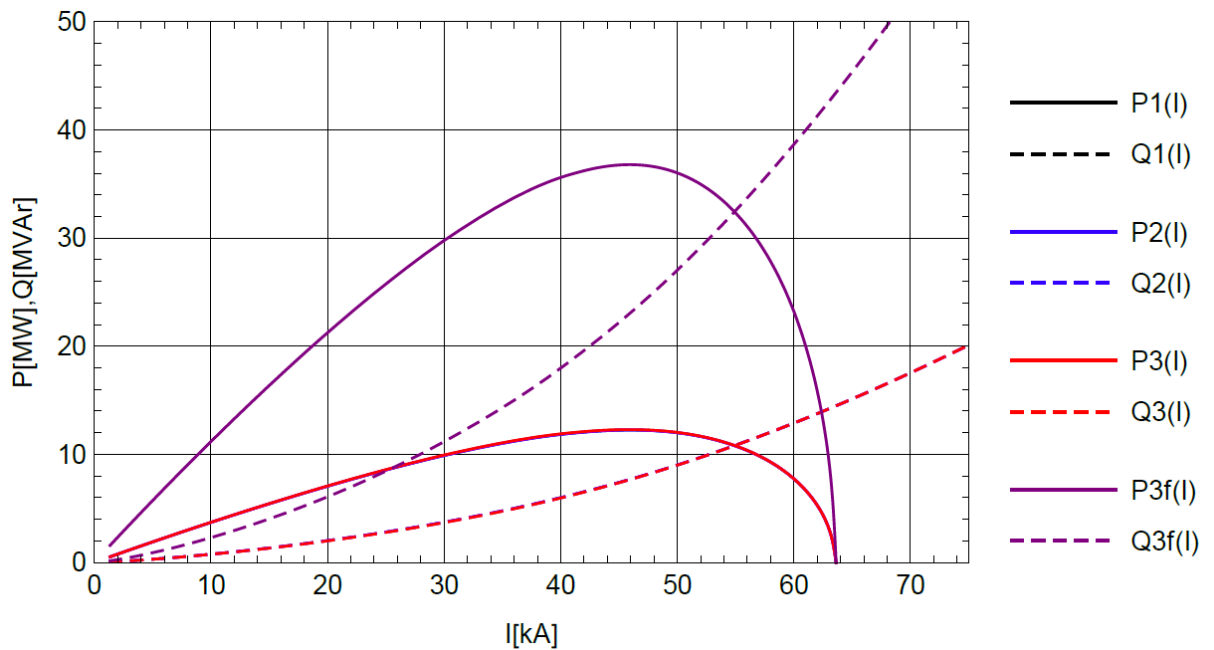
Obr. B11. Pracovní charakteristika pro fázi 1 – odbočka 682 V



