



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Elektrotechnická fakulta
Katedra elektroenergetiky**

ČOV s energetickým využitím bioplynu

WWTP with biogas energy utilization

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Václav Novák

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Václav Novák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **ČOV s energetickým využitím bioplynu**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte technologický popis ČOV s energetickým využitím bioplynu a uveďte specifikata elektrických zařízení této aplikace.
- 2) Navrhněte elektrotechnologickou část projektu ČOV Benešov s kogenerační jednotkou. Do jednotlivých kapitol návrhu zahrňte také teoretický rozbor s popisem všech hledisek nutných pro komplexní řešení projektu.
- 3) Projekt zpracujte v rozsahu:
 - přípojka VN
 - elektrotechnologický rozvod ČOV
 - kogenerační jednotka

Seznam odborné literatury:

- [1] ČEZ Distribuce, a.s.: Pravidla provozování distribučních soustav
- [2] PAVELKA J.: Elektrické pohony, ČVUT v Praze, 2007
- [3] VOŽENÍLEK P., NOVOTNÝ V., MINDL P.: Elektromechanické měniče, ČVUT v Praze, 2007
- [4] BRADA K.: Čerpadla ve vodním hospodářství, NOEL 2000 Brno, 2004

Vedoucí: Ing Robert Barkman

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014



ABSTRAKT:

Obsahem této diplomové práce s názvem “ČOV s energetickým využitím bioplynu” je návrh elektrického zařízení čistírny odpadních vod s energetickým využitím bioplynu včetně popisu technologie této aplikace.

První část práce je věnována popisu technologických procesů, uvedení typických strojních zařízení ČOV a návrhu elektrického pohonu s udáním specifik pro danou aplikaci.

Druhá část práce zahrnuje kompletní návrh elektrotechnologických zařízení projektu ČOV Benešov. V jednotlivých kapitolách, které jsou členěny podle elektrotechnologických celků, je vždy nejprve uveden teoretický rozbor problematiky a na něj navazuje návrh konkrétního elektrického zařízení. Přílohou diplomové práce je výkresová dokumentace se schémata zapojení a dispozičním řešením vykreslená v CEA systému EPLAN Electric P8 respektive v systému AutoCAD a výstupy z výpočtového programu SICHR.

ABSTRACT:

The master thesis entitled “Wastewater treatment plant with biogas energy utilization” contains the proposal of electrical equipment of the wastewater treatment plant with biogas energy utilization, including a technological description of this application. The first part of the thesis is devoted to a description of technological processes, it refers to a typical wastewater treatment plant machinery and it makes a proposal of electrical power system with an indication of the specifics for given application. The second part presents the complete proposal of electro-technical equipment of Benešov wastewater treatment plant project. The individual chapters are structured according to the electro-technological units and they start with the theoretical analysis of key issues which is followed by the proposal of concrete electrical equipment. The annex to this master thesis provides the design documentation which includes the connection schemes and design layouts plotted at the CEA system EPLAN Electric P8, AutoCAD system and outputs of the computer programme SICHR.



KLÍČOVÁ SLOVA:

Čistírna odpadních vod, elektrické zařízení, elektrický pohon, odstředivé čerpadlo, energetická bilance, transformátor, zkratový proud, impedance, kompenzace jalového výkonu, motorový rozvod, kabelové vedení, kogenerační jednotka.

KEYWORDS:

Wastewater treatment plant, electrical equipment, electrical drive, centrifugal pump, asynchronous motor, energetic balance, transformer, short-circuit current, impedance, reactive power compensation, wiring, motor distribution, cogeneration unit.



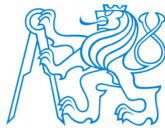
PROHLÁŠENÍ:

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 29.12.2014

.....

podpis



PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji Ing. Robertovi Barkmanovi za připomínky k mé diplomové práci. Dále bych chtěl vyjádřit velké poděkování mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali.



Obsah

1. Úvod a cíl práce	10
2. Technologický popis ČOV	11
2.1. Mechanické předčištění	11
2.2. Aktivační proces	12
2.3. Kalové a plynové hospodářství	13
3. Specifika návrhu pohonů ČOV	14
3.1. Návrh elektrického pohonu	15
3.1.1. Zátěžný moment, ventilátorová charakteristika	15
3.1.2. Volba parametrů motoru	16
3.1.3. Dovolené oteplení	17
3.1.4. Doba rozběhu a pohybová rovnice	19
3.1.5. Způsob rozběhu	20
4. Návrh elektrotechnologické části	23
4.1. Základní elektrotechnické údaje ČOV Benešov	23
4.2. Energetická bilance	25
4.2.1. Energetická bilance - teoretická část	25
4.2.2. Energetická bilance – praktická část	28
4.3. Návrh transformátoru - teoretická část	29
4.3.1. Návrh transformátoru - teoretická část	29
4.3.2. Návrh transformátoru – praktická část	34
4.4. Kompenzace jalové energie	35
4.4.1. Kompenzace jalové energie – teoretická část	35
4.4.1.1. Spotřebiče jalové energie	35
4.4.1.2. Vylepšení účinníku a typy kompenzace	36
4.4.1.3. Hrazené kompenzační zařízení	36
4.4.1.4. Zpětné vlivy kompenzace na kvalitu elektrické energie	37
4.4.2. Kompenzace jalové energie – praktická část	38
4.5. Výpočet zkratových proudů	40
4.5.1. Výpočet zkratových proudů - teoretická část	40
4.5.2. Výpočet zkratových proudů - praktická část	47
4.6. Přípojka vn, měření, trafostanice	50
4.6.1. Přípojka vn, měření, trafostanice – teoretická část	50
4.6.2. Přípojka vn, měření, trafostanice – praktická část	53
4.7. Kabelový rozvod	55
4.7.1. Kabelový rozvod – teoretická část	55
4.7.1.1. Proudová zatížitelnost	55
4.7.1.2. Zkratové proudy	55



4.7.1.3.	Úbytek napětí na kabelu.....	56
4.7.1.4.	Mechanické namáhání a vnější vlivy	56
4.7.1.5.	Požární bezpečnost, samozhášivost vedení.....	57
4.7.1.6.	Hospodárnost návrhu	57
4.7.2.	Kabelový rozvod – praktická část	58
4.7.2.1.	Proudová zatížitelnost	58
4.7.2.2.	Zkratový proud	58
4.7.2.3.	Úbytek napětí	59
4.8.	Motorový rozvod, jištění a spínání	60
4.8.1.	Motorový rozvod, jištění a spínání – teoretická část.....	60
4.8.1.1.	Jištění rozběhu přímým připojením k síti	61
4.8.1.2.	Jištění rozběhu přes softstartér	62
4.8.2.	Motorový rozvod, jištění a spínání – praktická část.....	64
4.9.	Kogenerační jednotka	67
4.9.1.	Kogenerační jednotka – teoretická část.....	67
4.9.2.	Kogenerační jednotka – praktická část	71
5.	Závěr.....	76
6.	Seznam použité literatury	77
7.	Seznam obrázků	80
8.	Seznam tabulek.....	81
9.	Seznam příloh	81



SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ:

ČOV	-	čistírna odpadních vod
EO	-	ekvivalentní obyvatel
ČS	-	čerpací stanice
ČSOV	-	čerpací stanice odpadních vod
RN	-	retenční nádrž
VN	-	vyhnívací nádrž
EP	-	elektrický pohon
AM	-	asynchronní motor
FM	-	frekvenční měnič
ES	-	elektrizační soustava
HDO	-	hromadné dálkové ovládání
nn	-	nízké napětí
vn	-	vysoké napětí
PDS	-	provozovatel distribuční sítě
PPDS	-	Pravidla provozování distribučních soustav
DS	-	distribuční síť
RTU	-	Remote Terminal Unit (řídící jednotka pro přenos dat)
GSM	-	Global System for Mobile (globální systém pro mobilní komunikaci)
TS	-	transformátorová stanice
RH	-	rozvaděč hlavní
RM	-	rozvaděč motorový
RE	-	rozvaděč elektroměrový
KJ	-	kogenerační jednotka
ŘIS	-	řídící a informační systém
MTP	-	měřicí transformátor proudu
ERU	-	Energetický regulační úřad
ČSN	-	česká technická norma
ČSN EN	-	převzatá Evropská norma



1. Úvod a cíl práce

Tato práce se zabývá návrhem elektrických zařízení technologie čistíren odpadních vod (ČOV) s energetickým využitím bioplynu.

První část je věnována technologickému popisu jednotlivých provozních souborů ČOV. Pro každý soubor je uveden popis technologie s výčtem použitých strojních zařízení. Dále jsou uvedena hlediska návrhu elektrického pohonu s ohledem na specifika typických strojních zařízení dané aplikace.

Pro možnost zpracování praktické části návrhu jsem zvolil konkrétní aplikaci ČOV města Benešov.

Druhá část je zaměřena výhradně na návrh elektrotechnologických zařízení. V jednotlivých kapitolách je uveden obecný teoretický rozbor daného celku s popisem hledisek nutných pro komplexní řešení návrhu a následně je zpracována praktická část respektive návrh konkrétního elektrického zařízení ČOV Benešov. Součástí návrhu je také energetické využití kalového plynu, tedy výroba elektrické energie pomocí kogenerační jednotky, která je pro tuto aplikaci optimálním řešením zpracování odpadní suroviny a zároveň docílení energetických úspor.

Cílem mé práce je především zpracovat přehledný popis návrhu elektrických zařízení dané aplikace s popisem teoretické i praktické části včetně potřebné legislativy. I když se tato práce věnuje aplikaci vodního hospodářství, většina kapitol lze využít i v rámci návrhu elektrotechnologických zařízení příbuzných aplikací.



Obr. 1 - Ponorné kalové čerpadlo Flygt [1]



2. Technologický popis ČOV

V následujících kapitolách je popsán systém ČOV, jejíž koncepce je standardním příkladem provedení městských čistíren. Technické parametry jsou odvozeny z ČOV Benešov. Pro každý provozní soubor je uveden technologický popis a typická strojní zařízení s elektropohonem.

ČOV je technologicky rozdělena do těchto provozních souborů:

- mechanické předčištění
- aktivační proces
- kalové a plynové hospodářství

2.1. Mechanické předčištění

Do areálu čistírny je přiváděna dešťová a znečištěná odpadní voda. Nátok do čistírny je dimenzován na daný EO 53738 (počet ekvivalentních obyvatel). ČOV je schopná pojmout v době přívalových dešťů do sekce hrubého předčištění maximální průtok $532,8 \text{ l.s}^{-1}$. V případě většího průtoku je odpadní voda odváděna do retenční nádrže o objemu 1800 m^3 . U aktivačního procesu je maximální průtok stanoven na 160 l.s^{-1} . Odtok vyčištěných odpadních vod je veden do recipientu. Do sběrné šachty je znečištěná voda přiváděna přítokem kanalizačního potrubí, z retenční nádrže nebo přítokem z čerpací stanice (ČS), do které je zaveden další přítok dešťových a znečištěných odpadních vod. Voda je do průtoku $532,8 \text{ l.s}^{-1}$ gravitačně vedena přes lapák štěrku a jemné automaticky čištěné česle do vstupní čerpací stanice ČSOV1. Odtud jsou odpadní vody přiváděny do dvou žlabů osazených velmi jemnými automaticky čištěnými česlemi. Zachycené nečistoty jsou lisovány a zbavovány přebytečné vody ve šnekovém dopravníku a vynášeny do kontejneru. Za česlemi je dvojice provzdušňovaných lapáků písku a tuků. Zde se odstraňují minerální nečistoty díky provzdušňovacím elementům (až do velikosti zrn $0,25 \text{ mm}$). Písek je odtěžován pomocí mamutkových čerpadel. Voda jde dále do odlehčovacího objektu kde je do průtoku 240 l.s^{-1} odváděna do aktivačního procesu. V případě většího průtoku je odváděna do retenční nádrže (RN). Součástí sekce mechanického předčištění je také kompresorovna a dmychárna odkud je veden vzduch do čerpací jímky, k lapákům písku a mamutkovým čerpadlům. [2]



Seznam typických strojních zařízení s elektrickým pohonem:

- ZO2.29 Zařízení těžení štěrku (sloupový jeřáb s elektrickým kladkostrojem)
- ZO2.74 Šnekový dopravník (1,5kW, 400V)
- ZO2.30 Jemné česle 20mm (1,5 kW, 400V)
- SZ04 Čerpadlo ponorné ČSOV1 (20kW, 400V)
- ZO2.65 Čerpadlo („suché“) ČSOV3 do nátoky ČOV (4kW, 400V)
- ZO2.64 Čerpadlo („suché“) ČSOV3 do RN (21kW, 400V)
- SZ09 Kompresor provzdušnění lapáku písku (15kW, 400V)
- ZO2.24 Stavítko na nátoky lapáku písku (0,75kW, 400V)

2.2. Aktivační proces

Z odlehčovacího objektu jde voda do rozdělovacího objektu, který umožňuje rozdělení průtoku do dvou biologických linek. Za rozdělovacím objektem je zaústěno dávkování železité soli pro účely zvýšené eliminace sloučenin fosforu z odpadních vod. Voda zbarvená hrubých nečistot odtéká do usazovacích nádrží. Zde dochází k sedimentaci usaditelných nerozpuštěných látek. Usazovací nádrže jsou vybaveny pojezdovými mosty k vyklízení dna a stírání plovoucích nečistot. Zachycený primární kal je odváděn do kalové jímky a následně čerpán do vyhnívacích nádrží, které jsou součástí kalového hospodářství. Z usazovacích nádrží je odpadní voda vedena do selektoru před anaerobní sekci aktivačního procesu. Hlavní funkcí aktivačního procesu je kultivace mikroorganismů aktivovaného kalu, jejichž metabolickou činností dochází k řadě chemických pochodů, umožňující eliminaci rozpuštěného znečištění z přiváděných odpadních vod. V anaerobní části respektive v části bez přítomnosti kyslíku (za přítomnosti oxidovaných forem dusíku) je využíváno přebytečného aktivovaného kalu jako zdroje živin pro anaerobní bakterie. Aktivovaný kal je z dosazovacích nádrží přiváděn do anoxického selektoru. Z anaerobie je pomocí horizontálního míchadla odpadní voda přiváděna do denitrifikační sekce a dále do aerobní části aktivace (nitrifikace). V aerobní části respektive v části s přítomností kyslíku jsou využívány aerobní bakterie, které ve svém metabolismu odbourávají organické znečištění vody. Nitrifikační sekce je vybavena rošty s aeračním systémem. Na konci biologické linky je čerpadlo interní recirkulace, které zajišťuje oběh znečištěné vody z nitrifikace zpět do denitrifikace. Z aktivačních linek natéká směs aktivovaného kalu a odpadní vody do rozdělovacího objektu a následně do dosazovacích nádrží. Zde dochází ke gravitačnímu oddělení aktivovaného kalu a vyčištěné odpadní vody. Aktivovaný kal je



odtahován ze dna nádrží a vyčištěná odpadní voda jde přepadem vedena do měrného objektu na odtok. Součástí sekce biologického čištění jsou také dmychadla umístěná v kolektoru mezi linkami aktivačních procesů, které vedou vzduch do aeračního systému. [2]

Seznam typických strojních zařízení s elektrickým pohonem:

- Z02.72a Dávkovací čerpadlo železité soli (22,7 l/h, 230V)
- SZ13 Stírací zřízení usazovací nádrže (16A, 400V)
- Z02.01 Čerpadlo ponorné - primárního kal (4kW, 400V)
- Z02.45 Míchadlo aktivace (1,75kW, 400V)
- Z02.55 Čerpadlo ponorné - interní recirkulace (1,75kW, 400V)
- Z02.49 Dmychadlo aeračního systému nitrifikace (37kW, 400V)
- Z02.RO2 Stavítko v rozdělovacím objektu (0,75kW, 400V)
- A312.02 Šoupě na sání čerpadla Z02.58 (0,18kW, 400kW)

2.3. Kalové a plynové hospodářství

Přebytečný aktivovaný kal z dosazovacích nádrží je prepouštěn z okruhu vratného kalu ke strojnímu zahuštění a dále čerpán do vyhnívací nádrže (1250 m³). Sem je přiváděn také primární kal z usazovacích nádrží. Ve vyhnívacích nádržích (VN) dochází k anaerobní stabilizaci kalu. Míchání nádrže je zajištěno stlačeným bioplynem a zároveň cirkulačními čerpadly. Bioplyn vznikající ve vyhnívacích nádržích je jímán do nasazeného membránového plynojemu. Stabilizovaný kal je přepuštěn do otevřené uskladňovací nádrže s ponorným míchadlem. Z uskladňovací nádrže je kal přiváděn do objektu odvodnění kalu na sítopásový lis.

Plyn vznikající při anaerobní stabilizaci kalu je akumulován v plynojemu a následně využíván k výrobě tepla a elektrické energie. Pro energetické využití je na ČOV osazen plynový kotel a kogenerační jednotka. Této technologické části je podrobněji věnována kapitola 4.9. [2]

Seznam typických strojních zařízení s elektrickým pohonem:

- Z03.01 Čerpadlo přebytečného kalu – vřetenové (3kW, 400V)
- Z03.04 Komplexní zařízení zahuštění (rotační zahušťovač 0,37kW, míchadlo reaktoru 0,25kW, flokulační stanice zahrnující míchadlo a elektromagnetický ventil přívodu vody)



-
- Z03.07a Čerpadlo zahuštěného kalu (5,5kW, 400V)
 - Z01.03 Čerpadlo ohřevu kalu VN (2,2kW, 400V)
 - Z01.05 Čerpadlo hydraulického míchání kalu VN (4,5kW, 400V)
 - Z01.06 Plynový kompresor bioplynu (25kW, 400V)
 - Z01.11 Ventilátor na zvyšování přetlaku bioplynu (2,2kW, 400W)
 - Z01.29 Sušička bioplynu (1,5kW, 230V)
 - Z01.09 Míchadlo v USN (10kW, 400V)
 - Z01.08 Čerpadlo jímky průsaků ve strojně (1,7kW, 400V)
 - Z03.14 Čerpadlo vyhnílého kalu na odvodnění (7,5kW, 400V)
 - Z03.16 Pásový lis odvodněného kalu (30kW, 400V)
 - Z03.17 Automatická flokulační stanice (2,5kW, 400V)
 - Z03.20a Čerpadlo fugátu (1,3kW, 400V)
 - Z03.18 Komplexní zařízení odvodňovací odstředivky (hlavní pohon 30kW, 400V, pomocný pohon 7,5kW, 400V, vynášecí dopravníky)
 - Z04.07 Oběhové čerpadlo topné vody (0,37kW, 400V)
 - Z05.1 Kogenerační jednotka na bioplyn (125kW, 400V)

3. Specifika návrhu pohonů ČOV

Mezi typická elektrotechnologická zařízení používaná v aplikaci ČOV patří:

- Čerpadlo (odstředivé)
- Dmychadlo
- Kompresor
- Míchadlo
- Dopravníky
- Uzavírací a regulovatelné armatury (elektrické, hydraulické)
- Ventily (elektromagnetické)

Vzhledem k častému požadavku plynulého spouštění a regulace jsou v rámci pohonů využívány:

- Frekvenční měniče
- Softstartéry



Nejčastěji používaným strojním zařízením této aplikace je odstředivé (hydrodynamické) čerpadlo. Parametry motoru vychází z hydraulického výkonu čerpadla. Potřebný hydraulický příkon čerpadla na hřídeli, který je roven požadovanému výkonu na hřídeli motoru vypočteme [1]:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} [W] \quad [2.3.1]$$

- průtok $Q [m^3 \cdot s^{-1}]$ - užitečný objem dopravované kapaliny na výtlačném hrdle za časovou jednotku
- dopravní výška H - užitečná energie předaná každému kilogramu kapaliny v $[m]$
- hustota čerpané kapaliny $\rho [kg \cdot m^{-3}]$
- gravitační zrychlení $g [m \cdot s^{-2}]$
- účinnost čerpadla η - poměr užitečného hydraulického výkonu čerpadla a mechanického příkonu na hřídeli čerpadla

3.1. Návrh elektrického pohonu

Základní body návrhu elektrického pohonu (EP) strojního zařízení jsou:

- výběr motoru a jeho parametrů
- určení doby rozběhu, analýza přechodných dějů
- dovolené oteplení
- náročnost a přípustné doby rozběhu
- úbytek napětí při rozběhu

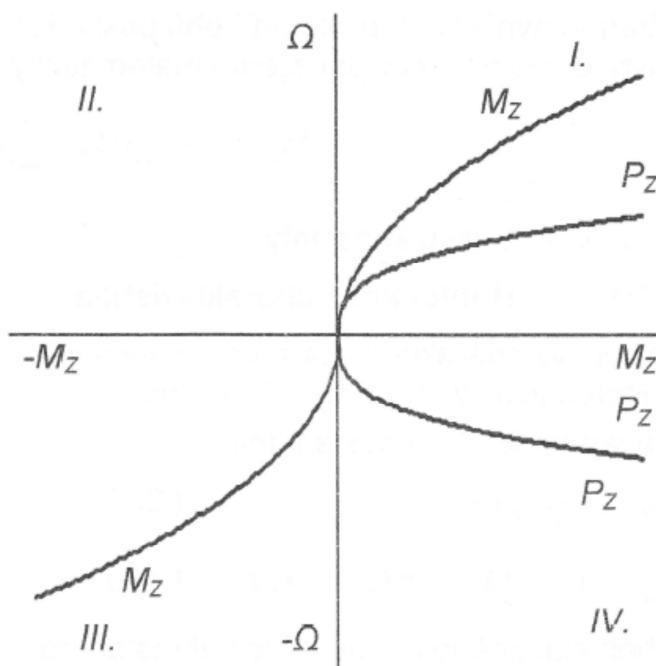
3.1.1. Zátěžný moment, ventilátorová charakteristika

Základem návrhu pohonu je zátěžná charakteristika. Většina strojů používaných v aplikacích ČOV svým průběhem zátěže odpovídají tzv. ventilátorové charakteristice. Do této skupiny patří mimo jiné odstředivá čerpadla, ventilátory, kompresory a dmychadla. Jde vesměs o zařízení, která překonávají odpor vzduchu nebo nějaké kapaliny. Moment těchto pracovních strojů se mění s druhou mocninou rychlosti otáčení $M \sim n^2$.

Z předchozího vztahu plyne závislost příkonu pracovního mechanismu na třetí mocnině rychlosti otáčení $P \sim n^3$.



Pracovní mechanismy s ventilátorovou charakteristikou mají charakter pasivní zátěže a pracují tedy v kvadrantech I. a III. (Obr. 2) To znamená, že při reverzaci chodu se mění i smysl působení zatěžovacího momentu. Křivky zatěžovacího příkonu jsou rozloženy v kvadrantech I a IV, protože v případě otočení smyslu otáčení je tok energie stále stejný. V případě odstředivých čerpadel s nenulovou statickou výškou však tato úvaha zcela neplatí, protože statická výška představuje aktivní zátěž. [3]



Obr. 2 – Ventilátorová charakteristika [4]

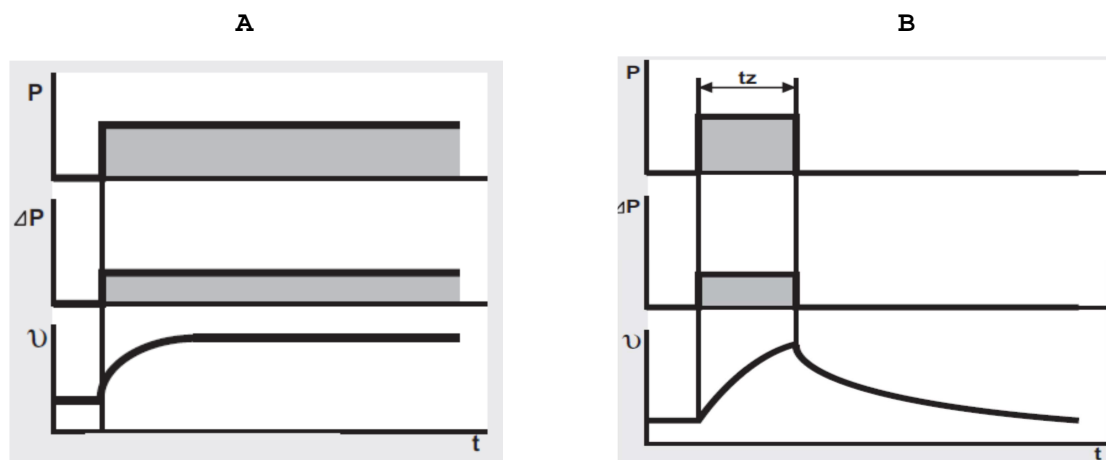
3.1.2. Volba parametrů motoru

Výkon motoru zvolíme podle požadovaného příkonu na hřídeli čerpadla. Při výběru vhodného výkonu motoru je třeba zohlednit druh zatížení. Druh zatížení má zásadní vliv především na oteplení pohonu a tedy i na dosažitelný výkon motoru. Jednotlivé druhy zatížení jsou přesně definovány normou ČSN EN 60034-1 ed.2. [5]

V případě trvalé zátěže (S1) zvolíme nejbližší vyšší výkon z typové řady vůči požadovanému výkonu na hřídeli čerpadla. Do této skupiny patří zejména čerpadla, dmychadla, kompresory a míchadla. Zvolený výkon je vhodné zvolit s nepatrnou rezervou pro možnost nepředpokládaného krátkodobého přetížení. Jmenovité hodnoty motorů pro trvalé zatížení nalezneme v katalogích výrobců.



Tyto údaje jsou dané pro standardní normalizované podmínky (teplota okolí do 40°C , nadmořská výška do 1000m, viz ČSN EN 60034-1 ed. 2. [6]



Obr. 3 – (A) S1 trvalé zatížení; P-výkon zátěže, ΔP -elektrické ztráty, θ -teplota; (B) S2 krátkodobé zatížení; P-výkon zátěže, ΔP -elektrické ztráty, θ -teplota, t_z -doba chodu s konstantním zatížením [7]

V případě jiných druhů zatížení (S2 – S8), tedy pro krátkodobé (konstantní) respektive cyklické (proměnné) typy zatížení, je třeba si uvědomit, že doba chodu respektive cyklu pohonu je při této zátěži kratší než tepelná časová konstanta. Pohon tedy za tento čas nedosáhne ustáleného oteplení a je možné ho v určité míře přetěžovat. [6]

Do této skupiny spotřebičů patří pro danou aplikaci zejména pohony regulovatelných a uzavíracích armatur.

Důležitým parametrem při volbě výkonu motoru je servisní faktor SF. Tento údaj udává trvale možnou přetížitelnost motoru. Např. SF 1,15 znamená, že motor lze trvale přetěžovat až o 15%. Tato hodnota tedy udává jakousi skrytou výkonovou rezervu motoru. SF se používá především u motorů s krytím IP23. Pro motory s IP44 a vyšším je dána SF =1. Servis faktor je přesně definován standardem NEMA, který se v Evropě příliš neuplatňuje. Podle této normy je pro daný motor povoleno překročení dovoleného oteplení vzhledem k třídě izolace o 10K. Při provozování za těchto podmínek však nesouhlasí jmenovité údaje motoru. [8]

3.1.3. Dovolené oteplení

Při dimenzování pohonu je důležitým hlediskem jeho dovolené oteplení a třída izolace. Zdrojem oteplení motoru jsou především jeho ztráty. Každý typ motoru má svůj nejvíce tepelně namáhaný konstrukční bod. Ztráty v železe jsou odváděny přes větší tepelný od-



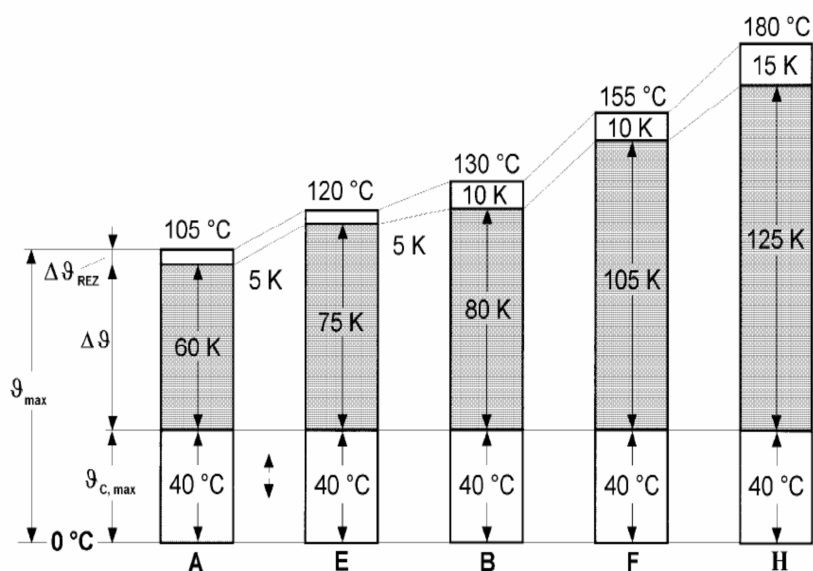
por než ztráty ve vinutí a ztráty v ložiscích jsou odváděny olejem nebo chlazením ložiskových štítů. U asynchronních motorů (AM), které jsou nejčastěji používaným motorem této aplikace je rozhodující oteplení vinutí ve statoru, poněvadž v rotoru nakrátko lze připustit větší oteplení. Pouze u velkých asynchronních strojů je nutné vzhledem k rozbíhání velkých setrvačných hmot kontrolovat i oteplení klece. [4]

Dovolená oteplení pro příslušné třídy izolace předepisuje norma ČSN EN 60034-1. V Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty oteplení pro referenční podmínky, maximální teplotu okolí 40°C, nadmořskou výšku do 1000m, nepřímé chlazení vzduchem a předpokládanou trvalou zátěž S1. V případě že jsou tyto podmínky jiné, je třeba volit hodnoty z jiných tabulek příslušné normy nebo použít korekci mezních hodnot. [5]

Nejčastěji vyráběným motorem jsou motory s izolační třídou F ovšem se jmenovitými hodnotami danými pro oteplení vinutí odpovídající třídě B.

Tab. 1 – Mezní hodnoty oteplení pro střídavá vinutí strojů o výkonech 600W až 200kW [5]

Tepelná třída izolace	A	E	B	F	H
Mezní hodnota oteplení vinutí nepřímo chlazeným vzduchem	60°	75°	80°	105°	125°



Obr. 4 – Dovolené oteplení vinutí pro jednotlivé třídy izolace; $\vartheta_{C,max}$ - maximální teplota okolí, $\Delta\vartheta$ - dovolené oteplení vinutí, ϑ_{max} - maximální teplota izolační třídy [8]



Toto provedení tedy poskytuje jistou „skrytou“ výkonovou rezervu pohonu. V případě, že bychom motor zatěžovali adekvátně k izolační třídě F, dojde ke změně některých parametrů. Pro výpočet těchto hodnot použijeme vzorec pro změnu oteplení způsobenou proudem [3.1.3.1]. Vycházíme z toho, že ztráty naprázdno jsou nezávislé na zatížení a ztráty ve vinutí jsou úměrné kvadrátu proudu [4]:

$$\Delta\vartheta = \left(\left(\frac{I_X}{I_N} \right)^2 - 1 \right) \cdot 100 \quad [3.1.3.1]$$

Pokud si dosadíme zvýšení dovoleného oteplení z třídy B na třídu F, tedy o 25K, odpovídající proudové přetížení je 12%. Pohon tedy můžeme proudově, výkonově a momentově přetížít o 12% vůči jmenovité hodnotě. Ovšem vzhledem ke kvadratické závislosti ztrát na pracovním proudu by se nám při tomto přetížení snížila účinnost motoru. Výrobce tedy většinou udává účinnost pro třídu izolace F se zatížením odpovídající třídě B. [4]

3.1.4. Doba rozběhu a pohybová rovnice

S ohledem na moment setrvačnosti a především dobu rozběhu posuzujeme, o jaký druh rozběhu se jedná. Rozlišujeme lehký (normální), polotěžký nebo těžký rozběh. Lehký rozběh platí pro nízké momenty setrvačnosti a krátké časy rozběhu, při kterém nedochází k takovému přetěžování pohonu jako u těžkých rozběhů. Hlavním představitelem lehkého rozběhu je odstředivé čerpadlo, naopak s těžkým rozběhem se můžeme setkat u kompresorů, dopravníkových pásů (pro těžší náklad) ale také ventilátorů.

K těmto kritériím se přihlíží především při dimenzování motoru, ale také např. při volbě softstartérů nebo ochranných relé proti přetížení a dalších ochranných prvků.

Přesnou analýzu rozběhu (přechodného děje) řeší pohybová rovnice.

Při delším rozběhu než na který je motor konstruován by mohlo dojít k přehřátí a zničení pohonu. U regulovaných pohonů je třeba řešit kromě rozběhu i další přechodné děje, které jsou způsobené zrychlováním a zpomalováním při regulaci pohonu. K analýze rotující mechanické soustavy (a přechodných dějů) slouží pohybová rovnice. [4]

$$M_H - M_Z = M_{DYN} \quad [3.1.4.1]$$

M_H - hnací moment

M_Z - zátěžný moment

M_{DYN} - dynamický moment

J - moment setrvačnosti



Pro výpočet doby rozběhu a řešení přechodných elektromechanických jevů je možné použít několik metod. Všeobecně použitelnou metodou je numerická integrace. [4]

Tato metoda vychází z úpravy pohybové rovnice na diferenční tvar:

$$(M_{DYN})_i = (M_H - M_Z)_i = J \frac{2\pi}{60} \left(\frac{\Delta n}{\Delta t} \right)_i \quad [3.1.4.2]$$

Kontrola doby rozběhu uvedeným způsobem je poměrně přesná, ale také zdlouhavá. V praxi je možno tento způsob nahradit rychlejší metodou, kvalifikovaným odhadem pomocí dynamického momentu.

$$M_{DYN} = J \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad [3.1.4.3]$$

Pokud do základního vztahu [3.1.4.3] dosadíme jmenovité otáčky a maximální povolenou délku doby rozběhu, dostaneme hodnotu, která vyjadřuje minimální velikost dynamického momentu potřebného k dosažení rozběhu v požadovaném čase. Tuto hodnotu pak stačí porovnat se skutečným průběhem hnacího a zátěžného momentu, tedy dynamického momentu. [8]

3.1.5. Způsob rozběhu

Při volbě rozběhu zohledňujeme především mechanické rázy, tvrdost sítě a úbytek napětí, dobu rozběhu a průběhy momentů v přechodných dějích.

Mechanické rázy - některé poháněné stroje nemusí být schopny pojmout mechanické rázy způsobené při přechodných dějích pohonu, zejména pak při rozběhu a zastavení. V případě aplikace s odstředivým čerpadlem jsou největším problémem tlakové rázy v potrubním systému. Posoudit toto hledisko je především úkolem technologa, strojního projektanta či dodavatele strojního zařízení, nicméně projektant elektro části musí následně tyto požadavky zohlednit ve svém návrhu.

Po posouzení uvedených hledisek zvolíme vhodný způsob rozběhu AM. Nejčastěji používanými způsoby jsou:

Přímé připojení k síti

Nevýhodou tohoto nejjednoduššího způsobu rozběhu je především vysoký záběrový proud a způsobené úbytky napětí. Další nevýhodou mohou být i mechanické rázy vzhledem k neplynulému způsobu rozběhu. S ohledem na způsob rozběhu je však nutné posuzovat také zastavení motoru. V případě napájení čerpadel vznikají v důsledku rychlého zastavení tlakové nárazy v potrubí, které převyšují rázy při rozběhu. To je způsobeno



vyšším hmotnostním průtokem média v soustavách trubek, kde médium krátkodobě pokračuje v toku se stejnou rychlostí i po zastavení čerpadla, nastává vyrovnáním sil v soustavách trubek. Tyto jevy způsobují mechanické opotřebení nejen samotnému potrubí, ale také čerpadlům a jejich oběžným kolům. [9]

Hvězda trojúhelník

Způsob rozběhu spočívá v mžikovém přepnutí statorového vinutí motoru z hvězdy do trojúhelníka. Tímto rozběhem dosáhneme především žádaného snížení záběrného proudu na 1/3 proti přímému spuštění motoru. Nevýhodou je ovšem proudový a momentový ráz během přepnutí. Následkem těchto rázů je namáhání izolace a ložisek motoru a pro poháněnou soustavu (čerpadlo) jsou to opět tlakové rázy v potrubí. Další nevýhodou může být i snížení záběrného momentu, který v zapojení do hvězdy dopovídá 1/3 momentu v zapojení do trojúhelníka. Přepínání lze provádět automaticky nebo ručně. Tímto způsobem lze však rozbíhat pouze motory, které jsou k tomu konstrukčně uzpůsobeny. Takový motor má na štítku uvedeno napětí 400/690V, přičemž vyšší napětí je vždy myšleno pro zapojení do hvězdy. [10]

Softstartér

Softstartér je polovodičový měnič, který pomocí antiparalelních tyristorů zapojených v každé fázi dokáže podle řídicích impulsů plynule měnit napětí. Tím že při rozběhu motoru postupně zvyšujeme napětí z nuly až na jmenovitou hodnotu (podle nastavených parametrů softstartéru, tzv. rampy), dojde ke snížení záběrového proudu a zároveň ke snížení záběrového momentu s kvadrátem napětí. Celý rozběh probíhá na rozdíl od předchozích metod díky postupnému zvyšování napětí plynule a nezpůsobuje mechanické ani proudové rázy. Nevýhodou může být snížení záběrového momentu v případě těžkých rozběhů. Výraznou pomocí v soustavách s odstředivým čerpadlem je softstartér i při jeho zastavení. Softstartér omezuje napětí, po nastavenou časovou rampu i po vypnutí. Toto omezení výrazně redukuje tlakové rázy v potrubí, které jsou způsobeny energií média v potrubí. [4]

U elektronických softstartérů s 3 fázovým řízením je k dispozici speciální funkce, tzv. krokové snížení napětí. Tato funkce optimalizuje zastavení motoru čerpadel, dle předem definovaných parametrů dané soustavy. Nevýhodou tohoto rozběhu je však vyšší pořizovací cena polovodičových zařízení. [9]



Frekvenční měnič (u regulovaných pohonů)

Frekvenční měniče (FM) jsou poměrně drahé a v případě, že nepotřebujeme pohon regulovat během jeho chodu je použití FM pro rozběh zbytečným komfortem.

Frekvenční měnič pracuje na principu regulace otáček díky změně frekvence při dodržení podmínky $U/f = \text{konst.}$ Jde o polovodičové zařízení, které mění vstupní parametry sítě s konstantním napětím a frekvencí použitím stejnosměrného meziobvodu na výstupní hodnoty s proměnnou frekvencí a napětím. Velkou výhodou tohoto rozběhu kromě plynulé regulace, které ovšem umí i softstartér je zachování jmenovitého momentu i při nízké frekvenci respektive nízkých otáčkách. [4]



4. Návrh elektrotechnologické části

V jednotlivých kapitolách je uveden obecný teoretický rozbor daného celku s popisem hledisek nutných pro komplexní řešení návrhu a následně je zpracován návrh konkrétního elektrického zařízení ČOV Benešov. Kapitoly jsou děleny podle příslušných celků elektrotechnického zařízení:

- Základní údaje
- Energetická bilance
- Návrh transformátoru
- Studie účinníku a kompenzace jalové energie
- Výpočet zkratových proudů
- Přípojka, trafostanice a měření
- Kabelový rozvod
- Motorový rozvod, jistící a spínací prvky
- Kogenerační jednotka

4.1. Základní elektrotechnické údaje ČOV Benešov

Napěťová soustava

3stř. 50Hz, 22kV / IT

3NPE~50Hz, 400/230V / TN-C-S

Ochrana před úrazem elektrickým proudem (dle ČSN 33 2000-4-41 ed.2)

Normální ochrana - automatickým odpojením od zdroje. Toto ochranné opatření zahrnuje ochranu základní a ochranu při poruše.

Základní ochrana je zajištěna izolací živých částí nebo přepážkami nebo kryty.

Ochrana při poruše je zajištěna ochranným pospojováním a v případě poruchy automatickým odpojením.

Doplněná ochrana – normální ochrana v kombinaci s doplňkovou ochranou, tj. s doplňujícím pospojováním nebo proudovým chráničem nebo doplňkovou izolací.

V prostorech normálních a nebezpečných je volena ochrana normální, v prostorech zvláště nebezpečných ochrana doplněná. [11]

Údaje o prostředí

Prostředí odpovídá ČSN 2000-1 ed.2 a ČSN 2000-5-51 ed.2 o určení vnějších vlivů.

V jednotlivých objektech a prostorech je prostředí stanoveno odbornou komisí a je podrobně i se zdůvodněním uvedeno v protokolu o určení vnějších vlivů prostředí. [12]



Stupeň zabezpečení

Stupeň zabezpečení dodávky: 3. st. dle ČSN 341610

Vybrané spotřebiče určené pro minimální chod ČOV v 2. st. dle ČSN 341610. [13]

Výkonová bilance

Výkonová bilance: instalovaný výkon $P_i = \sum P_n = 516 \text{ kW}$

výpočtové zatížení $P_p = 391 \text{ kW}$

Součinitel náročnosti β :

$$\beta = \frac{P_p}{P_i} = \frac{391}{516} = 0,75$$

Výpočtový proud:

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_p}{U_s \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{1000 \cdot 391}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85} = 664 \text{ A}$$

Kompensace

Kompensace účinníku: centrální kompenzační rozvaděč s automatickou regulací a hrazenými kondenzátory

Měření spotřeby ČOV

V areálu ČOV je v objektu trafostanice obchodní měření spotřeby elektrické energie typu A. To je realizováno čtyřkvadrantním elektroměrem. Přenos měřených hodnot je formou GSM.

Převod měřících transformátorů proudu: 600/5A, třída přesnosti 0,5S.

Uzemnění

Odpor uzemnění nulového bodu (uzlu) zdroje nebo pracovně uzemněného místa zdroje nemá být větší než 5Ω . Nelze-li tuto hodnotu ve ztížených podmínkách dosáhnout obvyklými prostředky, dovoluje se odpor uzemnění větší, až do 15Ω .

Celkový odpor uzemnění vodičů PEN odcházejících vedení z transformovny včetně uzemněného středu (uzlu) zdroje, nemá být pro sítě o jmenovitém fázovém napětí 230V větší než 2Ω . [11]



4.2. Energetická bilance

4.2.1. Energetická bilance - teoretická část

Nejprve je třeba sestavit kompletní seznam elektrických spotřebičů s přesnými elektrickými parametry. Na základě těchto parametrů lze následně vytvořit energetickou bilanci. Požadované parametry jsou uvedeny v praktické části v tabulce č 2.

Pro dimenzování napájecího zdroje a elektrického rozvodu je nutné stanovit výpočtové zatížení P_p a výpočtový proud I_p .