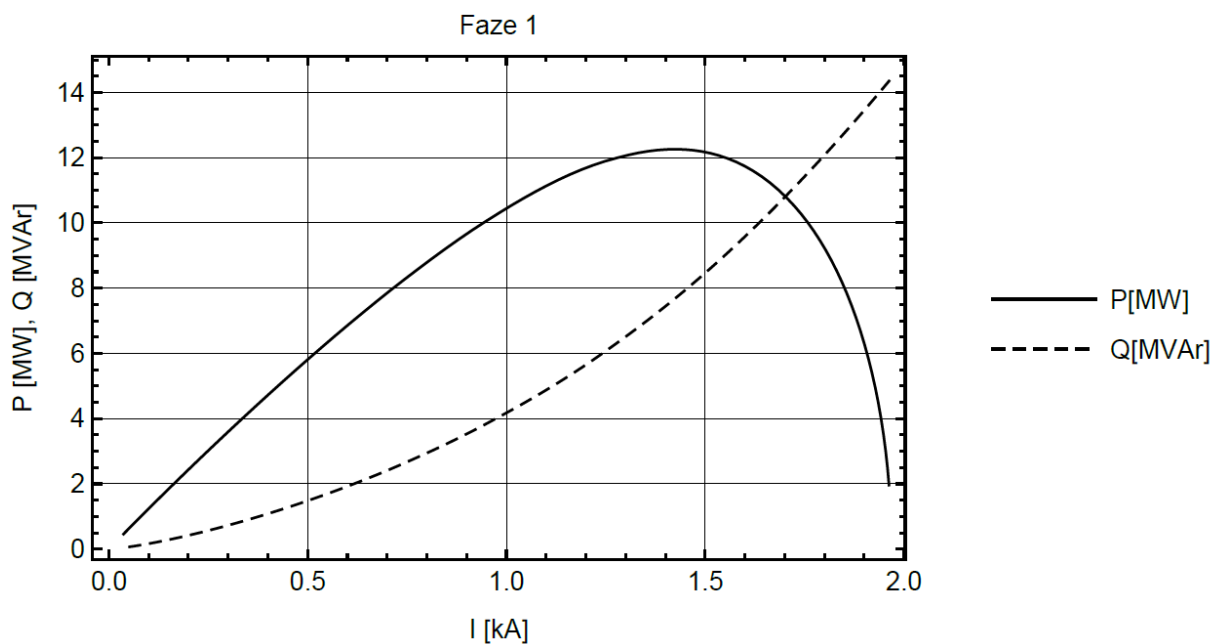
Obr. B12. Pracovní charakteristika pro fázi 2 – odbočka 682 V



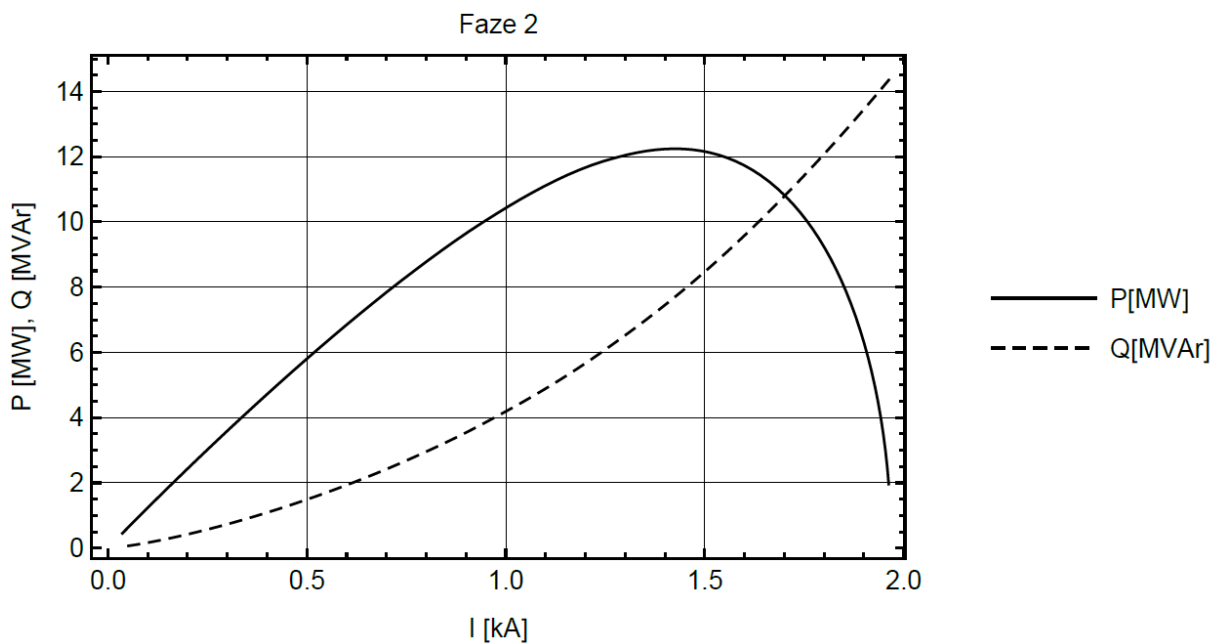
Obr. B13. Pracovní charakteristika pro fázi 3 – odbočka 682 V