Vzhledem k tomu, že v rámci skupiny nepracují všechny spotřebiče současně a na plný výkon, není hospodárné navrhovat zdroj podle součtu jmenovitých výkonů respektive podle instalovaného výkonu P_i celé provozovny. Pro hospodárný návrh zdroje je určující výpočtové zatížení, které respektuje pro daný celek reálné maximum současně pracujících spotřebičů. P_p lze stanovit více způsoby. Jednou z možností je použití součinitele náročnosti β . [13, 14]

- součinitel náročnosti β - podíl maxima P_{max} a instalovaného výkonu P_i

$$\beta = \frac{P_{max}}{P_i} \quad [4.2.1.1]$$

maximum P_{max} [kW] - příkon určený z maximálního odběru elektrické energie za jednu hodinu v období největšího odběru v roce

instalovaný výkon P_i [kW] – součet jmenovitých hodnot všech instalovaných spotřebičů

výpočtové zatížení P_p [kW] - součin instalovaného výkonu P_i a předpokládaného součinitele náročnosti β .

$$P_p = P_i \cdot \beta \quad [4.2.1.2]$$

výpočtový proud I_p [A] – proud vypočtený z výpočtového zatížení, jmenovitého napětí a účinníku, vztah pro trojfázové spotřebiče:

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_p}{U_s \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi} \quad [4.2.1.3]$$

U_s [V] je jmenovité sdružené napětí střídavé trojfázové soustavy

$\cos\varphi$ je průměrný účinník spotřebičů, které jsou v chodu během maxima

Příklady informativních hodnot součinitelů náročnosti a účinníku pro jednotlivé aplikace jsou uvedeny v normě ČSN 341610 tab. 12 a 13. Ve zmíněné normě lze pro danou apli-



kaci nalézt také střední hodnotu účinníku potřebnou pro výpočet výpočtového proudu I_p . Tato norma je ovšem z roku 1963 a nemusí již odpovídat reálné skutečnosti.

Součinitel náročnosti lze stanovit také takto:

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad [4.2.1.4]$$

η_m účinnost spotřebičů (motorů) při daném využití

η_s účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa až ke spotřebiči

k_s součinitel současnosti – poměr jmenovitých výkonů spotřebičů, které jsou současně v chodu k instalovanému výkonu všech spotřebičů

$$k_s = \frac{\sum P_{ns}}{\sum P_n} \quad [4.2.1.5]$$

k_z součinitel využití – poměr skutečně odebíraného výkonu spotřebičů, které jsou současně v chodu k jejich jmenovitému výkonu

$$k_z = \frac{\sum P_s}{\sum P_{ns}} \quad [4.2.1.6]$$

$\sum P_{ns} [W]$ - jmenovité zatížení současně připojených spotřebičů

$\sum P_s [W]$ - skutečné zatížení současně připojených spotřebičů

$\sum P_n [W]$ - jmenovité zatížení všech spotřebičů

Z uvedených vztahů je zřejmé, že koeficient zahrnuje jak hledisko ponížení instalovaného výkonu pouze na odběr současně pracujících spotřebičů tak hledisko ponížení s ohledem na skutečný odběr v pracovním bodě stroje. Vztah pro výpočet náročnosti lze dále upravit:

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s} = \frac{1}{\eta_m \cdot \eta_s} \frac{\sum P_s}{\sum P_n} \quad [4.2.1.7]$$

Při určování výpočtového zatížení je potřeba rozlišit zda jde o řešení elektrického rozvodu pro závod jako celek nebo skupinu spotřebičů nebo jednotlivý spotřebič. Pro každý způsob je výpočtové zatížení stanoveno jiným způsobem a s jinými součiniteli náročnosti.

Pro dimenzování přívodního zdroje pro celou provozovnu platí uvedený vztah [4.2.1.2].

Pro dimenzování skupiny spotřebičů připojených do jednoho rozvaděče lze také použít výpočet podle předchozího vztahu, v tomto případě ovšem platí jiný součinitel náročnosti, který je stanoven pro charakteristickou skupinu spotřebičů.



Pokud jde o nehomogenní skupinu s velkým rozsahem výkonů, vycházíme ze vztahu:

$$P_p = \alpha P_x \cdot \beta P_n \quad [4.2.1.8]$$

P_x [W] součet jmenovitých výkonů x největších spotřebičů charakterizujících určitou skupinu

P_n [W] součet jmenovitých výkonů této skupiny

α, β součinitelé náročnosti příslušné skupiny

Jak už bylo řečeno, hodnoty součinitelů náročnosti pro jednotlivé aplikace a pro konkrétní typ elektrického rozvodu jsou uvedeny v normě ČSN 34 1610. Jde ovšem pouze o informativní hodnoty. V případě stávajících objektů lze tento koeficient stanovit měřením v době největšího odběru. U nových objektů je stanovení koeficientů komplikovanější. Ve fázi návrhu kdy nejsou k dispozici veškeré parametry lze použít koeficient podobného provozu nebo stanovit koeficient na základě předpokládaných tabulkových hodnot charakteristického zařízení. Při návrhu v rámci realizační dokumentace, tedy v době kdy již známe přesné parametry lze koeficient stanovit podle vztahu [4.2.1.2]

V realizačním stupni dokumentace je ovšem možné koeficient určit také až zpětně po určení výpočtového zatížení, pouze pro kontrolu výpočtu (porovnání s podobnými provozy). Skutečný maximální odběr se pak vypočte na základě hodnot skutečného odběru jednotlivých spotřebičů daných pracovním bodem stroje a příslušné účinnosti. Následně jsou na základě znalosti technologického procesu stanoveny pro určité charakteristické skupiny spotřebičů činitele současnosti k_{sx} . Ty vyjadřují pravděpodobnost soudobého chodu zařízení. Tento koeficient je volen na základě doby provozu, ale také s ohledem na možnost připojení v době maximálního odběru (zimní provoz, dešťové přeháňky, atd.). Jednotlivé skutečné odběry vynásobené koeficientem současnosti následně sečteme a výslednou hodnotu upravíme s ohledem na účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa až ke spotřebiči.



4.2.2. Energetická bilance – praktická část

Sestavíme seznam spotřebičů s požadovanými parametry (viz příloha č. 1). Vybrané spotřebiče čerpací stanici vratného kalu (rozdavěč RM8) jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Pro každý spotřebič v tabulce vypočteme skutečný příkon P_{1s} podle vztahu:

$$P_{1s} = \frac{P_{2s}}{\eta_m} \cdot k_{sx}$$

Jednoduchým součtem příkonů všech zařízení dostaneme celkový skutečný příkon současně pracujících spotřebičů ΣP_{1s} .

$$\Sigma P_{1s} = 391 \text{ kW}$$

Instalovaný výkon P_i dostaneme součtem jmenovitých výkonů všech spotřebičů ΣP_n

$$P_i = \Sigma P_n = 516 \text{ kW}$$

Při zanedbání účinnosti napájecí soustavy stanovíme hodnotu odpovídající výpočtovému zatížení P_p :

$$P_p = \Sigma P_{1s} = 391 \text{ kW}$$

Vypočteme součinitel náročnosti β :

$$\beta = \frac{P_p}{P_i} = \frac{391}{516} = 0,75$$

Výpočtový proud I_p pro trojfázové spotřebiče (pro střední hodnotu účinníku):

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_p}{U_s \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \cdot 391}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85} = 664 \text{ A}$$

Tab. 2 – Seznam spotřebičů napájených z rozvaděče RM8

název	provozní soubor	motorový rozvaděč	provoz 1 / záloha 0	popis	P_n	U_n	skutečný výkon na hřídeli	frekvenční měnič FM / softstartér rSS	účinnost η_m	$\cos \phi$	$\text{tg } \phi$	činitel současnosti k_{sx}
					[kW]	[V]						
Z02.58	PS02.3	RM8	1	ČERPADLO VRATN. KALU	7,5	400	5,2	FM	84	1	0,00	1
Z02.59	PS02.3	RM8	1	ČERPADLO VRATN. KALU	7,5	400	5,2	FM	84	1	0,00	1
Z02.60	PS02.3	RM8	0	ČERPADLO VRATN. KALU	7,5	400	5,2	FM	84	1	0,00	0
Z02.61	PS02.3	RM8	1	ROZVADĚČ MOSTU DN	3	400	2	-	80	0,8	0,75	0,7
Z02.62	PS02.3	RM8	1	ROZVADĚČ MOSTU DN	3	400	2	-	80	0,8	0,75	0,7
Z02.67	PS02.3	RM8	1	ČERPADLO PRŮSAKŮ V ČVK	1,3	400	1	-	80	0,71	0,99	0,7
Z02.68	PS02.3	RM8	1	ATS	22,5	400	18,1	-	80	0,8	0,75	0,7
Z02.69a	PS02.3	RM8	1	FILTR	0,3	400	0,25	-	86	0,83	0,67	0,7
Z02.69b	PS02.3	RM8	1	KOMPRES. STANICE FILTRU	1,5	400	1,29	-	82	0,81	0,72	0,7
Z02.73a	PS02.3	RM8	1	DÁVKOVAČKA ŽEL.SOLI	0,25	230	0,2	-	85	0,75	0,88	0,7
Z02.73b	PS02.3	RM8	1	DÁVKOVAČKA ŽEL.SOLI	0,25	230	0,2	-	85	0,75	0,88	0,7
A237.02	PS02.3	RM8	1	ŠOUPĚ SE SERVOPOHONEM	3	400	2,8	-	74	0,79	0,78	0,2
Z02.63	PS02.5	RM8	1	ČERPADLO DEŠŤOVKY ČSOV3	27	400	33	SS	86	0,89	0,51	0,7
Z02.64	PS02.5	RM8	0	ČERPADLO DEŠŤOVKY ČSOV3	27	400	33	SS	86	0,89	0,51	0
Z02.65	PS02.5	RM8	1	ČERPADLO ZNEČIŠTĚNÉ ODPAD. V.	4	400	3,5	-	85	0,83	0,67	0,7
Z02.66	PS02.5	RM8	0	ČERPADLO ZNEČIŠTĚNÉ ODPAD. V.	4	400	3,5	-	85	0,83	0,67	0



4.3. Návrh transformátoru - teoretická část

4.3.1. Návrh transformátoru - teoretická část

Při návrhu transformátoru je třeba vzít v úvahu tyto základní požadavky:

- výpočtové zatížení transformátorů
- požadovaný stupeň důležitosti dodávky elektrické energie
- co nejmenší ztráty v transformátoru
- přijatelné odchytky napětí za transformátory
- přijatelné zkratové proudy za transformátory
- nízké investiční náklady a provozní náklady [15]

Jmenovitý výkon transformátoru musí být schopen pokrýt hodnotu danou **výpočtovým zatížením**, která odpovídá předpokládanému maximálnímu reálnému odběru daného celku. S ohledem na hospodárnost návrhu je však nutné zvážit do jaké míry výpočtové zatížení odpovídá běžné denní zátěži. Při posuzování dalších hledisek (nejmenší ztráty, zálohování, atd.) je třeba s ohledem na hospodárnost návrhu posuzovat především hodnoty, při kterých bude transformátor v provozu nejčastěji. Například v naší aplikaci určené pro ČOV se výpočtové zatížení stanoví pro provoz při relativně extrémních podmínkách (trvalý déšť, obleva, apod.), které však nelze posuzovat jako krátkodobé špičky, které lze pokrýt krátkodobým přetížením transformátoru. Tyto stavy lze ovšem poměrně účinně regulovat například pomocí vzájemných blokad chodu některých technologických procesů.

Požadovaný **stupeň důležitosti dodávky elektrické energie** je stanoven podle důležitosti jednotlivých provozoven a je rozdělen do tří stupňů.

Dodávky 1. stupně musí být zajištěny za každých okolností, jelikož jejich přerušení může způsobit ohrožení lidských životů nebo velké ekonomické ztráty na zařízení.

Tato dodávka je zajištěna pomocí dvou na sobě nezávislých napájecích zdrojů, s plným pokrytím výkonu od každého zdroje (100% záloha).

Dodávky 2. stupně by měly být zajištěny pro takové provozy kde výpadek elektrické energie způsobí podstatné zmenšení nebo zastavení výroby bez možnosti ohrožení osob.

Tato dodávka je zajištěna zálohovaným zdrojem, kde však není posuzována nezávislost napájení. Záložní zdroj musí pokrýt výkon k zajištění nutného provozu. To lze realizovat



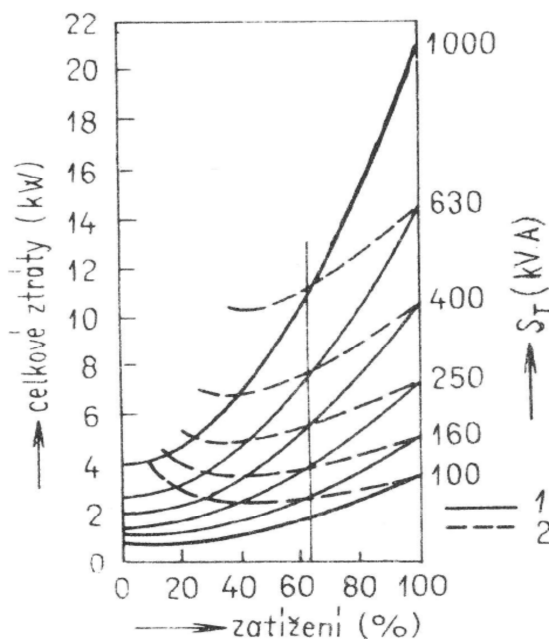
například dvojicí transformátorů napájených z jedné sítě nebo kombinací transformátoru a generátoru.

Dodávka 3. stupně nemusí být zajištěna zvláštními opatřeními.

Do této skupiny spadá podle ČSN 34 1610 také ČOV. [13]

Dalším hlediskem návrhu transformátoru jsou **celkové ztráty**. U transformátoru pod proudem se jeho jádro zahřívá. Jde jednak o hysterezní ztráty závislé na materiálu, z kterého je tvořeno jádro, jednak o nežádoucí vířivé proudy vznikající ve větších plochách vodiče ve střídavém magnetickém poli. Volné elektrony se v kovovém vodiči začnou pohybovat po kružnicích. Přitom předávají část své energie krystalové mřížce a kov se začne ohřívat. V obou případech to jsou ztráty naprázdno (v „železe“). Ve vodičích vinutí cívek se přemění část energie na Jouleovo teplo a způsobuje oteplení vinutí – jedná se o ztráty nakrátko (v „mědi“). Hospodárné zatížení je takové, kdy jsou v transformátoru nejmenší poměrné ztráty, tedy nejmenší poměr činných ztrát k přenášenému zdánlivému výkonu. [16]

Pokud nejsou transformátory zatěžovány krátkodobě, je účelné zatěžovat transformátor s ohledem na ztráty asi na 70 % výkonu viz Obr. 5. [15]



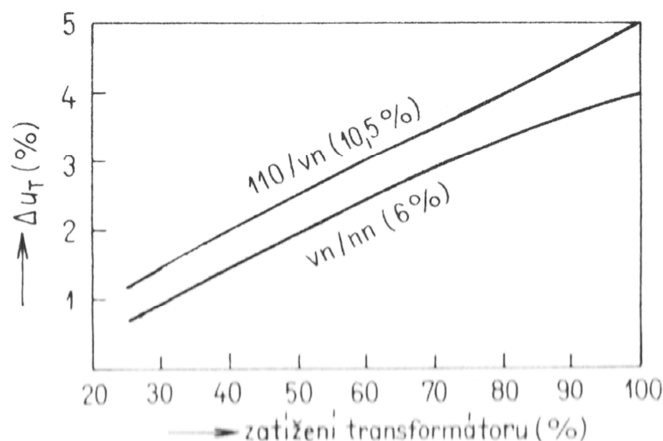
Obr. 5 – Celkové ztráty v transformátorech vn/nn do 1000 kVA v závislosti na zatížení; 1- ztráty, 2 – křivky stejného výkonu [15]

Hledisko **odchyly napětí** na sekundáru transformátoru budeme pro danou aplikaci posuzovat pouze na úrovni vn/nn. Transformátory na vyšších napěťových úrovních jsou vybaveny regulací napětí a udržují hodnoty napětí v mezích stanovených normou. ČSN 33 0120. Pro síťová napětí nn 230V, 400V a 690V stanoví norma ČSN 33 0121 toleranci $\pm 10\%$.

Napětí transformátoru se řídí změnou poměru počtu závitů. U transformátorů vn/nn se odbočky dělají na vinutí vyššího napětí v rozsahu 5% nebo 2,5%. Tato regulace ovšem slouží pouze pro nastavení vhodného převodu pro konkrétní parametry v určitém místě rozvodné soustavy a ne pro vyrovnání odchylek napětí, které je způsobeno proměnným zatěžováním soustavy. Úbytek napětí na transformátoru se mění se zatížením (viz Obr. 6). Povolená odchylka napětí např. na svorkách motorických spotřebičů je pouze $\pm 5\%$ jmenovitých hodnot sítě. Z uvedeného vyplývá, že i při nastavení vhodného pře-



vodu, je velmi obtížné dodržet odchylky napětí v celém rozsahu zatížení transformátoru. Jinými slovy v případě dimenzování kabelových rozvodů s ohledem na úbytek napětí je třeba brát v potaz i úbytek napětí na transformátoru, který se však s proměnnou zátěží mění. [15]



Dalším důležitým hlediskem je úbytek napětí způsobený rozběhem asynchronních motorů. Při rozběhu asynchronního motoru je záběrný proud I_z několikanásobně větší, než je jmenovitý proud motoru I_n . I_z bývá zhruba 5-8x I_n . Záběrný proud napájecího obvodu je omezen pouze impedancí sítě a impedancí motoru nakrátko. Vysoký záběrový proud způsobuje chvilkový pokles napětí, který může ovlivnit ostatní spotřebiče napájené ze sítě. Vzhledem k tomu, že moment je úměrný kvadrátu napětí může úbytek způsobit i problém s vlastním rozběhem motoru, kdy snížený záběrný hnací moment bude nižší než součet zátěžného a dynamického momentu. [8]

Maximální povolený úbytek napětí způsobený rozběhem motoru je normou pro připojování elektrických strojů ČSN 33 2190 stanoven 10%. [17]

Při výpočtech je třeba vzít v úvahu také již zmiňovanou mez napětí v síti nn podle ČSN 33 0120 v toleranci $\pm 10\%$. [18]

Zjednodušený, nicméně pro většinu aplikací relativně přesný výpočet úbytku napětí, můžeme provést pouze z hodnot zkratového výkonu sítě a štítkových hodnot motoru. Při uvedeném výpočtu zanedbáváme impedanci napájecího kabelu. Proud při rozběhu má jalový charakter. [4]

Výpočet úbytku napětí při rozběhu:

S_{zkr} – zkratový výkon sítě [VA]

Tato hodnota zohledňuje tzv. „tvrdost“ sítě a je dána především výkonem transformátoru a jeho napětím nakrátko (v době rozběhu se obvod chová jako při zkratu). V případě, že tuto hodnotu neznáme, můžeme s drobnou nepřesností počítat pouze s údaji transformátoru:

$$S_{zkr} = \frac{100 \cdot S_{tr}}{u_k} \quad [4.3.1.1]$$



S_{tr} – zdánlivý výkon transformátoru [VA]

u_k – napětí nakrátko transformátoru [%]

X_S – reaktance sítě [Ω]

Rovnici pro tuto reaktanci odvodíme z poměru impedancí sítě Z_S a motoru Z_M vůči zdánlivým výkonům jmenovitých hodnot motoru S_M a zkratového výkonu sítě S_{zkr} .

$$\frac{Z_S}{Z_M} = \frac{S_M}{S_{zkr}} ; \quad X_S \approx Z_S = \frac{S_M}{S_{zkr}} \cdot Z_M = \frac{U_n^2}{S_{zkr}} \quad [4.3.1.2]$$

X_{kM} – reaktance motoru nakrátko [Ω]

Reaktanci motoru v momentě připojení vypočteme ze známého záběrového proudu motoru při jmenovitém napětí motoru.

$$X_{kM} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_z} \quad [6.1.3] \quad \frac{U_M}{U_n} = \frac{X_{kM}}{X_S + X_{kM}} \quad [4.3.1.3]$$

Úbytek napětí na svorkách motoru U_M vyjádříme poměrem skutečného napětí na svorkách motoru vůči jmenovitému napětí U_n . Tento tvar lépe vypovídá o velikosti poklesu napětí. Výsledný úbytek v sobě zohledňuje tvrdost sítě, ze které je motor napájen. [4]

Pro úplný výpočet úbytku napětí je třeba dopočítat úbytek napětí na vedení. Této problematice se věnuje kapitola 4.7.1.3. Orientační hodnoty potřebných výkonů transformátoru pro spouštění velkých asynchronních motorů s kotvou nakrátko jsou uvedeny v tabulce č. 3. V naší řešené aplikaci tento problém částečně odpadá využitím polovodičových měničů pro rozběh nebo regulaci velkých motorů. Při použití frekvenčního měniče nebo softstartéru při rozběhu dochází k výraznému omezení záběrového proudu a tím k omezení úbytku napětí při rozběhu.

Tab. 3 – Potřebný výkon transformátorů pro spouštění AM [15]

Výkon motoru (kW)	Potřebný výkon transformátoru		Přípustné předchozí zatížení transformátoru (kW)
	(kV.A)	u_k (%)	
40	100	4,2	38
75	160	4,2	50
100	250	4,2	95
125	250	4,2	32
125	400	6	187
160	630	6	330
200	630	6	290
225	630	6	180
250	1 000	6	530
320	1 000	6	460
400	1 600	6	850
500	1 600	6	750
800	2 500	6	1 150
1 000	4 000	6	2 120
1 125	4 000	6	1 187
1 600	6 300	7	3 300



Zkratový proud za transformátorem ovlivňuje především výkon transformátoru a jeho napětí nakrátko. Výpočtu zkratových proudů se podrobněji věnuje kapitola 4.5. Podle zkratového proudu navrhujeme zkratovou odolnost spínacích přístrojů. Přístroje s velkou zkratovou odolností jsou ale velmi nákladné a je tedy žádoucí snížit výkon transformátoru na možné minimum.

V případě, že je výkon transformátoru v tomto ohledu příliš velký, je možné napájet rozvod odděleně pomocí dvou transformátorů. Tím se v jednotlivých sekcích sníží zkratové proudy a zároveň se nám zvýší spolehlivost dodávky. S ohledem na výše uvedenou kapitolu o stupni důležitosti dodávky, je třeba zmínit, že v případě trvalého paralelního chodu transformátorů je třeba rozvod dimenzovat na zkratový proud odpovídající příspěvku obou transformátorů. V případě že jde o „paralelní“ chod pouze po dobu nezbytně nutnou pro přepojení napájení v rámci zajištění bezvýpadkového zálohování napájení, pak je dovoleno rozvodné zařízení zkratově přetížít až o 100%. [15]

Pro volbu optimálního transformátoru je třeba posoudit **nízké investiční a provozní náklady**. Transformátor musí v první řadě splňovat potřebné technické parametry provozu a dále je možno porovnat jednotlivé varianty návrhu na základě investičních a provozních nákladů. Do investičních nákladů patří především kupní cena transformátoru, cena postavení stanoviště, doprava a následná montáž. Provozní náklady zahrnují údržbu, revize, obsluhu a opravy. Do nákladů je třeba započítat také ztráty elektrické energie. Vzhledem k tomu, že některé náklady lze velmi těžko vyčíslit (údržba, spolehlivost, atd.) je nepřesné hodnotit pouze na základě dopočtených hodnot, nicméně pro porovnání více variant jde o vypovídající údaje. V rámci níže uvedeného vztahu výpočtu je zohledněna také předpokládaná doba provozu respektive životnost transformátoru [14]:

$$N_n = A + \sum_{k=1}^n 24 \cdot 365 \left(P_0 + P_k \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right) \cdot B \cdot \left(\frac{1 + \frac{d}{100}}{1 + \frac{e}{100}} \right)^k \quad [4.3.1.4]$$

N_n – celkové náklady na nákup a ztráty za n let provozu (přepočteno na ceny v době nákupu) [Kč]

A – kupní cena transformátoru [Kč]

B – kalkulační cena za 1kWh elektrické energie [Kč]

P_0 – ztráty naprázdno [kW]

P_k – ztráty nakrátko při 75°C [kW]

$24 \cdot 365$ – počet hodin v roce [h]

e – inflační míra [%]

n – počet roků, pro který transformátor chceme hodnotit [rok]

k – jednotlivé roky vyhodnocovacího období

d – odhadovaný průměrný roční nárůst ceny el. energie za vyhodnocovací období [%]



4.3.2. Návrh transformátoru – praktická část

Základním parametrem návrhu je výpočtové zatížení $P_p = 391 \text{ kW}$.

Nejbližší standardní výkonové řady transformátorů jsou 250, 400 a 630 kVA.

Výpočtové zatížení vychází z hodnot maximálního odběru. Běžný odběr bude nižší a v rámci plynového hospodářství je instalována kogenerační jednotka s generátorem 125kW, který bude dodávat energii pro vlastní spotřebu ČOV. Standardní zatížení transformátoru bude přibližně 270 kW.

Požadavek na stupeň bezpečnosti dodávky je č. 3., tedy bez potřeby záložního zdroje (vzhledem ke kogenerační jednotce bude ovšem zajištěn stupeň dodávky č. 2). Zdrojem hlavního napájení bude pouze jeden transformátor. S ohledem na minimální ztráty je transformátor optimální zatěžovat přibližně na 70% jmenovitého výkonu.

Optimální výkon trať tak aby byla splněna podmínka 270 kW ~70%:

$$P_n = \frac{270}{70} \cdot 100 = 386 \text{ kW}$$

Vzhledem k tomu, že v hlavní rozvodně nn bude umístěna centrální kompenzace, která zajistí kompenzaci účinníku na požadovanou mez PDS na hodnotu $\cos\varphi = 0,95$ až 1 je tento výkon přibližně stejný jako požadovaný zdánlivý výkon transformátoru. Pro danou aplikaci tedy použijeme transformátor se jmenovitým výkonem 400kVA.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě hlavní rozvodny nn je zhruba 10kA což je vzhledem ke jmenovitým mezním zkratovým vypínacím schopnostem přístrojů standardní hodnota. Transformátor pro možnost korekce napětí v síti vn volíme se standardním zapojením odboček na straně vn 2x 2,5% (5 poloh). Úbytky napětí s ohledem na rozběh velkých asynchronních motorů není třeba vzhledem k poměru výkonu transformátoru a největších motorů řešit. Všechny velké spotřebiče jsou zároveň spouštěny pomocí polovodičových měničů, které výrazně omezují záběrové proudy.

Vzhledem k dispozici areálu, kabelového vedení vn a možnosti využití stávajícího objektu pro účely trafostanice, bude transformátor umístěn ve zděném objektu. Vzhledem k umístění transformátoru v jedné místnosti s rozvaděči je voleno krytí IP23. Pro požadované parametry byl zvolen suchý transformátor firmy SGB viz tabulka č. 4:

Tab. 4 – Parametry suchého transformátoru SGB typ DTTH 400/20 [19]

TYP	DTTH 400/20	Po [W]	1200
VÝKON [kVA]	400	Pk [W]	4850
VN [kV]	22	Uk [%]	6
NN [V]	400	KRYTÍ	IP 23
SKUP. ZAPOJENÍ	Dyn1	HMOTNOST [kg]	1950



4.4. Kompenzace jalové energie

4.4.1. Kompenzace jalové energie – teoretická část

Většina průmyslových staveb má s ohledem na odběr elektrické energie induktivní charakter. To znamená, že kromě činného výkonu odebírá ze sítě také jalový výkon. Pokud zanedbáme další složky výkonu, můžeme poměrem činného a zdánlivého výkonu definovat účinník odběru $\cos\varphi=P/S$. V případě že je tento účinník nízký, odebíráme ze sítě větší množství jalové energie respektive větší zdánlivý výkon. To má za následek:

- vyšší náklady na zařízení elektrizační soustavy (transformátory, rozvodny, vedení, atd.), které je třeba dimenzovat na proud odpovídajícímu zdánlivému výkonu
- vyšší tepelné ztráty zařízení odpovídající kvadrátu zdánlivého proudu
- vyšší úbytek napětí elektrizační soustavy (ES)
- nižší využití generátorů díky zátěžnému induktivnímu proudu, který zeslabuje buzení generátoru a následným zvýšením budícího proudu dochází k vyšším tepelným ztrátám na rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. V opačném případě, tedy při překompenzované odlehčené síti, může odbuzený stroj vypadnout ze synchronismu, čímž by mohl překročit horní dovolenou odchylku napětí.
- zhoršení zkratových poměrů v síti (viz předchozí bod) [20]

Kromě již zmíněných důsledků na zařízení ES, je třeba zmínit, že nevykompenzovaný odběr má dopad i pro samotného odběratele elektrické energie. V případě odběru jalové energie mimo meze účinníku $\cos\varphi$, které jsou stanoveny provozovatelem distribuční sítě, zaplatí odběratel distributorovi nemalou finanční kompenzaci. [21]

Z uvedeného vyplývá, že jalový odběr elektrické energie může významně ovlivnit kvalitu elektrické energie a problematiku jalové energie je tedy třeba věnovat pozornost.

4.4.1.1. Spotřebiče jalové energie

Nejčastěji používaným spotřebičem jalové induktivní energie je asynchronní motor, který tuto energii potřebuje pro vytvoření magnetického pole statoru a rozptylový magnetický tok. Dalším zásadním spotřebičem jalového výkonu je transformátor. Jeho celkový jalový výkon tvoří složka při chodu naprázdno a složka pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který roste s kvadrátem zatížení. Další spotřebiče, které zatěžují síť svým jalovým odběrem, jsou především asynchronní generátory, transformátory, elektrické obloukové



pece, indukční pece, zařízení výkonové elektroniky, venkovní a kabelová vedení, výbojková a zářivková svítidla, atd. [20]

4.4.1.2. Vylepšení účinníku a typy kompenzace

Dosáhnout správného účinníku je možné několika způsoby. Základem pro omezení jalového výkonu je správný návrh a provozování všech zařízení od výroby až po jednotlivé spotřebiče. V případě že ani tak nelze dosáhnout požadovaného účinníku, musíme použít kompenzační zařízení, tedy připojíme zdroj kapacitního jalového výkonu.

Kompenzační zařízení dělíme podle principu:

- rotační – synchronní kompenzátor
- statické – připojení přímo na síť
- polovodičové – měnič s nucenou komutací

Podle způsobu regulace:

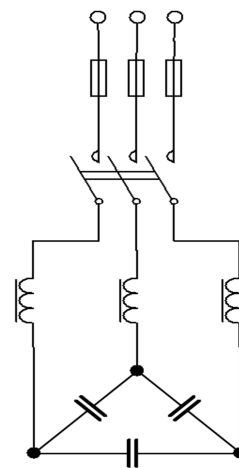
- s konstantním výkonem – neregulované
- se stupňovou regulací – spínání jednotlivých sekcí pomocí stykačů, ovládaných regulátorem účinníku
- aktivní filtry – sériově nebo paralelně zapojené generátory proudu nebo napětí tvořené můstkovým zapojením polovodičových spínačů

Podle umístění:

- individuální – je umístěno přímo u zdroje jalového výkonu, což je vhodné pro větší motory, které pracují trvale nebo dlouhodobě
- skupinové – je řízeno regulátorem podle parametrů sítě a je dimenzováno na soudobý výkon skupiny spotřebičů určitého rozvaděče
- centrální – viz předchozí způsob, ale je zapojeno přímo ve vstupní trafostanici
- smíšené – kombinace uvedených způsobů

4.4.1.3. Hrazené kompenzační zařízení

Nejčastěji používané kompenzační prostředky u běžných průmyslových staveb jsou statické kompenzátory. Vzhledem k častému využití polovodičových zařízení (především frekvenčních měničů) a nelineární zátěži v síti se často využívá hrazená kondenzátorová kompenzace. To znamená, že kondenzátor je zapojen v sérii s tlumivkou a obvod je laděn na rezonanční kmitočet, na kterém se nevyskytují harmonické. Tlumivka pak chrání kondenzátor před účin-



Obr. 7 – Hrazená kompenzace [21]



ky rezonančních jevů v síti. V takovém zapojení je však třeba počítat s tím, že tlumivka zvýší napětí na kondenzátoru a je tedy třeba dimenzovat kapacitu na toto napětí. [20]

4.4.1.4. Zpětné vlivy kompenzace na kvalitu elektrické energie

Připojení kompenzačního zařízení má i svá úskalí v podobě rezonančních jevů, hrazení kmitočtu HDO a přechodných dějů způsobených zapínáním a vypínáním kondenzátorů.

Vzhledem k tomu, že v síti nn se vyskytují nehrazená kompenzační zařízení, dochází zde k rezonančním jevům. V případě připojení nelineárních spotřebičů, dochází vlivem paralelní rezonance k zesílení harmonických proudů, které tyto spotřebiče produkují. Tímto proudovým přetížením jsou pak zatěžovány další spotřebiče, transformátor, nadřazená síť i samotné kompenzační zařízení. Pro omezení rezonancí se používá již zmíněná hrazená kompenzace, tedy kondenzátor s předřazenou tlumivkou takové velikosti, aby byl dosažen rezonanční kmitočet nižší než rezonance napájecí sítě.

Dalším problémem, který je spojen právě s hrazenou kompenzací a rezonančními obvody, může být oslabení (filtrování) signálu HDO, který je v některých oblastech ČR vysílán podobným kmitočtem, jako je kmitočet využívaný v obvodech hrazené kompenzace. [20]

Při spínání kondenzátorů dochází k přechodným dějům. Při zapnutí kondenzátoru závisí proud na zkratových poměrech v síti, impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Proudové rázy mají negativní vliv na spínací zařízení, nejčastěji stykače, kdy se zvětšuje přechodný odpor při zapínání, který vede k přehřátí kontaktů a snižování životnosti stykače. Pro spínání kondenzátorů je tedy nutné použít vzduchovou omezovací tlumivku nebo odpor. Naopak při vypínání kondenzátorů náboj dosahuje amplitudy jmenovitého napětí a při vypínání může dojít na kontaktech k zapálení oblouku a následnému průrazu kondenzátoru. Proto se pro snížení náboje používají vybíjecí odpory. [20]



Obr. 8 - Hradící tlumivky [22]



4.4.2. Kompenzace jalové energie – praktická část

Na ČOV Benešov jsou hlavní spotřebiče jalové energie rozmístěny dispozičně rovnoměrně po celém areálu. Celkový jalový výkon, který je nutné kompenzovat na požadovanou hodnotu účinníku, je daný součtem příspěvků jednotlivých zařízení, které jsou výkonově na zhruba stejné úrovni. Žádný výrazně nepřevyšuje svým výkonem ostatní. Z těchto důvodů bude optimální použít centrální kompenzaci, umístěnou v hlavní rozvodně nn. Kompenzace bude vybavena automatickou regulací, kterou bude možné regulovat výkon a připojovat jednotlivé kondenzátory podle aktuální připojené zátěže s ohledem na požadovaný účinník.

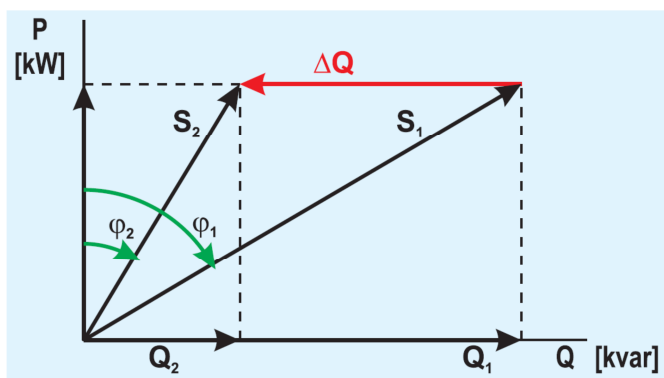
Pro návrh kompenzace použijeme hodnoty vypočítané z energetické bilance.

Výpočtové zatížení: $P_p = 391 \text{ kW}$

Účinník (průměrná hodnota spotřebičů, které jsou v chodu během maxima): $\cos\varphi = 0,85$

Požadovaný účinník v rámci technických podmínek připojení ČEZ distribuce, a.s. je pro odběr i výrobu stanoven $\cos\varphi = 0,95$ až 1.

Výpočet kompenzačního zařízení lze odvodit z následujícího fázorového diagramu.



Obr. 9 – Fázorový diagram zdánlivého výkonu S [23]

P - činný výkon [W]

Q - jalový výkon [VAR]

S - zdánlivý výkon [VA]

φ_1 - požadovaný fázový posun

φ_2 - skutečná fázový posun

ΔQ - požadovaný kompenzační výkon kondenzátoru [VAR]

Odvozené vztahy z goniometrických funkcí pro obrázek č. 9.

$$P = U \cdot I \cos\varphi \quad [4.4.2.1]$$

$$Q = U \cdot I \sin\varphi \quad [4.4.2.2]$$

$$S = U \cdot I \quad [4.4.2.3]$$



$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{Q} \quad [4.4.2.4]$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [4.4.2.5]$$

Požadovaný kompenzační výkon Q_C vypočteme z výše uvedených odvozených vztahů z obrázku xx:

$$\begin{aligned} Q_C = \Delta Q = Q_1 - Q_2 &= P \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - P \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 391000(0,62 - 0,33) \\ &= 113390 \text{ VAr} \end{aligned}$$

kde

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi = 0,85 \Rightarrow \varphi_1 = \arccos \varphi_1 = 31,79^\circ$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,62$$

$$\cos \varphi_2 = \text{požadovaný } \cos \varphi = 0,95 \Rightarrow \varphi_2 = \arccos \varphi_2 = 18,19^\circ$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,33$$

Z výkonu kondenzátoru Q_C , dopočteme kapacitu kondenzátoru C a jeho proud I_C :

$$Q_C = U \cdot I_C = U \cdot \frac{U}{X_C} = U \cdot \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U^2 \cdot \omega C \text{ [VAr]} \quad [4.4.2.6]$$

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \cdot \omega} = \frac{113390}{400^2 \cdot 2\pi f} = 2,26 \text{ mF}$$

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U} = 1,443 Q_C \text{ [A, kVAr]} = 163 \text{ A}$$

ω - úhlová rychlost

X_C - kapacitní reaktance [Ω]

C - kapacita kondenzátoru [F]

Vzhledem k vyššímu podílu nelineárních spotřebičů $< 20\%$ je třeba použít hrazenou kompenzaci, tedy kondenzátor s předřazenou tlumivkou takové velikosti, aby byl dosažen rezonanční kmitočet nižší než rezonance napájecí sítě. [20]

Uvedený výkon kompenzace je určen pouze pro kompenzování spotřebičů v rozvodu ČOV. Transformátor je tedy třeba kompenzovat zvlášť. Jeho celkový jalový výkon tvoří složka při chodu naprázdno a složka pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který roste s kvadrátem zatížení. Tuto část je třeba kompenzovat individuálním kondenzátorem připojeným na sekundární straně transformátoru na přívodu vstupního rozvaděče nn.

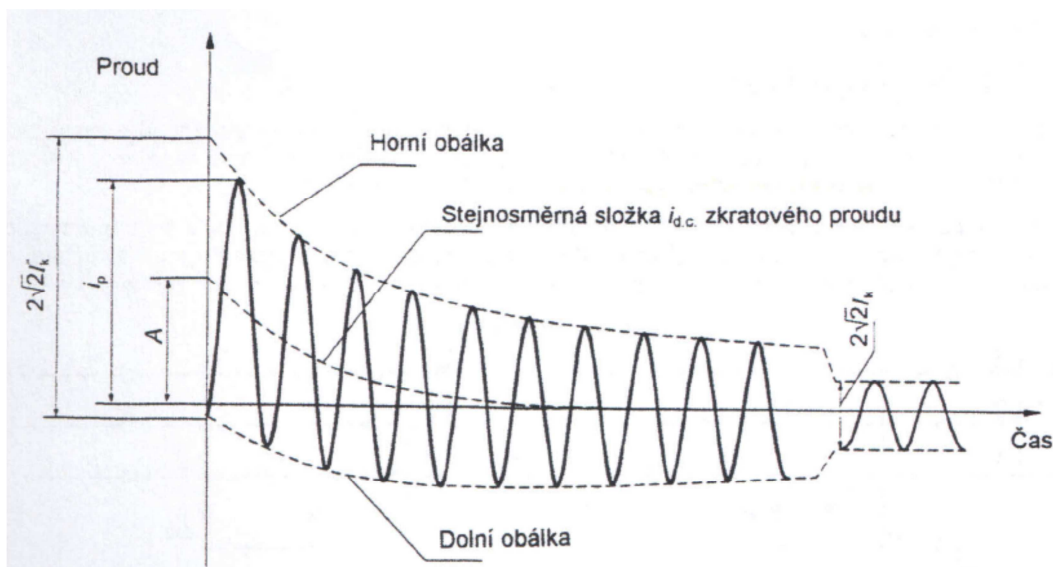
Pro zvolený transformátor 400kVA 22/0,4kV je $Q_C = 6,25 \text{ kVAr}$.



4.5. Výpočet zkratových proudů

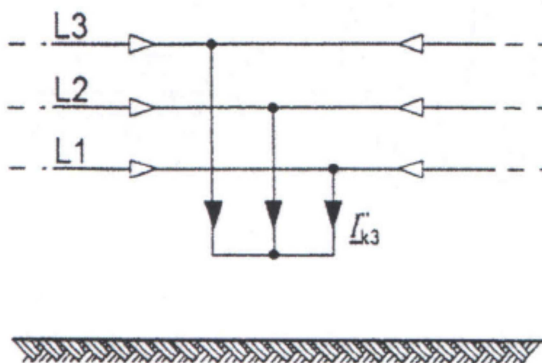
4.5.1. Výpočet zkratových proudů - teoretická část

Uvedené výpočty jsou provedeny impedanční metodou podle normy ČSN EN60909-0. Dále je uveden výpočet počátečního rázového zkratového proudu a nárazového zkratového proudu při souměrném trojfázovém zkratu.