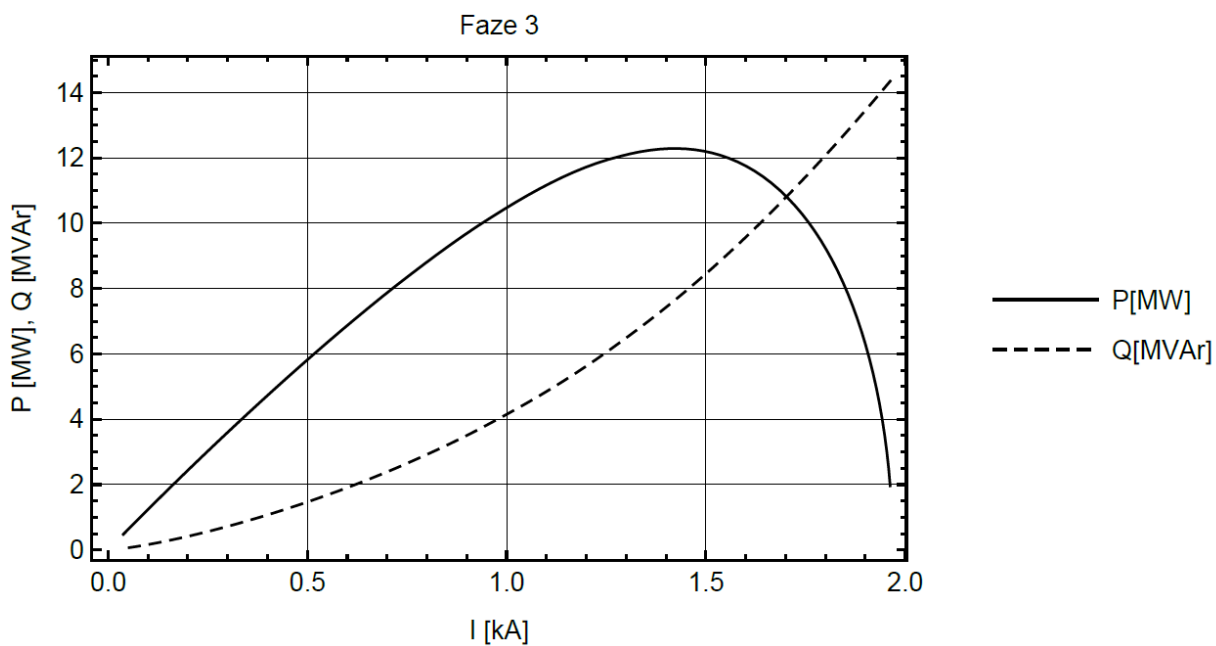
Obr. B14. Pracovní diagramy jednotlivých fází (černá, modrá, červená) a třífázový diagram (fialová) – odbočka 682



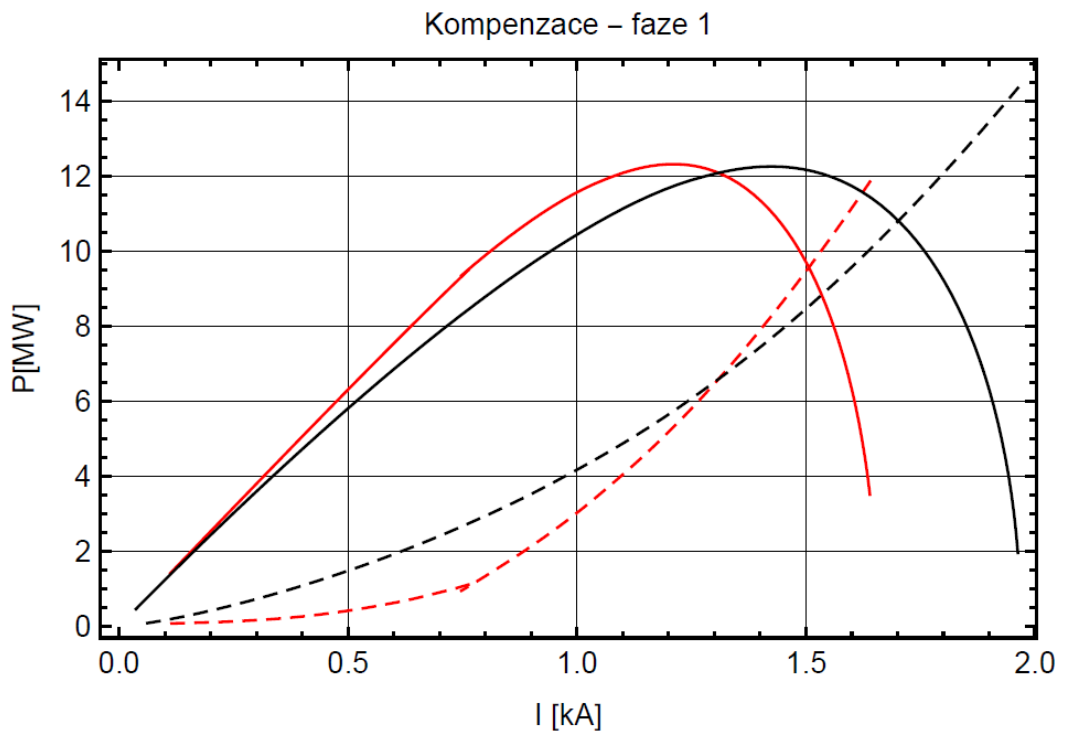
Obr.B15. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 1 – odbočka 682 V



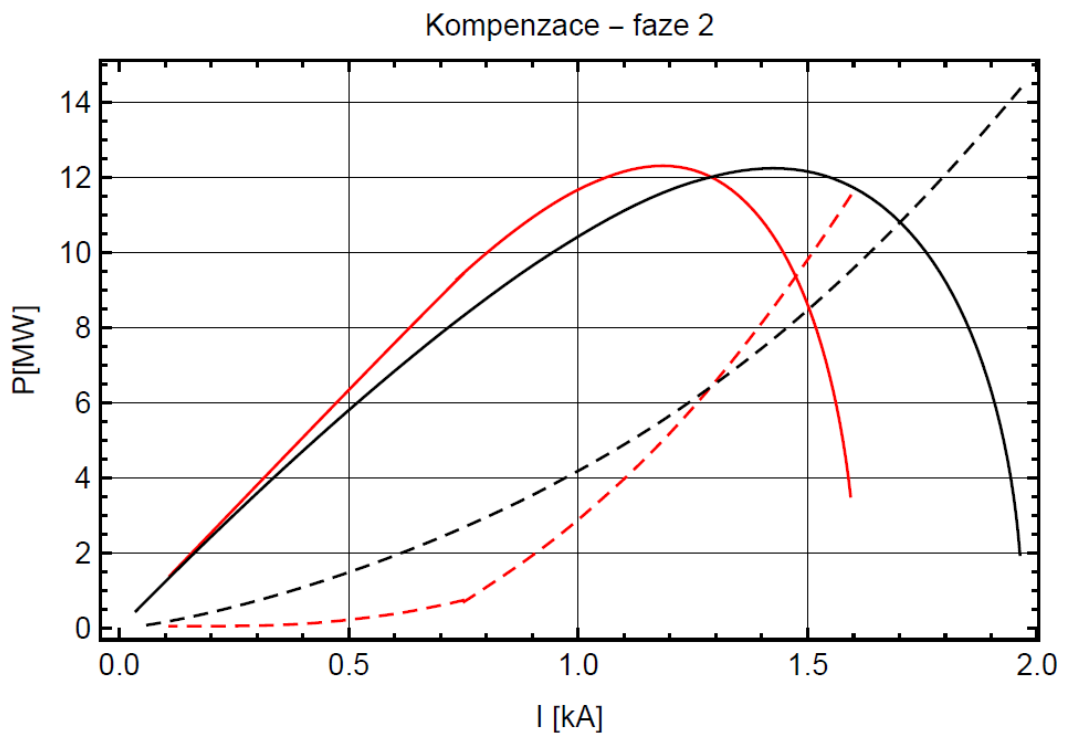
Obr.B16. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 2 – odbočka 682 V