Obr. 10 - Zkratový proud el. blízkého zkratu s klesající střídavou složkou [24]

- I''_k - počáteční souměrný rázový zkratový proud
- i_p - nárazový zkratový proud
- I_k - ustálený zkratový proud
- i_{dc} - stejnosměrná složka zkratového proudu
- A - počáteční hodnota stejnosměrné složky i_{dc}



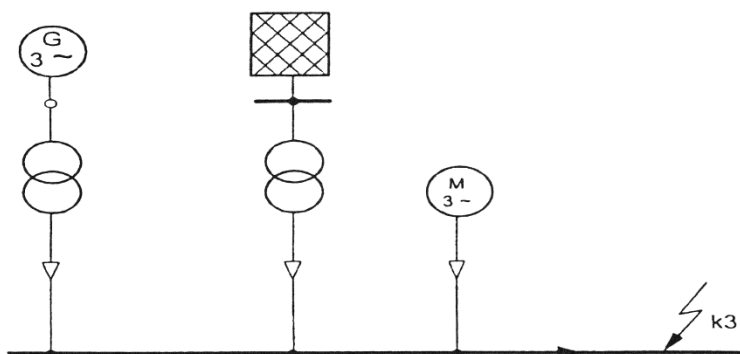
Obr. 11 - Souměrný trojfázový zkrat [24]



Všeobecné zásady pro výpočet

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu (tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým)
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel K_T pro impedance síťových transformátorů
- Impedance kabelového vedení je počítána při teplotě 20°C
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě
- Impedance jsou přepočteny na napěťovou hladinu, ve které je počítán zkrat. [24]

Hodnoty zkratového proudu určíme pro soustavu neuzavřenou s více zdroji, která odpovídá aplikacím ČOV (viz obrázek č. 12)



Obr. 12 – Příklad neuzavřené sítě [24]

Ekvivalentní impedance sítě a zkratové poměry napáječe:

Ve většině případů se počítají zkratové poměry při nové výstavbě, případně při rekonstrukci. V těchto případech výpočet vychází ze zkratového výkonu ve výchozím (napájecím) bodě – S_k (MVA). Hodnoty S_k vycházejí ze stávajících výpočtů a jsou postupně upravovány (výstavba nových zdrojů a přenosových linek). Hodnoty S_k pro rozvodny jsou normalizovány. [25]

$$I_k'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad [4.5.1.1]$$

S_k'' [VA]- počáteční souměrný rázový zkratový výkon

Počáteční souměrné rázové zkratové proudy $I_k''_{kQmax}$ a $I_k''_{kQmin}$ napáječe Q na straně vyššího napětí transformátoru musí udat provozovatel přenosové (distribuční) soustavy



nebo se musí určit příslušným výpočetním postupem podle zmíněné normy ČSN EN60909-0. Při orientačním výpočtu lze stanovit maximální předpokládanou hodnotu nebo stanovit zkratový proud pouze na základě zkratového výkonu transformátoru.

V takovém případě je výpočet méně přesný, nicméně pouze ve směru k větší bezpečnosti.

Tab. č. 5 – Typické hodnoty zkratového výkonu sítě vn a složky jeho impedance převedené na úroveň nn. [25]

S_k [MV× A]	R [mΩ]	X [mΩ]
125	0,20	1,40
250	0,10	0,70
500	0,00	0,35

Nejprve provedeme výpočet impedancí jednotlivých složek soustavy.

Ekvivalentní impedance sítě:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad [4.5.1.2]$$

- c – napěťový součinitel
 U_{nQ} [V] – jmenovité napětí sítě
 I''_{kQ} [A] – rázový zkratový proud sítě

Impedanci je možné spočítat také přímo z počátečního zkratového výkonu síťového napáječe ve spojovacím bodě Q:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \quad [4.5.1.3]$$

Napěťový součinitel je dle ČSN EN 60909-0 tabulka č.1. pro sítě o napětí 1 kV až 35 kV je $c_{\max} = 1,1$ a $c_{\min} = 1,0$. [24]

Komplexní impedance sítě přepočtená na napěťovou hladinu 0,4 kV.

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad [4.5.1.4]$$

Kde t_r je jmenovitý převod transformátoru, při kterém se přepínač odboček nachází v základní poloze:

$$t_r = \frac{U_{nQ}}{U_{Ts}} \quad [4.5.1.5]$$

U_{Ts} [V]- jmenovité napětí na sekundární straně transformátoru respektive napětí sítě v místě zkratu



V případě síťových napáječů 22kV, u kterých není známá rezistance sítě, lze podle ČSN EN 60909-0 uvažovat:

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad [4.5.1.6]$$

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad [4.5.1.7]$$

$R_Q [\Omega]$ – rezistance sítě

$X_Q [\Omega]$ – reaktance sítě

Impedance transformátoru:

Poměr R_T/X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je odpor tak malý, že je možné při výpočtu zkratového proudu předpokládat, že impedanci představuje pouze reaktance. Vztahy pro výpočet : [24]

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad [4.5.1.8]$$

$$R_T = \frac{P_k \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}^2} \quad [4.5.1.9]$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad [4.5.1.10]$$

$U_{rT} [V]$ – jmenovité napětí transformátoru na straně nižšího napětí

$I_{rT} [A]$ – jmenovitý proud na straně nižšího napětí

$S_{rT} [VA]$ – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

$P_{krT} [W]$ – jmenovité ztráty nakrátko transformátoru

$u_{kr} [\%]$ – jmenovité napětí nakrátko

Korekční součinitel pro impedanci síťových transformátorů.

Síťový transformátor spojuje dvě nebo více vinutí s rozdílným napětím. U dvouvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí navíc k impedancím zavést korekční součinitel K_T :

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_t} \quad [4.5.1.11]$$

$$x_t = \frac{X_t}{\left(\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}\right)} \quad [4.5.1.12]$$

Korigovaná komplexní impedance transformátoru

$$Z_{TK} = K_T \cdot (R_T + jX_t) \quad [4.5.1.13]$$



Impedance synchronního generátoru:

Při výpočtu souměrných rázových zkratových proudů v soustavě napájené přímo z generátorů bez použití blokového transformátoru počítáme korigovanou hodnotu impedance:

$$Z_{GK} = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad [4.5.1.14]$$

Kde

K_G - korekční součinitel a je definován dle vztahu [4.5.1.15]

R_G [Ω] - rezistance generátoru je definována dle ČSN EN60909-0:

$R_G = 0,15 \cdot X_d''$ pro generátory s $U_{rG} \leq 1 \text{ kV}$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad [4.5.1.15]$$

Kde:

x_d'' - poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}} = \frac{X_d''}{\frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}} \quad [4.5.1.16]$$

Z_{rG} [Ω] – impedance generátoru

U_{rG} [V] – jmenovité napětí generátoru

S_{rG} [VA] – zdánlivý výkon generátoru

Impedance vedení

Impedance kabelového vedení Z_L je počítána při teplotě 20°C:

$$Z_L = l \cdot (R_L + jX_L) \quad [4.5.1.17]$$

Kde hodnoty R_L, X_L na jednotku délky vezmeme z katalogu výrobce použitého vedení.

Příspěvek zkratových proudů AM

Tento příspěvek lze v soustavě nn pro výpočet zkratového proudu I_k'' zanedbat v případě, že platí: [24]

$$\sum I_{rM} \leq 0,1 I_{kM}'' \quad [4.5.1.18]$$

$\sum I_{rM}$ [A] - součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo (bez transformátorů) k síti kde se vyskytuje zkrat

I_{kM}'' [A] - počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů

V případě aplikace ČOV bývá tato podmínka splněna.



Výpočet I_k''

Z vypočtených impedancí je již možné dopočítat počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' příslušné větve v místě F (viz obrázek č. 13):

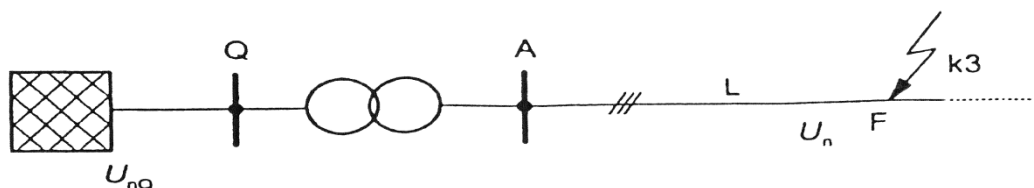
$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad [4.5.1.19]$$

$$R_k = R_{Qt} + R_{TK} + R_L \quad [4.5.1.20]$$

$$X_k = X_{Qt} + X_{TK} + X_L \quad [4.5.1.21]$$

R_k [Ω] – součet sériově zapojených rezistancí sousledné soustavy příslušné větve

X_k [Ω] – součet sériově zapojených reaktancí sousledné soustavy příslušné větve



Obr. 11 – Zkrat napájený ze síťového napáječe přes transformátor [24]

V případě nezauzlené sítě (viz Obr. 12) kde je více zdrojů, je výsledný proud v místě zkratu vektorovým součtem příspěvků z jednotlivých větví. [24] Z hlediska přesnosti je ovšem dostatečné určit výslednou hodnotu součtem absolutních hodnot jednotlivých příspěvků I_{ki}'' :

$$I_k'' = \sum I_{ki}'' \quad [4.5.1.22]$$

Dopočteme nárazový zkratový proud i_p .

Pro trojfázové zkraty v nezauzlených sítích je příspěvek nárazového zkratového proudu vyjádřen:

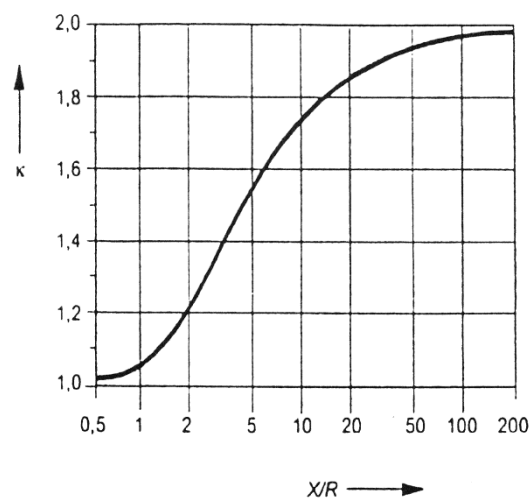
$$i_p = K \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad [4.5.1.23]$$

Součinitel K pro poměr R/X nebo X/R lze určit dle ČSN EN60909-0 z grafu (viz Obr. 14) nebo výpočtem podle vztahu:

$$K = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad [4.5.1.24]$$

Opět platí, že v případě více zdrojů je výsledný proud součtem příspěvků z jednotlivých větví i_{pi} :

$$i_p = \sum i_{pi} \quad [4.5.1.25]$$



Obr. 12 – Součinitel K pro sériové obvody jako funkce poměru X/R [24]



Proč počítáme zkratové proudy?

Při průchodu zkratového proudu vedením dochází k tepelným a mechanickým účinkům. Zkratové proudy a jištění chránící před jejich účinky musí být podle čl. 434.2 ČSN 33 2000-4-43 ed. 2 (až na některé výjimky) určeny pro každý obvod.[26]

Je však třeba určit nejen maximální zkratový proud, který může vzniknout při zkratu na začátku obvodu, ale i minimální zkratový proud při zkratu na koncích obvodů. V případě kontroly kabelového vedení s ohledem na zkrat se uvažuje maximální zkratový proud na začátku vedení a minimální zkratový proud (jednofázový zkrat) v místě trasy kde má zkratový obvod nejvyšší hodnotu impedance.

Maximální zkratový proud je třeba zjistit, aby se ověřilo, zda:

- ochranný přístroj spolehlivě zajistí odpojení obvodu
- není překročeno dovolené namáhání vodičů, a to zejména jejich tepelné namáhání v případě, že se použije jističů.

Minimální zkratový proud je třeba zjistit, aby se ověřilo, zda:

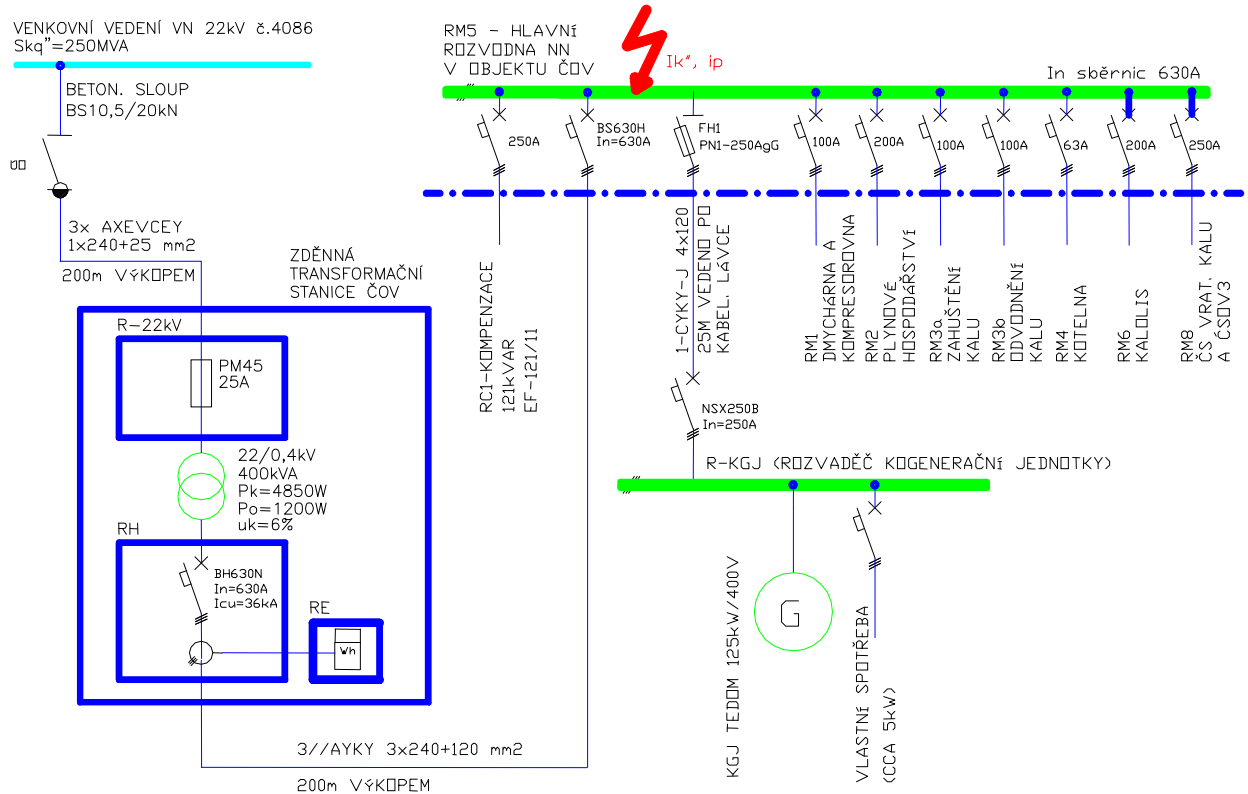
- je-li jako ochranný přístroj použit jistič, je schopen zajistit odpojení i při nejvzdálenějším zkratu,
- je-li jako ochranný přístroj použita pojistka, není překročeno dovolené tepelné namáhání vodičů. [25]

Dimenzování a ochrana elektrických zařízení s ohledem na stanovené hodnoty zkratových proudů jsou rozebrány v následujících kapitolách.



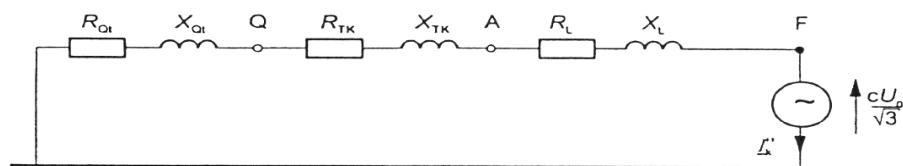
4.5.2. Výpočet zkratových proudů - praktická část

Výpočet zkratových proudů podle normy ČSN EN60909-0 na sběrnicích rozvaděče RM5 v hlavní rozvodně nn ČOV Benešov viz schéma zapojení (příloha č. 2).



Obr. 13 – Celkové schéma napájení ČOV Benešov

Nejprve vypočteme impedance jednotlivých složek a příspěvky zkratového proudu jednotlivých větví podle náhradního schématu (Obr. 16).



Obr. 14 – Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy [24]

Impedance síťového napáječe

Zadané parametry síťového napáječe v bodě Q:

$$S_{kQ}'' = 250\text{MVA}, U_{nQ} = 22\text{kV}$$

Impedance napáječe přepočtená na hodnotu napětí v místě zkratu 0,4 kV (napěťový součinitel stanoven dle ČSN EN 60909-0):

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{nQ}}{U_{Ts}}\right)^2} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,56 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{\left(\frac{22 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3}\right)^2} = 0,7 \text{ m}\Omega$$



Rezistance a reaktance sítě stanovená z poměrů stanovených dle ČSN EN 60909-0:

$$X_{Qt} = 0,995 \cdot Z_Q = 0,7 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,1 \cdot X_Q = 0,07 \text{ m}\Omega$$

Impedance transformátoru

Parametry zvoleného transformátoru SGB DTTH 400/20:

$$\text{napětí } vn/nn = 22/0,4\text{kV}, S_{rT} = 400 \text{ kVA}$$

$$P_k = 4850 \text{ W}, u_k = 6 \%$$

Výpočet impedance transformátoru podle vztahů uvedených v kapitole 4.5.1:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{400^2}{400 \cdot 10^3} = 0,024 \Omega$$

$$R_T = \frac{P_k \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = \frac{4850 \cdot 400^2}{(400 \cdot 10^3)^2} = 0,00485 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,024^2 - 0,00485^2} = 0,0236 \Omega$$

$$x_T = \frac{X_T}{\left(\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}\right)} = \frac{0,0236}{\frac{400^2}{400}} = 0,059$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_t}$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_t} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + (0,6 \cdot 0,059)} = 1,00927$$

Korigovaná komplexní impedance transformátoru

$$Z_{TK} = K_T \cdot (R_T + jX_T) = 1,00927(0,00485 + j0,0236) = 0,00489 + j0,0238 \Omega$$

Příspěvek asynchronních motorů

Příspěvek asynchronních motorů může být zanedbán vzhledem ke splnění podmínky

$$\sum I_{rM} \leq 0,1 I_{kM} \text{ dle ČSN EN 60909-0:}$$

$$450 \text{ A} \leq 986,1 \text{ A}$$

Kabelové vedení

Rezistance a reaktance kabelu 3//1-AYKY 240mm² uvedené výrobcem:

$$R_{LV} = 0,129 \Omega/\text{km}$$

$$X_{LV} = 0,073 \Omega/\text{km}$$

délka vedení $l = 200\text{m} = 0,2 \text{ km}$, 3 paralelní kabely V1, V2, V3:

$$Z_{V1} = Z_{V2} = Z_{V3} = 0,2 (R_{LV} + jX_{LV}) = 0,2 (0,129 + j0,073) = 0,0258 + j0,0146 \Omega$$

Celková impedance vedení:

$$R_L + jX_L = Z_{V1} \parallel Z_{V2} \parallel Z_{V3} = 0,0086 + j0,00486 \Omega$$



Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

$$R_K = R_{Qt} + R_{TK} + R_L = 0,00007 + 0,00489 + 0,0086 = 0,0135 \Omega$$

$$X_K = X_{Qt} + X_{TK} + X_L = 0,0007 + 0,0238 + 0,00486 = 0,02936 \Omega$$

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0135^2 + 0,02936^2}} = 7861,2 A$$

Nárazový zkratový proud i_p

Pro daný poměr $R/X = 0,46$ je z grafu odečtena hodnota součinitele $K = 1,27$

$$i_p = K\sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,27\sqrt{2} \cdot 7861,2 = 14119,1 = 14 kA$$

Příspěvek synchronního generátoru

Vybraná kogenerační jednotka Cento T120 bioplyn má příspěvek ke zkratovému proudu udanou výrobcem $I_{kKJ}'' < 2 kA$. Technické parametry KJ jsou uvedeny v příloze č. 3.

Konkrétní hodnotu příspěvku zkratového proudu získáme výpočtem:

$$Z_{GK} = K_G \cdot (R_G + jX_d'') = 1,04 (0,0194 + j0,129) = 0,02 + j0,134 \Omega$$

Dle ČSN EN60909-0 platí $R_g = 0,15$. X_d'' pro generátory s $U_{rG} \leq 1kV$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin\phi_{rG}} = \frac{400}{400} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,095 \cdot 0,6} = 1,04$$

Kde:

x_d'' - poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}} = \frac{X_d''}{\frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}} = \frac{0,129}{\frac{400^2}{124000}} = 0,095$$

$$I_{kKJ}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,02^2 + 0,134^2}} = 1875 A$$

Pro daný poměr $R/X = 0,15$ je z grafu odečtena hodnota součinitele $K = 1,6$

$$i_{pKJ} = K\sqrt{2} \cdot I_{kKJ}'' = 1,6\sqrt{2} \cdot 1875 = 14119,1 = 4243 A$$

Celkový zkratový proud včetně příspěvku generátoru:

Výsledné hodnoty zkratového proudu vypočteme sečtením příspěvků jednotlivých větví.

$$I_k'' = \sum I_{ki}'' = I_{k1}'' + I_{k2}'' = 7861 + 1875 = 9736 A$$

$$i_p = \sum i_{pi} = i_{p1} + i_{p2} = 14119 + 4243 = 18362 A$$

Uvedené výpočty byly provedeny pro místo zkratu v hlavní rozvodně nn. Další výpočty jsou provedeny ve výpočtovém programu SICHR (viz příloha č. 4).



4.6. Přípojka vn, měření, trafostanice

4.6.1. Přípojka vn, měření, trafostanice – teoretická část

S ohledem na požadovaný výkon je přípojka volena na příslušnou napěťovou hladinu. V oblasti městských čistíren se jedná řádově o stovky kW a jde tedy výhradně o připojení na úroveň vysokého napětí. Součástí této aplikace musí být vlastní trafostanice, jejíž dispoziční je vhodné řešit s ohledem na provedení přípojky. Hranicí vlastnictví vedení PDS končí obvykle na vstupu do vn části trafostanice v majetku odběratele. Provedení přípojky závisí především na provedení sítí vn v dané oblasti (kabelové nebo venkovní vedení), na situačním umístění odběrného zařízení a místa připojení (zastavěnost území, ochranné pásmo a věcná břemena), provedení trafostanice odběratele (stožárová, zděná). Dalším hlediskem při volbě přípojky respektive počtu přípojek, je stupeň zajištění dodávky elektřiny. Vzhledem k tomu že pro ČOV je požadovaný stupeň č. 3 (viz kapitola 4.2.1), tedy bez nutnosti zajištění, je napájení řešeno jednou přípojkou.

Obecná pravidla pro realizaci přípojky lze nalézt v dokumentu PPDS PŘÍLOHA 6 Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě. [27]

Venkovní přípojky

Standardní řešení připojení odběratele na úrovni vn se řeší

- přípojkou odbočující z kmenového vedení
- přípojkou odbočující z přípojnic rozvodny vn

V případě požadavku odběratele na vyšší stupeň zabezpečení napájení z vn se řeší:

- zasmyčkováním okružního vedení vn do odběratelské stanice
- dvěma nebo více přípojkami, připojenými na různá venkovní vedení vn, nebo různé transformovny 110kV/vn
- kombinací výše uvedených způsobů

Do každé přípojky musí být vložen vypínací prvek pro odpojení odběrného zařízení (transformovny) umístěný na trvale přístupném místě. Přípojka začíná odbočením z kmenového vedení vn a její součástí je i vypínací prvek. Končí kotevními izolátory na odběratelské stanici. [27]



Kabelové přípojky

Standardní řešení připojení odběratele na úrovni vn se řeší

- zasmyčkováním kabelového vedení do vstupního pole rozvodny vn (nejedná se o přípojku a hranici vlastnictví je dohodnuta individuálně)
- provedením jedné kabelové přípojky ven z elektrické stanice vn PDS. Přípojka začíná odbočením od přípojníc vn ve stanici PDS a končí kabelovými koncovkami v odběratelské stanici. [27]

Pro návrh přípojky je zásadní určení místa odběru. Toto místo stanoví PDS na základě žádosti o připojení. Pro řešenou aplikaci ČOV s energetickým využitím bioplynu je typickým příkladem instalace kogenerační jednotky, která vyrábí také elektrickou energii. Tato energie je určena pro vlastní spotřebu, nicméně v případě přebytků elektřiny, bude tato energie dodána do DS. V rámci žádosti o připojení je tedy nutné posuzovat ČOV jako výrobní a podat žádost o připojení rozvodny výrobní elektřiny k distribuční soustavě VN. Na základě této žádosti je vyhotovena Smlouva o připojení výrobní k distribuční soustavě, jejíž součástí jsou také Technické podmínky připojení (viz příloha č. 5). V rámci vyjádření PDS je stanoveno především místo připojení k DS a odběrné soustavě, technické údaje odběrného místa, povolený rozsah účinníku, podmínky připojení a v neposlední řadě způsob a provedení měření.

Měření elektrické energie

Způsob a provedení měření stanovuje vyhláška č.82/2011 Sb

Způsob měření:

- typ A – průběhové měření elektřiny s dálkovým denním přenosem údajů
- typ B – průběhové měření elektřiny s dálkovým jiným než denním přenosem údajů
- typ S - měření elektřiny s dálkovým přenosem údajů, mimo měření typu A a B
- typ C – ostatní (maloodběratelé)

Vzhledem k tomu že vyrobená elektřina může být dodávána zpět do distribuční sítě, je instalovaný elektroměr čtyřkvadrantní, tedy je schopen měřit nejen dodávanou ale i odebíranou energii.

S ohledem na běžné hodnoty rezervovaného příkonu městských ČOV je vyhláškou stanoveno, že měřením typu A musí být měřena elektřina v odběrných místech zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy s napětím od 1kV do 52kV včetně a s rezervovaným příkonem nad 250kW. Do 250kW včetně musí být umístěno alespoň měření typu B. Konkrétní typ měření pro danou aplikaci je však stanoven až na základě



technických podmínek připojení PDS, které jsou součástí smlouvy o připojení. Vzhledem k tomu, že v řešené aplikaci ČOV jde zároveň o výrobnou je nutné zohlednit další požadavky, které jsou stanoveny Připojovacími podmínkami pro výrobní elektřiny.

V souvislosti s měřením elektrické energie je stanoveno:

- výrobní od 30 kW do 100kW - přenos měření a signalizace na dispečink PDS není u těchto zdrojů požadován
- výrobní od 100kW včetně – na dispečink PDS musí být ze všech výroben zajištěn přenos měření a signalizace pomocí jednotky RTU. Tato jednotka je uvažována v majetku provozovatele. Přenos dat musí být realizován přes GSM/GPRS. [27]

Požadavky na řízení a signalizaci provozu KJ jsou podrobněji rozebrány v kapitole 4.9.

Ochrana transformátoru

Pojistky vn na primární straně transformátoru plní ochranu:

- při zkratu na primárních svorkách jistí vedení a omezuje poškození trafo
- při mezifázovém zkratu jistí vedení a omezuje destrukci trafo
- při zkratu na sekundárních svorkách jistí vinutí trafo před poškozením

Tyto pojistky neplní funkci ochrany transformátoru před přetížením, kterou zajišťuje jistící prvek na straně nn, který musí být selektivní s jištěním primární strany, tak aby nedocházelo k omezení při běžném provozním přetížení. [28]

Pro návrh jsou důležitá hlediska:

- dostatečná vypínací schopnost

Max. hodnota v sítích vn v ČR je 12,5kA.

- odolnost vůči záběrnému magnetizačnímu proudu trafo

Hodnota magnetizační proudu je uvažována jako hodnota $12 \times I_n$ po dobu 100ms.

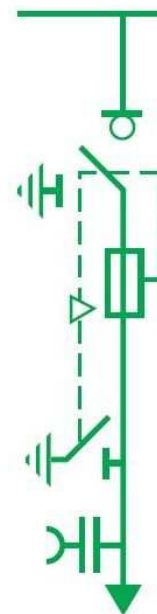
Z tavné ampérsekundové charakteristiky je třeba ověřit, že pojistka proud nevypne.

- včasné vypnutí zkratu na sekundárních svorkách

Podle ČSN EN 60076-5 musí pojistka do 2s odepnout zkratový proud na sekundárních svorkách. Z tavné ampérsekundové charakteristiky je potřeba ověřit, že pojistka tento proud vypne.

- vybavit nejnižší hodnoty zkratových proudů

vn pojistky mají omezenou schopnost vypínání nízkých hodnot nadproudů, které jsou pro provoz nežádoucí. Proto musí být zajištěno, že zkratový proud v místě transformátoru vyvine tak velký primární proud, aby pojistka vybavila.



Obr. 15 – Vývod vn pro TS
(odpínač s pojistkou) [30]



- selektivita s jištěním nízkonapěťové strany

Správně nastavená selektivní hodnota pojistky vn zajistí, že v případě zkratu na nn straně nedojde při vypnutí vývodního jističe zároveň k přetavení pojistky. To může způsobit nežádoucí přerušení dodávky nadřazeného celku. [28]

Jištění transformátoru na sekundární nn straně slouží k ochraně vedení a transformátoru proti přetížení. Proti zkratu je chráněn jen v případě vzniku zkratu za jističem směrem od transformátoru. Vedení od transformátoru nemusí být podle ČSN 33 2000-4-473 chráněno proti zkratu. Proti přetížení může být chráněno až na konci vedení v hlavním rozvaděči. Jištění na sekundární straně zohledňuje tyto požadavky:

- přetížení transformátoru
- nadproudová ochrana hl. rozvaděče nn a napájecího vedení od transformátoru
- ochrana automatickým odpojením od zdroje v případě poruchy
- selektivní vypnutí [29]

4.6.2. Přípojka vn, měření, trafostanice – praktická část

Na základě Technických podmínek připojení PDS ČEZ distribuce a.s. (příloha č. 5), je stanoveno místo připojení:

- kabelová síť vn č. 4086 vývod ELEKTRÁRNA – rozvaděč vn v TS zákazníka
- hranice vlastnictví: Zařízení PDS končí na kabelových koncovkách odpojovačů vn v TS č. BN_4896

Napěťová soustava:

- 3stř. 50Hz, 22kV / IT

Popis technického řešení části kabelového vedení vn:

Na stávající betonový stožár (BS 10,5/20kN) sítě vn 22kV č. 4086 bude osazen svislý odpínač. Pod odpínačem bude umístěna ocelová konzole s omezovači přepětí a venkovními kabelovými koncovkami. Na koncovky bude napojen kabel vn 3x AXEKVCEY 1x240/25mm², který bude veden kabelovým výkopem o délce 200m do areálu ČOV Benešov kde bude ukončen na kabelových koncovkách na odpojovači rozvaděče vn umístěného v trafostanici TS č. BN_4896.

Kabel vn bude uložen do výkopu na zhutnělé pískové lože o minimální tloušťce 100mm. Dno výkopu bude vytvořeno plynule podle příčného řezu uložení kabelu. Pro podsyp je možno použít písek o zrnitosti max. 20mm.

Kabel bude po celé délce uložen do kabelové chráničky DN175mm. Konce chráničky budou zajištěny proti vniknutí zeminy montážní pěnou.



Po instalaci kabelu se provede zásyp potrubí s následujícím zhutněním zeminy po stranách vedení a dále do minimální výšky 300mm nad horní okraj kabelu.

Při souběžích a křížení projektovaných vedení se stávajícími inženýrskými sítěmi bude dodržována ČSN 73 6005.

Ochrana před nebezpečným dotykem je řešena zemněním. U stožáru se svislým odpínačem bude provedeno strojené uzemnění páskem FeZn 30x4 mm 20m dlouhým uloženým ve výkopu. Hodnota uzemnění nesmí překročit hodnotu 7 Ω . Situační provedení přípojky je na celkové situaci ČOV v příloze č. 6.

Trafostanice:

Ve zděné trafostanici bude umístěn transformátor:

SGB, suchý, vzduchem chlazený, 400kVA, DTTH 400/20, IP23, Dyn1,
Po=1200W, Pk=4850kW, Uk=6%

Pojistky vn: pojistka PM45, 22/25kV, 25A na pojistkových spodcích s integrovanými svodiči přepětí

Rozvaděč vn: bezúdržbový zapouzdržený rozvaděč vn 25kV s plynovou izolací SF6

- 1.pole – odpínač pro přívod z distribuční soustavy,
- 2.pole – odpínač s pojistkami (vývod na transformátor)
- 3.pole – odpínač s pojistkami (vývod na transformátor/rezerva)

Schéma rozvodny R-22kV je uvedeno v příloze č. 13.

Rozvaděč NN: skříňový oceloplechový rozvaděč IP54/00, osazen hlavním jističem

BH630N-DTV3, In=630A, Ir=575A, Icu=36kA,

kompenzace transformátoru naprázdno kondenzátorem 6,25kVAr s pojistkou 25AgG

Příslušenstvím pro obchodní měření typu A (příprava pro osazení čtyřkvadrantového elektroměru): měřicí transformátory proudu 600/5 A, třída přesnosti 0,5S, S=max.10VA

Rozvaděč měření RE: rozvodnice s přípravou pro osazení čtyřkvadrantového elektroměru, pojistkový odpínač plombovatelný OPV10/3, PV10-2AgG, zkušební svorkovnice, nulový můstek (blokové schéma viz příloha č. 7).



4.7. Kabelový rozvod

4.7.1. Kabelový rozvod – teoretická část

Kabely dimenzujeme z hlediska proudové zatížitelnosti, zkratových proudů, úbytků napětí, mechanické pevnosti a hospodárnosti návrhu.

4.7.1.1. Proudová zatížitelnost

Jistící přístroj kabelu musí odpojit nadproud, který protéká vedením dříve, než se díky oteplení kabelu způsobí poškození izolace. V katalogích výrobců najdeme jmenovité hodnoty zatížitelnosti příslušných kabelů. Proud, který může trvale vodičem procházet, je volen s ohledem na jeho izolaci. Teplotní meze izolací jsou stanoveny normou ČSN 33 2000-5-52 ed.2. Pro nejpoužívanější druh kabelů s plastovou izolací je tato hodnota stanovena na 70°C. [31]

V katalogu jsou pro příslušný typ kabelu uvedeny údaje proudové zatížitelnosti pro uložení kabelu v zemi a na vzduchu. Tyto hodnoty jsou normou stanoveny pro teplotu okolí 20°C (země) a 30°C (vzduch) . V případě že jsou okolní teploty jiné, je třeba jmenovité hodnoty kabelu přepočítat příslušným koeficientem (B.52.14 - vzduch, B.52.15 - země). Dovolené proudové zatížení je dále třeba dimenzovat s ohledem na způsob uložení a seskupování více kabelů do společné trasy. Dovolené zatěžovací proudy jednotlivých uložení a různé přepočítávací součinitele jsou uvedeny v normě ČSN 33 2000-5-523 ed.2. [31]

4.7.1.2. Zkratové proudy

Při zkratu prochází vedením proud, který je několikanásobně vyšší, než je dovolená hodnota trvalého zatížení. Tento proud je daný impedancí obvodu. V případě kabelového vedení nás zajímají pouze tepelné účinky zkratu. Dynamické účinky je třeba zohlednit především u pevně instalovaných vodičů., např. sběrnice v rozvaděčích, kabelové lávky apod.

Tepelné účinky zkratu udává ekvivalentní (oteplovací) proud I_{ke} , který bývá v sítích nn zhruba 1,1 rázového zkratového proudu I_k'' . V případě kontroly kabelového vedení s ohledem na zkrat se uvažuje maximální zkratový proud na začátku vedení a minimální zkratový proud (jednofázový zkrat) v místě trasy kde má zkratový obvod nejvyšší hodnotu impedance. Stanovení vhodného průřezu kabelu s ohledem na oteplení při zkratu vypočteme ze vzorce:



$$A \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{k} \quad [4.7.1.2.1]$$

A - průřez kabelu

I_{ke} - ekvivalentní (oteplovací) zkratový proud ($1,1 \cdot I_k$)

I_k'' - rázový zkratový proud

t_k - doba, za kterou musí jističí prvek odpojit kabel od sítě

k - materiálová konstanta (zohledňuje konstrukci kabelu, druh izolace, apod..)

4.7.1.3. Úbytek napětí na kabelu

Vlivem impedance kabelu dochází na kabelu k úbytkům napětí. Norma stanovuje maximální povolené úbytky s ohledem na typ instalace. Pro motorové vývody je dovolený úbytek kabelu 5% vůči jmenovitému napětí. Pro běžné motorové instalace používáme kabelové vedení, kde je možné zanedbat indukivní reaktanci a počítat pouze s odporem kabelu:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [4.7.1.3.1]$$

l - délka kabelu

S - průřez kabelu

ρ - měrný odpor vodiče

Úbytek napětí při zanedbání úbytku vlivem indukivní reaktance vypočítáme podle Ohmova zákona:

$$\Delta U = R \cdot I \quad [4.7.1.3.2]$$

4.7.1.4. Mechanické namáhání a vnější vlivy

Norma ČSN 33 2000-5-52 ed.2. stanoví minimálně průřezy kabelů s ohledem na mechanické namáhání vodičů. Pro běžné kabelové vedení uložené v zemi nebo na kabelových konstrukcích je třeba zohlednit především dovolený poloměr ohybu vybraného kabelu s ohledem na trasu kabelu a způsob uložení.

Obecně musí mechanická pevnost kabelu odpovídat jeho možnému extrémnímu namáhání. Vnější vlivy, kterým musí kabel odolávat, jsou voleny v souladu s normou ČSN 33 2000 5-51 ed.3. Podle zvažovaných vnějších vlivů v místě instalace, je stanoveno prostředí, které přesně definuje mezní vlastnosti daného prostoru. [32]

S ohledem na aplikaci ČOV, je třeba zmínit především prostředí s vlivem přítomnosti vody (označení ADxx) a vysoké vlhkosti (ABxx). V těchto prostředích je normou ČSN 33



2000-5-52 ed.2 předepsáno, že vedení musí být zvoleno a zřízeno tak, aby nedošlo k žádnému poškození kondenzací vzdušné vlhkosti nebo vniknutím vody. V této souvislosti bývá např. kabel pro čerpadla z důvodu jeho utěsnění (v případě tzv. mokrých jímek) součástí dodávky strojního zařízení. Dalšími vlivy, které je třeba s ohledem na kabelové vedení posoudit je např. vítr, námraza, déšť, sluneční záření, přítomnost korozivních látek apod.

Kabelové vedení je třeba navrhnout v kombinaci s vhodným způsobem uložení a zvolené kabelové konstrukce. Způsob provedení kabelových tras má zásadní vliv na životnost vedení. Pro kabelové nosné a ochranné konstrukce jsou používány různé druhy chrániček, kabelových žlabů, ochranných trubek apod.

4.7.1.5. Požární bezpečnost, samozhášivost vedení

Norma ČSN 33 2000-5-52 ed.2 udává požadavky na kabelové vedení také s ohledem na požární bezpečnost. Kabely vyhovující IEC 60332-1-2 a výrobky zatříděné jako nešířící plamen mohou být instalovány bez zvláštních opatření. [31]

Samozhášivost respektive odolnost proti šíření plamene běžně používaných kabelů s plastovou izolací zmíněné požadavky splňuje. Při hoření těchto kabelů však dochází k úniku nebezpečných toxických látek, které ohrožují zdraví člověka a způsobují korozi kovů, takže mohou poškodit i nákladná technologická zařízení. Pro instalace kde je třeba těmto rizikům předejít (jsou dány vyhláškou 23/2008 Sb., např. zdravotnická zařízení, shromažďovací prostory apod.), je nutné použít kabely s nižším požárním rizikem. [33]

Jak už bylo řečeno, klasické kabely s pláštěm z PVC (např. CYKY) jsou v případě požáru nevyhovující, neboť PVC je vysoce toxický a korozivní materiál. Pro tento typ kabelů není vhodný ani polyetylen, který je sice bezhalogenový, nicméně není samozhášivý, tzn. rychle šíří plamen po svém povrchu (např. 1-AXKE, N2X2Y, apod.) Pro konstrukci kabelů s nízkým požárním rizikem se používají zejména retardované polymery, silikon a sklosílová páska. [34]

4.7.1.6. Hospodárnost návrhu

Nezanedbatelným hlediskem je ekonomická optimalizace průřezu silových kabelů. Cena kabelu je úměrná jeho průřezu. V dlouhodobém horizontu však mohou hrát (především u kabelů větších průřezů s vysokým vytížením) významnou roli i provozní náklady vedení. Provozní náklady jsou dány budoucími náklady na elektrické ztráty vedení. [35]



4.7.2. Kabelový rozvod – praktická část

Dimenzování vedení hlavní kabelové trasy z rozvaděče nn RH v trafostanici do hlavní rozvodny nn rozvaděče RM5 (viz Obr. 15 nebo příloha č. 2).

Kabelová trasa je vedena výkopem o délce cca 200m.

S ohledem na případné budoucí rozšíření technologie, je kabelové vedení dimenzováno na proudové zatížení odpovídající jmenovitému proudu na sekundární straně transformátoru $I_{2n} = 577A$. Tím je umožněno plné využití výkonu transformátoru.

4.7.2.1. Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost kabelu s izolací PVC pro provozní teploty $-25^{\circ}C$ až $+70^{\circ}C$ (stanoveny normou ČSN 33 2000-5-52 ed.2) typ 1-AYKY 3x140+120 je pro uložení v zemi výrobcem určena $I_z = 359A$.

Výchozí podmínky pro dané zatížení:

Teplota jádro/vzduch/země: $+70^{\circ}C/+70^{\circ}C/+20^{\circ}C$

Hloubka uložení: 0,7m

Měrný tepelný odpor země: 0,7 Km/W (vlhká půda)

Vzhledem k proudové zatížitelnosti je jeden kabel nedostačující a je nutné položit paralelně dva kabely. Výsledné dovolené zatížení $I_z = 2 \times 359 = 718 A$

Vzhledem k uložení dvou kabelů v souběhu je nutné započítat koeficient uspořádání seskupených obvodů $k = 0,75$ (podle normy ČSN 33 2000-5-523):

$$I_z = 0,75 \cdot 718 = 538,5 A$$

Vzhledem k tomu že $I_z < I_{2n}$ je zvolená varianta s ohledem na proudovou zatížitelnost nedostačující a je nutné položit trojici paralelních kabelů. Tím se nám ovšem sníží koeficient seskupených obvodů $k = 0,65$.

$$I_z = 0,65 \cdot (3 \times 359) = 700 A$$

Zvolený typ kabelů 3//1-AYKY 3x140+120 je s ohledem na požadované proudové zatížení již dostatečný.

4.7.2.2. Zkratový proud

Kontrola průřezu kabelu na zkratový proud pro daný čas odpojení od zdroje. Zároveň slouží i jako kontrola jistícího prvku proti zkratu:

$$A - \text{průřez kabelu } 3 \times 240 = 720\text{mm}^2$$



I_{ke} - ekvivalentní (oteplovací) zkratový proud (pro síť nn $\approx I_k''$) = 9861 A

I_k'' - rázový zkratový proud = 9861 A

t_k - doba, za kterou musí jističí prvek odpojit kabel od sítě = 5s

Podle ČSN 33 2000-4-41 ed. 2. pro ochranné opatření v sítích TN automatickým odpojením od zdroje pro koncové obvody do 32A s fázovým napětím 230V je to 0,4s, pro obvody nad 32A je to 5s

k - materiálová konstanta pro kabel AYKY = 76

Nejvyšší dovolená teplota jader vodičů nemá překročit teplotu stanovenou v tabulkách. Pro kabely AYKY, CYKY je to 170 °C. (ČSN 332000-4.45)

$$A \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{k}, \quad 720 \geq \frac{9861 \cdot \sqrt{5}}{76}, \quad 720 \geq 290$$

Průřez kabelu je s ohledem na zkratový proud dostatečný.