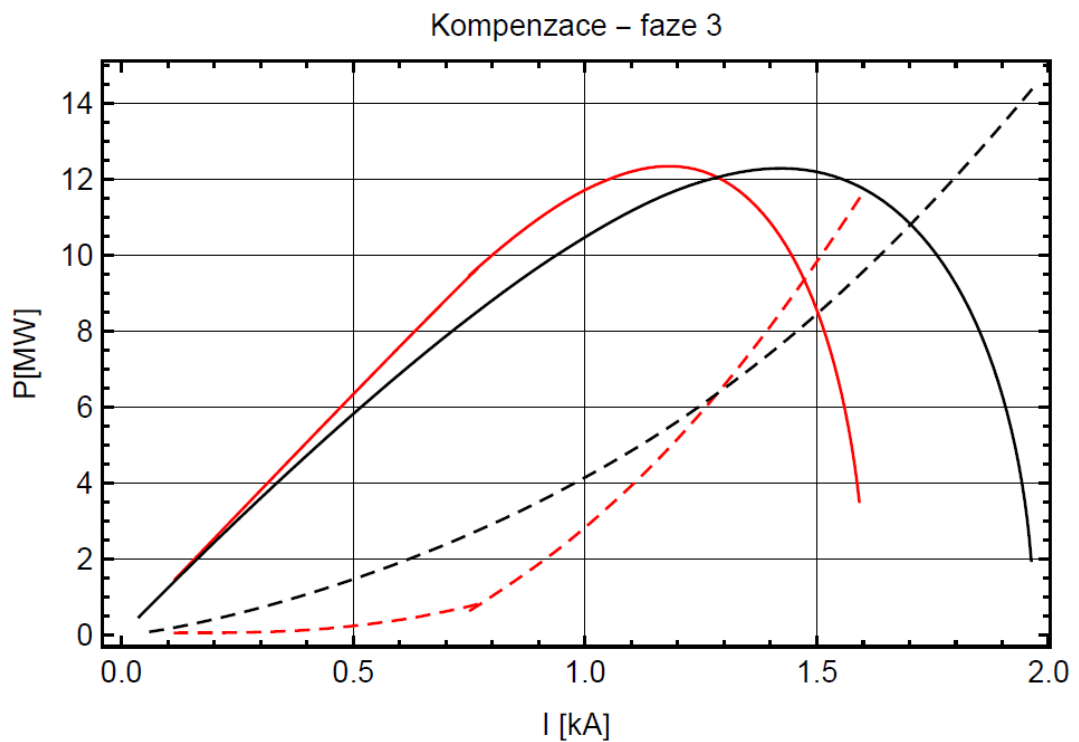
Obr.B17. Přepočítaná pracovní charakteristika na hladinu 22 kV pro fázi 3 – odbočka 682 V



Obr.B18. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 682 V



Obr.B19. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 682 V



Obr. B20. Pracovní charakteristiky před (černě) a po provedení kompenzace (červeně): činný výkon – plná čára, jalový výkon čárkovaná čára - odbočka 682 V

Příloha C: obsah přiloženého CD

Text diplomové práce:

- Analýza_pracovních_charakteristik_elektrických_obloukových_pecí.pdf

Program pro výpočet pracovních charakteristik:

- vypocet_pracovnich_charakteristik.nb
- ukazkova_data.xlsx