4.7.2.3. Úbytek napětí

Při zanedbání induktivní reaktance vypočteme odpor kabelu:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,028 \cdot 200}{720} = 0,008 \Omega$$

l - délka kabelu = 200 m

S - průřez kabelu = 3 x 240 mm²

ρ - měrný odpor vodiče = 0,028 $\mu\Omega \cdot m$

Pro srovnání dosadíme hodnoty impedance při výpočtu zkratových proudů impedanční metodou, které zahrnují také induktivní reaktanci vedení (viz kapitola 4.5):

$$R_L + jX_L = Z_{V1} \parallel Z_{V2} \parallel Z_{V3} = 0,0086 + j0,00486 \Omega$$

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + jX_L^2} = \sqrt{0,0086^2 + 0,00486^2} = 0,0098 \Omega$$

Úbytek napětí:

$$\Delta U = R \cdot I = 0,0098 \cdot 577 = 5,65 V \equiv 1,4\%$$

Tento úbytek napětí je povolený.



4.8. Motorový rozvod, jištění a spínání

4.8.1. Motorový rozvod, jištění a spínání – teoretická část

Elektromotor musíme ochránit proti nadměrnému oteplení, které by mohlo mít za následek zkrácení životnosti nebo jeho zničení. Norma ČSN EN 60204-1 říká že „Ochrana motorů proti nadměrnému oteplení musí být zajištěna pro každý motor o jmenovitém výkonu vyšším než 0,5kW. Podle toho jakým způsobem oteplení zjišťujeme, rozdělujeme ochrany na proudově závislé a proudově nezávislé. Proudově závislé ochrany vyhodnocují oteplení nepřímo podle hodnoty nadproudu protékajícím vedením. Do této skupiny patří známé ochranné prvky jako jistič a nadproudové relé. Do skupiny proudově nezávislých patří prvky, které vyhodnocují teplotu přímo, tedy jsou instalovány přímo do hlídání spotřebičů. Takovým přístrojem je například termistor umístěný ve vinutí motoru nebo teplotní spínač. Nejlépe je použít kombinaci obou ochran, poněvadž k přehřátí motoru může dojít nejen z důvodů nadproudu ale také např. poruchou chlazení (u externího chlazení), kdy dojde k přehřátí motoru aniž by jím procházel vyšší proud. [29]

Jistící prvek tedy odpojí chráněný obvod od sítě při nadproudech vyvolaných dlouhodobým přetěžováním nebo zkratem. Ochranu proti přetížení zajišťuje časově závislá (tepelná) nadproudová spoušť. Ochranu proti zkratu zajišťuje časově nezávislá (mžiková) spoušť. Hodnoty těchto spouští definuje vypínací charakteristika přístroje, což je závislost vypínacího proudu přístroje na čase.

U nadproudových spouští motorových spouštěčů a nadproudových relé je třeba zohlednit jejich třídu vybavení, která je definována normou ČSN 60947-4-1 ed.3. [36]

Jistící prvek chrání nejen samotný elektromotor, ale také kabelové vedení a spínací přístroj pohonu. Dimenzování těchto prvků tedy musí probíhat v koordinaci. Dalším hlediskem pro volbu jistícího prvku je jeho selektivita jištění a jeho zkratová odolnost. Mezní zkratová vypínací schopnost jistícího prvku musí být minimálně shodná s hodnotou předpokládaného rázového zkratového proudu v místě instalace. [29]

V neposlední řadě je třeba zkontrolovat jistící prvek s ohledem na použité ochranné opatření proti úrazu elektrickým proudem daným normou ČSN 33 2000-4-41 ed. 2. Nejčastěji používaným ochranným opatřením v sítích TN je ochrana automatickým odpojením od zdroje. Pro tento způsob ochrany je normou stanovený maximální čas, do kterého musí jistící prvek při poruše obvod odpojit od zdroje. Pro koncové obvody do 32A s fázo-



vým napětím 230V je to 0,4s, pro odvody nad 32A je to 5s. Charakteristika ochranného přístroje a impedance musí splňovat požadavek:

$$1,5 \cdot Z_S \cdot I_a \leq U_0$$

Z_S – impedance poruchové smyčky

(zahrnuje zdroj, vedení k poruše a ochranný vodič zpět ke zdroji)

I_a – vybavovací proud jističe v předepsané době podle ČSN

U_0 – jmenovité napětí vodiče vedení vůči zemi

1,5 – součinitel zahrnující nejnepříznivější podmínky při zkratu

Poruchový proud lze jednoduše spočítat podle impedance smyčky a z vypínací charakteristiky příslušného přístroje pak zbývá dohledat, jestli ochranný prvek tomuto požadavku vyhovuje. V případě, že tomuto nelze vyhovět, je nutné provést například ochranu doplňujícím pospojováním nebo použitím proudového chrániče. [11]

4.8.1.1. Jištění rozběhu přímým připojením k síti

Pro tento druh rozběhu je vhodným ochranným prvkem motorový spouštěč. To je jistič s nastavitelnou nadproudovou spouští, který má vypínací charakteristiku vhodně nastavenou právě pro rozběh motorů. Možností nastavení spouště na jmenovité hodnoty motoru v kombinaci s vhodnou vypínací charakteristikou docílíme velmi přesné ochrany motoru. Např. v porovnání s klasickými instalačními jističi používanými v běžných domácích instalacích je smluvený vypínací proud I_p motorových spouštěčů 1,2 násobek nastaveného (jmenovitého) proudu, oproti 1,45 násobku u běžných jističů. Ideálním řešením pro jištění větších výkonů jsou výkonové jističe, u kterých je možno nastavit redukováný proud v širokém rozsahu použití, ale také např. vypínací čas, kterým můžeme zvolit rozsah odpovídající příslušné třídě vybavení pro konkrétní rozběh. Jako spínací prvek se nejčastěji používá stykač, jeho pracovní proud I_e volíme pro kategorii užití AC-3 na hodnotu minimálně rovnou jmenovitému proudu motoru. [29]

Dalším hlídaným parametrem stykače (případně nadproudového relé) je jmenovitý podmíněný zkratový proud pro požadovaný typ koordinace, který by měl být větší nebo rovný předpokládanému zkratovému proudu v místě instalace. Vhodné kombinace jističích prvků, stykačů případně nadproudových relé s ohledem na požadovanou koordinaci udávají výrobci ve svých katalozích. [29]

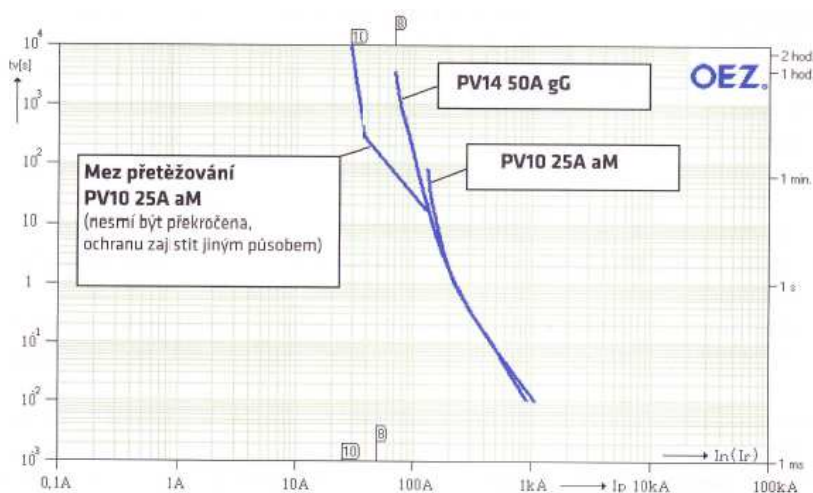
Typ koordinace je dán normou ČSN EN 60947-4-1 ed.3. Definuje podmínky znovuvvedení přístroje do provozu po zapůsobení zkratu. Pro koordinaci typu 1 je za určitých



podmínek povoleno poškození stykače nebo nadproudového relé. Tato koordinace je tedy určena pro instalace, kde je možné na nějaký čas (po dobu potřebnou k opravě) odstavit napájené zařízení mimo provoz. V případě koordinace typu 2 se připouští pouze lehký svár stykače nebo případná výměna pojistek. Uvedení zařízení do provozu je tedy velmi rychlé. [36]

Další použitelným jisticím prvkem je kombinace pojistky, stykače a nadproudového relé. V takovém případě slouží pojistka pouze jako ochrana před zkratem a může tedy být zvolena charakteristika pojistky gG i aM. Jmenovitá hodnota pojistky gG (chrání proti zkratu i proti přetížení), odpovídá pro lehký rozběh čerpadel zhruba o tři až 4 výkonové třídy výš, než je jmenovitá hodnota motoru. To je z důvodu vysokého záběrného proudu AM, při kterém je nežádoucí, aby pojistka motor vypnula. U pojistek aM (chrání pouze proti zkratu), můžeme volit pojistky se jmenovitou hodnotou rovnou jmenovité hodnotě motoru. Použitím pojistky aM tedy dosáhneme lepší citlivější ochrany s použitím menší a levnější pojistky, případně s menším pojistkovým odpínačem. Na Obr. 18 jsou znázorněny charakteristiky pojistek aM a gG s různými jmenovitými hodnotami určené pro jištění asynchronního motoru [29].

Jištění motorů samotnou pojistkou není příliš vhodné. Ochranu proti přetížení zaručují pouze pojistky gG, které ovšem vzhledem k záběrovému proudu volíme o několik tříd výše a ochrana tak nemusí být vždy zajištěna.



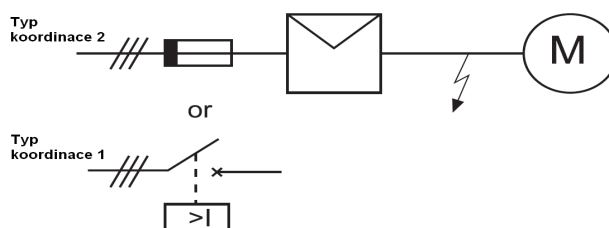
Obr. 18 – Vypínací charakteristiky pojistek aM a gG [29]

4.8.1.2. Jištění rozběhu přes softstartér

Softstartéry se pro pohon čerpadel, tedy pro lehký rozběh, dimenzují podle jmenovitého proudu motoru. Jisticí přístroj poté dimenzujeme podle výstupního proudu polovodičo-



vého měniče. Vzhledem k tomu, že softstartéry jsou poměrně drahá zařízení je v těchto aplikacích vhodné volit typ koordinace 2. Tedy zvolit takový jistící prvek, který při zkratu odepne obvod, aniž by došlo k poškození měniče. [9]



Obr. 19 – Typy koordinace pro jištění softstartéru (rychlou) polovodičovou pojistkou nebo motorovým spouštěčem [37]

Polovodiče jsou obecně náchylné k poškození při působení nadproudů. U polovodičových zařízení je pro výběr jistícího prvku zásadní údaj $I^2 \cdot t [A^2, s]$ stanovený výrobcem pro příslušné zařízení. Tato hodnota udává maximální zatížení polovodičových prvků. Jistící přístroj tedy volíme tak, aby uvedenou $I^2 \cdot t$ nepropustil. Jelikož jsou tyto hodnoty relativně nízké, není možno tato zařízení ochránit běžnými pojistkami. Pro takové účely jsou určeny polovodičové pojistky s charakteristikou gR nebo aR, které jsou velmi rychlé a při zkratových proudech dokážou polovodičové zařízení odpojit dříve, než dojde k jejich poškození. Hodnotu pojistky je nejlépe zvolit přímo podle doporučení výrobce polovodičového zařízení. Pojistky zajišťují především ochranu proti zkratu, většina polovodičových zařízení má totiž vlastní integrovanou elektronickou nadproudovou ochranu, která chrání nejen napájené zařízení, ale zároveň samotné polovodičové zařízení. Tyto ochrany, stejně jako klasická nadproudová relé, odpovídají příslušným třídám zatížení a softstartéry tedy volíme i s ohledem na náročnost rozběhu. [29]

U polovodičových pojistek je třeba dodržet průřez dopovídající jmenovité hodnotě pojistky. Při redukování tohoto průřezu totiž klesá jmenovitá hodnota příslušné pojistky. Při menším průřezu připojovacího vodiče neodvádí pojistka dostatečné množství tepla a přepálí se dříve, než je dáno její vypínací charakteristikou. [38]



4.8.2. Motorový rozvod, jištění a spínání – praktická část

Z rozvaděče RM8, který je umístěn v čerpací stanici vratného kalu ČSOV 3, je napájeno čerpadlo znečištěné odpadní vody ZO2.65:

$P_n = 4\text{kW}$, $U_n = 400\text{V}$, $I_n = 7,8\text{A}$, $I_z/I_n = 6,2$, $\eta = 85\%$, $\cos \varphi = 0,83$

Čerpadlo v suchém provedení je umístěno ve strojovně v 1. podzemním podlaží.

Proudově nezávislá ochrana teploty vinutí: bimetal ve vinutí motoru

Počáteční souměrný rázový zkratový proud na sběrnicích RM8 $I''_k = 3,77\text{kA}$

Odstředivé čerpadlo dané aplikace je uvažováno s lehkým rozběhem (třída vybavení 10).

Orientační výpočet **úbytku napětí při rozběhu** (při zanedbání impedance vedení a zkratového výkonu sítě):

$$S_{zkr} = \frac{100 \cdot S_{tr}}{u_k} = \frac{100 \cdot 400000}{6} = 6,6\text{MVA}$$

S_{zkr} – zkratový výkon sítě [VA]

S_{tr} – zdánlivý výkon transformátoru [VA]

u_k – napětí nakrátko transformátoru [%]

X_S – reaktance sítě [Ω]

Rovnici pro tuto reaktanci odvodíme z poměru impedancí sítě Z_S a motoru Z_M vůči zdánlivým výkonům jmenovitých hodnot motoru S_M a zkratového výkonu sítě S_{zkr} .

$$\frac{Z_S}{Z_M} = \frac{S_M}{S_{zkr}}; \quad X_S \approx Z_S = \frac{S_M}{S_{zkr}} \cdot Z_M = \frac{U_n^2}{S_{zkr}} = \frac{400^2}{6,6 \cdot 10^6} = 0,023\Omega$$

X_{kM} – reaktance motoru nakrátko [Ω]

Reaktanci motoru v momentě připojení vypočteme ze známého záběrového proudu motoru při jmenovitém napětí motoru.

$$X_{kM} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_z} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 6,2 \cdot 7,8} = 4,8\Omega \quad \frac{U_M}{U_n} = \frac{X_{kM}}{X_S + X_{kM}} = \frac{4,8}{0,023 + 4,8} = 0,995$$

Výsledný úbytek způsobený rozběhem motoru je zanedbatelný, povolený úbytek daný normou ČSN je 10%. Motor lze spouštět přímým připojením na síť.

Ochrana proti přetížení a zkratu je zajištěna spouštěčem motoru (jistič):

Např. typ SM1E-10, redukovaný proud I_r nastaven na jmenovitou hodnotu motoru $I_{nM} = 7,8\text{A}$, zkratová (časově nezávislá) spoušť = $13 I_n$, jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost $I_{cu} = 6\text{kA}$.

Splněny podmínky: $I_r \geq I_{nM}$, $I_{cu} \geq I''_k$,

Spínací prvek: stykač např. typ LC1D12P7, jmenovitý pracovní proud $I_e = 12\text{A}$ (pro kategorii užití AC3), jmenovitý podmíněný zkratový proud stykače $I_{qss} = 50\text{kA}$



Splněny podmínky: $I_e \geq I_{nM}$, $I_{qss} \geq I_p = I_k''$

Kontrola jistění s ohledem **ochranného opatření proti úrazu elektrickým proudem** daným normou ČSN 33 2000-4-41 ed. 2. v sítích TN - ochrana automatickým odpojením od zdroje. Pro koncové obvody do 32A s fázovým napětím 230V je čas vybavení 0,4s,

Charakteristika ochranného přístroje a impedance musí splňovat požadavek:

$$1,5 \cdot Z_S \cdot I_a \leq U_0$$

Z_S – impedance poruchové smyčky

(zahrnuje zdroj, vedení k poruše a ochranný vodič zpět ke zdroji)

I_a – vybavovací proud jističe v předepsané době podle ČSN (0,4s) = $12 \times I_n = 93,6A$

U_0 – jmenovité napětí vodiče vedení vůči zemi = 230V

1,5 – součinitel zahrnující nejnepříznivější podmínky při zkratu

Rezistance a reaktance sítě stanovená z poměrů stanovených dle ČSN EN 60909-0:

$$X_{Qt} = 0,7 \text{ m}\Omega, R_{Qt} = 0,07 \text{ m}\Omega$$

Korigovaná komplexní impedance transformátoru

$$Z_{TK} = 0,00489 + j0,0238 \Omega$$

Kabelové vedení WL1: 3//1-AYKY 3x240mm², délka vedení l = 0,2 km

$$R_{LV} = 0,129 \Omega/\text{km}, X_{LV} = 0,073 \Omega/\text{km}$$

3 paralelní kabely V1, V2, V3:

$$Z_{V1} = Z_{V2} = Z_{V3} = 0,2 (R_{LV} + X_{LV}) = 0,2 (0,129 + j0,073) = 0,0258 + j0,0146 \Omega$$

$$R_{LW1} + jX_{LW1} = Z_{V1} \parallel Z_{V2} \parallel Z_{V3} = 0,0086 + j0,00486 \Omega$$

Kabelové vedení WL2: 1-CYKY 3x120+70mm², délka vedení l = 0,18 km

$$R_{LW2} = 0,156 \Omega/\text{km} (120\text{mm}^2) \times l = 0,028 \Omega$$

$$R_{LW2PEN} = 0,269 \Omega/\text{km} (70\text{mm}^2) \times l = 0,048 \Omega$$

$$X_{LW2} = 0,08 \Omega/\text{km} (70, 120\text{mm}^2) \times l = 0,014 \Omega$$

Kabelové vedení WL3: CYKY 4x2,5mm², délka vedení l = 0,02 km

$$R_{LW3} = 7,4 \Omega/\text{km} \times l = 0,148 \Omega$$

$$X_{LW3} = 0,1 \Omega/\text{km} \times l = 0,002 \Omega$$



Celková impedance smyčky:

$$Z_s = \sqrt{(R_{Qt} + R_{TK} + 2 \cdot R_{LW1} + R_{LW2} + R_{LW2PEN} + R_{LW3})^2 + (X_{Qt} + X_{TK} + 2(X_{LW1} + X_{LW2} + X_{LW3}))^2} =$$
$$\sqrt{(0,00007 + 0,0049 + 2 \cdot 0,0086 + 0,028 + 0,048 + 0,148)^2 + ((0,0007 + 0,023 + 2(0,0048 + 0,014 + 0,002))^2)} = 0,368 \Omega$$

$$1,5 \cdot Z_s \cdot I_a \leq U_o$$

$$1,5 \cdot 0,368 \cdot 93,6 \leq 230$$

$$51,6 \leq 230$$

Podmínka pro vybavení jističe ve stanoveném čase s ohledem na impedanci smyčky splněna.

Schéma zapojení uvedeného obvodu s navrženými prvky je vykreslen v CEA systému EPLAN Electric P8 v příloze č. 8. Jako hlavní ochranný prvek je zvolen „inteligentní“ spouštěč motoru Tesys Ultima, který splňuje požadované technické parametry uvedené v této kapitole a navíc disponuje integrovanými řídicími funkcemi. Tento prvek je možné ovládat prostřednictvím komunikačního modulu přímo z řídicího systému ČOV. Tím je umožněno plynule regulovat (připojovat/odpojovat) zátěž čistírny. To je vyžadováno především při výpadku DS a napájení v nouzovém režimu z generátoru KJ. Součástí jednotky spouštěče je také spínací prvek, který umožňuje ovládat vývod také ručně pomocí deblokační skříně umístěné v blízkosti čerpadla. Ruční ovládání je provedeno pro případ výpadku ŘIS a pro možnost zkoušení nebo servisu zařízení.

Další výpočty s ohledem na dimenzování kabelové vedení jsou uvedeny v kapitole 4.7 a pro tento vývod jsou zároveň doloženy v rámci výpočtového programu SICHR v příloze č. 4.

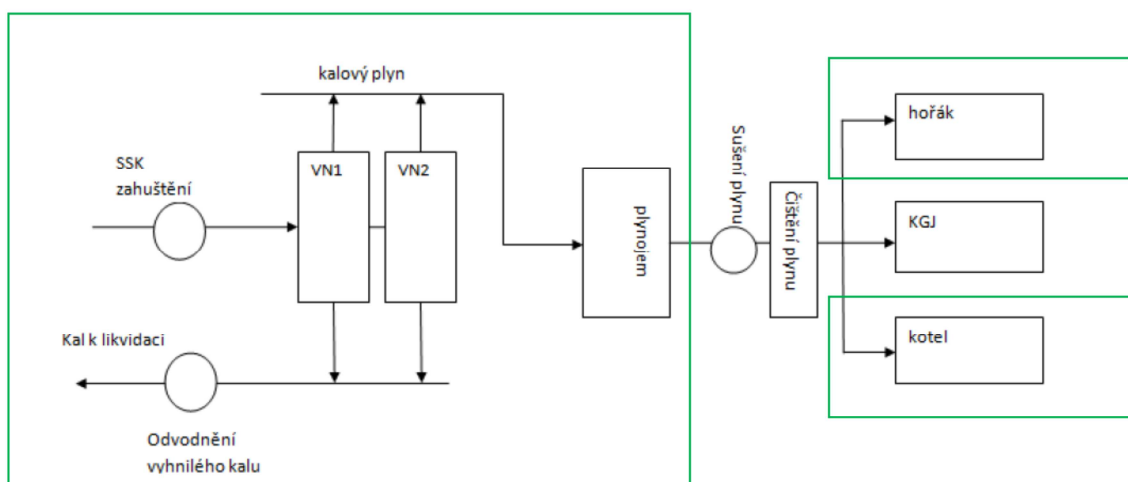


4.9. Kogenerační jednotka

4.9.1. Kogenerační jednotka – teoretická část

Na čistírnách odpadních vod vzniká jako vedlejší produkt anaerobního procesu kalový plyn. Procesy kalového hospodářství jsou určeny primárně k úpravě a hygienickému zabezpečení kalů a především k eliminaci jejich objemu. Vzniklý kalový plyn je tedy pouze a výhradně vedlejším produktem této činnosti a vznikal by i bez jeho následného využití. Standardním způsobem „likvidace“ tohoto plynu bylo jeho spalování v bioplynových kotlích nebo na hořácích zbytkového plynu. To byla zhruba před 15 lety běžná praxe většiny ČOV.

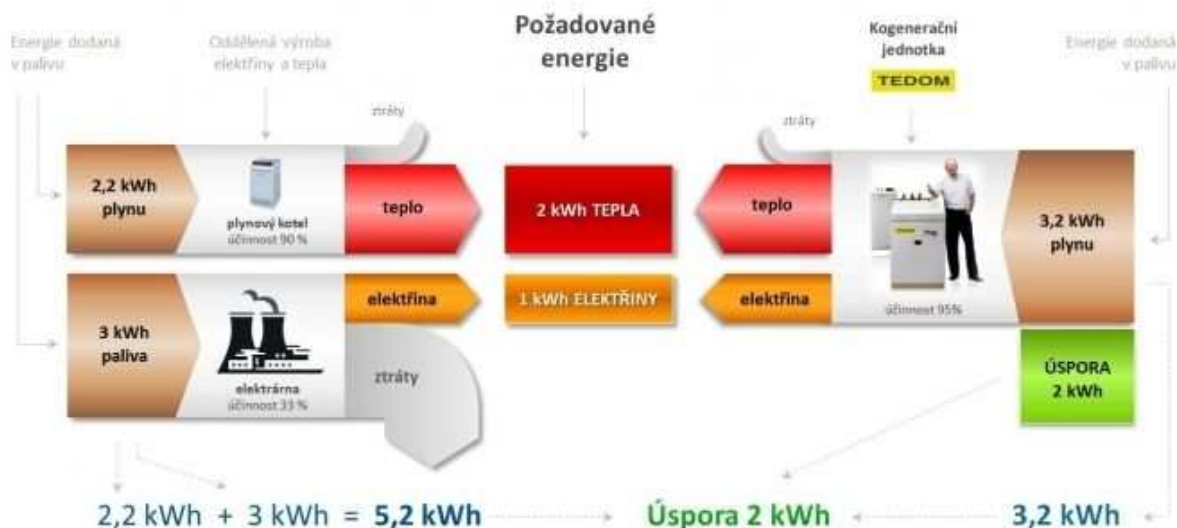
Schéma kalového a plynového hospodářství ČOV je uvedeno na obrázku č. 20. V zelených rámečcích jsou označeny technologické celky, které by byly na ČOV přítomny i bez případného využívání plynu a výroby elektrické energie. [39]



Obr. 20 – Schéma kalového a plynového hospodářství [39]

Pro efektivní energetické využití kalového plynu je ideálním řešením nasazení kogenerační technologie. Při kogeneraci, tedy společné výrobě tepla a elektřiny, dochází k vysokému využití energie v palivu, které může dosáhnout účinnosti až 95%. Tím se šetří palivo i finanční prostředky potřebné pro jeho nákup (viz Obr. 20). V případě ČOV je úspora ještě výraznější, protože jako palivo jednotky je využit odpadní produkt. [40]

Základní požadavek na použití kogenerace je především využití veškerého vyrobeného tepla. V ČOV lze teplo využít pro technologický proces, ohřev vody i vytápění příslušných objektů ČOV.



Obr. 21 – Úspora energie pomocí kogenerace [40]

Provoz kogenerace je nepřetržitý a výkon kogenerační jednotky se řídí podle aktuálního množství plynu. Množství vyprodukovaného plynu respektive provoz vyhnívacích nádrží je řízen na základě technologických potřeb souvisejících s hygienickým zabezpečením kalu a eliminací jeho objemu. Řízeno je míchání nádrží, hustoty biomasy v nich, redukce organické hmoty zajišťující hlubší rozklad apod. [39]

Při vyhodnocení energetických úspor je nutné posoudit také vlastní spotřebu, která souvisí s doplněním kogenerační technologie. Z obrázku č. 20 je zřejmé, že pro možnost instalace kogenerační jednotky je nutné doplnit pouze zařízení pro sušení a čištění bioplynu. Veškeré další zařízení je nutné pro chod kalového hospodářství i v případě, že není KJ instalována. [39] Vlastní spotřebu KJ pak tedy tvoří pouze:

- Spotřeba elektrické energie na úpravu plynu (sušení, čištění)
- Osvětlení budov souvisejících s úpravou plynu a výrobou energie v KJ (je-li samostatné)
- Startovací proud KJ
- Doběhový proud KJ

Elektrická část kogeneračních jednotek je složena z těchto částí:

- generátor
- rozvaděč kogenerační jednotky
- spotřebič a regulátory umístěné pod kapotou KJ (čerpadla, ventilátory, atd.)
- spotřebiče umístěné v navazujících technologických systémech (čerpadlo sekundárního okruhu, ventilátor chlazení plnicí směsí, atd.), které jsou z rozvaděče KJ napájeny a ovládány



- Čidla a snímače umístěná buď pod kapotou KJ, nebo v navazujících technologických systémech [41]

Z hlediska spolupráce s veřejnou sítí jsou možné tři základní druhy provozu KJ a jejich vzájemné kombinace:

- paralelní provoz se sítí

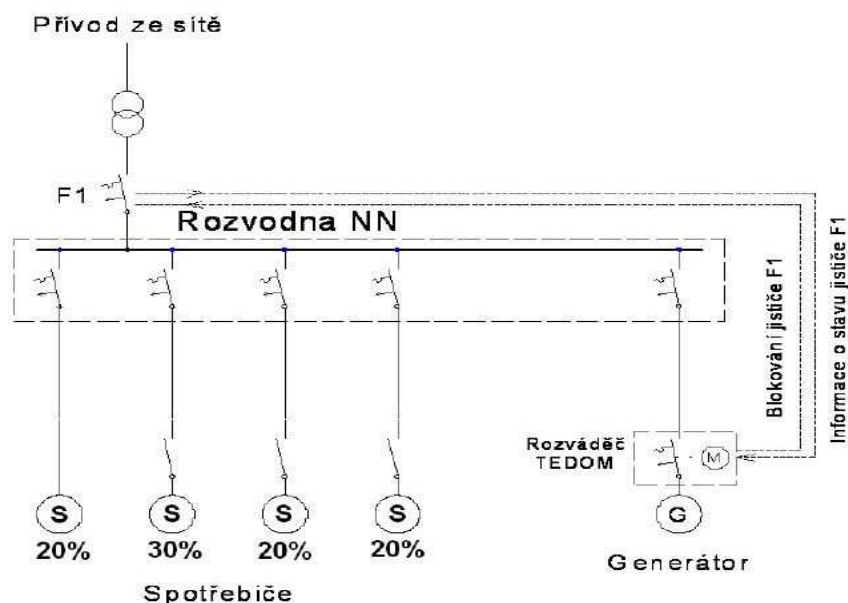
Při tomto provozu pracuje KJ paralelně se sítí a veškeré energie nebo pouze případné přebytky dodává do sítě. V tomto provozu je možné soustrojí nastavit také tak, že provozovatel neodebírá ze sítě ani do rozvodné sítě energii nedodává.

- ostrovní provoz

V ostrovním režimu pracuje jednotka zcela autonomně bez připojení na veřejnou rozvodnou síť. KJ je tedy jediným zdrojem elektrické energie.

- nouzový provoz

V nouzovém provozu plní jednotka funkci záložního zdroje. Řídicí systém kogenerační jednotky při tomto druhu provozu ovládá dva silové spínací prvky. Jedním se připojuje generátor do rozvodny a druhý slouží pro spojení rozvodny se sítí. [41]



Obr. 22 – Provoz KJ v kombinaci paralelního a nouzového režimu [41]

O způsobu provozu je třeba rozhodnout také s ohledem na aktuální podporu jednotlivých zdrojů. Podporu pro podporované zdroje energie stanovuje Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu. Tímto cenovým rozhodnutím ERU stanovuje výkupní ceny a zelené bonusy. V dokumentu č. 4/2013 ze dne 27 listopadu 2013 je uvedeno že od 1.1.2014 je mimo jiné zastavena provozní podpora pro výrobní elektřiny spalujících



kalový plyn z ČOV. [42] Podporované zdroje energie jsou definovány v zákoně č. 165/2012 Sb. O podporovaných zdrojích energie [43]

S ohledem na technické parametry připojení a provozování KJ je třeba kromě příslušných norem ČSN týkajících se elektrického rozvodu zohlednit také další dokumenty, které vydává ERU nebo příslušný PDS:

- Pravidla provozování distribučních soustav Příloha 4 – Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy (ERU). [44]

Zde jsou vypsány veškeré potřebné legislativní kroky pro přihlášení a uvedení výroby do provozu, stanoven rozsah projektové dokumentace, dány podmínky pro připojení, popsány vzorové struktury rozvodu s popisem spínacích prvků, požadované ochrany, zpětné vlivy na napájecí síť, atd.

- Provozní instrukce – Požadavky na zařízení pro regulaci a ovládání výroben z obnovitelných zdrojů energie připojovaných do distribuční soustavy ČEZ Distribuce, a.s.

Zde jsou uvedeny požadavky na regulaci a ovládání výroby včetně způsobu provedení, popis jednotek RTU a HDO, soupisu signálů přenášených na dispečink PDS a vzorová schémata zapojení. [45]

- Připojovací podmínky pro výroby elektřiny pro připojení na síť ČEZ Distribuce, a.s.

Zde jsou uvedeny především obecné požadavky regulace na výrobu podle jejich výkonu a další technické podmínky pro připojení výroben. [46]

- Technické podmínky připojení k žádosti o připojení výroby

V tomto dokumentu jsou již uvedeny konkrétní technické podmínky pro připojení konkrétní výroby (viz příloha č. 5). Především je zde uvedeno místo připojení, technické údaje předávacího místa, povolený rozsah účinníku, provedení měření, požadovaný způsob regulace a připojení výroby.

Na začátku návrhu je podána Žádost o připojení výroby na příslušného PDS. Na základě této žádosti navrhne PDS smlouvu o připojení a vydá technické podmínky připojení, které je nutné zohlednit v návrhu.

Pro uvedení výroby do provozu je podána Žádost o první paralelní připojení výroby do sítě, jejíž součástí je již skutečné provedení schválené dokumentace, výchozí revize elektrického zařízení a potvrzení firmy realizující výstavbu výroby, že vlastní výroba je provedena v souladu se stanovenými podmínkami.



4.9.2. Kogenerační jednotka – praktická část

Specifikace zařízení

- bioplynová výrobní
- číslo místa spotřeby: 0001884289
- číslo odběrného místa: 0101788372

Místo připojení

- kabelová síť vn č. 4086 vývod ELEKTRÁRNA – rozvaděč vn v TS zákazníka
- hranice vlastnictví: Zařízení PDS končí na kabelových koncovkách odpojovačů vn v TS č. BN_4896

Technické údaje odběrného/předávacího místa

- napěťová hladina: 22kV (VN)
- rezervovaný příkon (ČOV): 300kW
- celkový instalovaný výkon KJ: 125kW

Instalované výrobní zařízení

- kogenerační jednotka CENTO T 120 firmy Tedom osazená synchronním generátorem
- typ: Bioplynová - CBL
- povolený rozsah účinníku 0,95 až 1

Kogenerační jednotka

Vybraná elektrická zařízení nutná pro zajištění minimálního chodu ČOV budou napájená v 2. stupni zabezpečení dodávky elektrické energie. Zálohované napájení bude zajištěno z nově instalované kogenerační jednotky Tedom Cento T 120 SP BIO o jmenovitém výkonu 125kW (viz příloha č. 3). Vybrané spotřebiče určené pro minimální chod jsou stanoveny provozovatelem ČOV. V případě výpadku sítě, budou řídicím systémem ČOV odpojeny spotřebiče od sítě a budou ponechána pouze vybraná zařízení pro zajištění minimálního chodu.

Popis provozu, ovládání a signalizace

Kogenerační jednotka bude v návaznosti na veřejnou síť provozována v kombinovaném režimu paralelního a nouzového provozu. Tento druh provozu je dodavatelem KJ firmou Tedom označován jako P+E. Schéma zapojení KJ je uvedeno v příloze č. 7. V rámci smlouvy o připojení výrobní k distribuční soustavě jde o způsob provozu „přebytky do distribuční soustavy“, nicméně s ohledem na výkon výrobní a předpokládaný výkon provozu ČOV nejsou přebytky do sítě uvažovány.



Paralelní provoz – přítomnost napětí v síti

Při paralelním provozu dojde po povelu na start jednotky k nastartování motoru a po dosažení nominálních otáček je zahájeno automatické fázování generátoru na síť. Povel start vychází z řídicího systému KJ, který vyhodnocuje napětí sítě měřené před jističem hlavního rozvaděče RM5. Podle požadavku PDS se výroba může automaticky připojit k distribuční soustavě nejdříve v okamžiku, kdy napětí v distribuční soustavě bylo v předchozích 20 minutách bez přerušení v hodnotách uvedených ve vztahu ke jmenovitému napětí v pravidlech provozování distribučních soustav, nebo kdy napětí v DS bylo minimálně 5 minut bez přerušení v hodnotách odpovídajících napětí sítě s gradientem nárůstu výkonu 10% P_n/min. V okamžiku splnění všech podmínek pro fázování následuje připojení generátoru k síti respektive sepnutí stykače generátoru. To bývá obvykle do 90s od povelu start. Následuje ohřev jednotky na malý výkon, který trvá cca 1 minutu a poté začne po dobu asi 2 minut najíždět na plný výkon. Plného výkonu (100%) je tedy jednotka schopna dosáhnout po uplynutí doby přibližně 4,5 minut. Dále pak jednotka pracuje paralelně se sítí. Může pracovat na zadané hodnotě elektrického výkonu a vyrobená elektrická energie je dodávána do sítě. Veškerá energie bude v normálním provozu spotřebovávána v rámci spotřeby ČOV. Přebytky do sítě nejsou vzhledem k současnému výkonu ČOV a výkonu generátoru KJ uvažovány, nicméně obchodní měření spotřeby elektrické energie ČOV bude realizováno čtyřkvadrantním elektroměrem s možností měření dodávek energie do DS (viz příloha č. 7).

Nouzový provoz – výpadek sítě

Pracuje-li jednotka paralelně se sítí a dojde k výpadku sítě, odpadne automaticky jistič sítě (hlavní jistič rozvodny NN v rozvaděči RM5), který odpojí veškeré spotřebiče ČOV a výrobu od DS. Povel na odpojení jističe sítě vychází z řídicího systému KJ, který vyhodnocuje napětí sítě měřené před jističem hlavního rozvaděče RM5. Z rozvaděče KJ je kabelem napojeno ovládání motorového pohonu jističe sítě (příloha č. 9 a č. 10). Zároveň dojde k odpojení vybraných spotřebičů ČOV pro snížení zátěže na požadované parametry generátoru KJ. V okamžiku připojení bude na rozvodnu připojeno pouze základní malé zatížení, maximálně 20% nominálního výkonu KJ a zároveň nesmí být překročen nárazový proud 200% jmenovitého proudu KJ po dobu řádově 0,2s. Odpojení vybraných spotřebičů je realizováno komunikací ethernet MODBUS TCP/IP mezi ŘIS KJ a ŘIS ČOV. Jednotlivé spotřebiče jsou z ŘIS ČOV odpojovány pomocí regulovatelných výkonových modulů Tesys (CANopen), frekvenčních měničů a softstartérů (MODBUS) nebo



přímými povely binárních výstupů pro vypínače strojních technologických zařízení (bale-
né jednotky). Jednotka převezme bez přerušení dodávky elektrické energie zátěž ČOV.
Z tohoto důvodu je požadován reakční čas jističe sítě kratší než 100ms pro sepnutí i ro-
zepnutí, které je zajištěno použitím motorového pohonu jističe BH630N.

Po připojení minimální zátěže budou připojovány další spotřebiče ve třech krocích 30%,
20%, 20% s časovým odstupem minimálně 15 s tak, aby nedošlo k nárazovému překro-
čení jmenovitého proudu KJ o více než 100%. Součet maximální zátěže včetně vlastní
spotřeby nesmí překročit 90% jmenovitého výkonu KJ. Od automatického startu je jed-
notka schopna dodávat elektrickou energii pro základní malé zatížení do 60 s.

Během nouzového režimu je stykač generátoru blokován proti sepnutí jističe sítě
(RM5), pomocí kabelového propoje rozvaděče KJ na napěťovou cívku jističe sítě (RM5)
viz příloha č. 9 a č. 10.

Po obnovení sítě proběhne proces zpětného připojení na síť bez odpojení záloho-
vaných spotřebičů, po jehož ukončení zůstává jednotka v provozu a pracuje dále paralel-
ně se sítí, tak jako před výpadkem sítě.

Soupis signálů rozvaděče kogenerace

SIGNÁLY R-KGJ/RTU:

měření:

napětí na svorkách generátoru

proud na svorkách generátoru (MTP)

výstup - beznapěťový kontakt na X4:

stykač generátoru ZAPNUT

stykač generátoru VYPNUT

suma působení ochran

výpadek jističe měření napětí RTU

SIGNÁLY R-KGJ/ŘIS ČOV Benešov:

ethernet MODBUS TCP/IP:

porucha sítě - nouzový chod (vypnutí jističe RM5 a vybrané zátěže)

obnova sítě - paralelní chod (připojení jističe RM5 a plné zátěže)

nefakturační měření vyrobené energie

činný výkon



SIGNÁLY R-KGJ/RM5:

vstupy:

měření napětí přívodu RM5

stav jističe RM5

výstup:

blokace jističe RM5 (ovl. napěťové cívky)

zapnutí jističe RM5 (ovl. motorového pohonu)

vypnutí jističe RM5 (ovl. motorového pohonu)

Dispečerské řízení

V rámci dispečerského řízení výroby bude možné regulovat KJ v úrovních 0, 50, 75 a 100% jmenovitého výkonu. Dále bude zabezpečen přenos měření a signalizace požadovaných stavů.

Blokové schéma zapojení dispečerského řízení je uvedeno v příloze č. 7.

Tabulka stavů, povelů a hlášení (včetně adresace) je součástí přílohy č. 11.

Liniová schémata s ovládáním hlavních výkonových spínacích prvků a jejich návazností jsou v příloze č. 9 (hlavní rozvaděč nn RM5) a v příloze č. 10 (rozvaděč kogenerace).

Pro přenos dat na dispečink PDS bude v místě výroby (viz dispozice příloha č. 12) umístěna skříň AXV1 (dodávka firmy SINIT). Ve skříni bude osazena jednotka RTU (RTU7KL od firmy ELVAC), přijímač HDO a akumulátor 12V.

Soupis signálů přenášených na dispečink PDS:

SIGNÁLY RTU:

měření:

napětí na svorkách generátoru (R-KJ)

proud na svorkách generátoru (R-KJ)

venkovní teplota

vstup RTU:

BI-stykač generátoru ZAPNUT (R-KJ)

BI-stykač generátoru VYPNUT (R-KJ)

BI-suma působení ochran (R-KJ)

BI-výpadek jističe měření napětí RTU (R-KJ)



BI-P 0% (z HDO)

BI-P 50% (z HDO)

BI-P 75% (z HDO)

výstup RTU:

BO-P 0% (do ŘIS)

BO-P 50% (do ŘIS)

BO-P 75% (do ŘIS)

BO-P 100% (do ŘIS)

SYSTÉMOVÉ HODNOTY GENEROVANÉ V RTU:

měření:

činný výkon P

jalový výkon Q

vstup RTU:

porucha regulace

BI-P 0%

BI-P 50%

BI-P 75%

BI-P 100%

Měření výroby

Ze strany PDS není požadavek na měření vyrobené energie KJ. Vzhledem k tomu, že od roku 2014 je podle cenového rozhodnutí ERU zrušena podpora bioplynových výroben formou zeleného bonusu, nebude v místě výroby instalováno obchodní měření. Spotřeba elektrické energie ČOV, která bude ponížena o vyrobenou energii KJ, bude měřena čtyřkvadrantním elektroměrem v objektu trafostanice.

Nefakturační měření výroby KG bude z rozvaděče kogenerace přenášeno komunikací ethernet MODBUS TCP/IP do řídicího systému ČOV.



5. Závěr

Návrh elektrických zařízení aplikace ČOV je třeba posuzovat komplexně i s ohledem na strojní a technologickou část projektu. Bez širších znalostí provozního celku není možné navrhnout elektrické zařízení optimálně. Obecný problém při návrhu elektrických zařízení je především kumulování rezerv, které začíná již návrhem strojního zařízení a vede k následnému předimenzování elektrického pohonu. Toto často vzniká v důsledku neznalosti správných postupů návrhu, nekompletnosti návrhu, případně z důvodu nedostatečných podkladů parametrů zátěže.

Zásadním bodem návrhu je určení výpočtového zatížení provozu, na základě kterého jsou dimenzovány hlavní elektrická zařízení, jako je transformátor, hlavní kabelové trasy, kompenzační zařízení a parametry hlavních rozvaděčů. Při stanovení zatížení je třeba zohlednit jak maxima, tak běžné hodnoty zatížení a při znalosti technologických procesů pokud možno zamezit extrémním odchylkám zátěže. To lze provést např. nastavením sekvencí provozu nebo blokad příslušných elektrických zařízení.

Komplexní provedení návrhu, se stanovením všech potřebných veličin ve všech místech rozvodu, je hlavním předpokladem pro optimální návrh jednotlivých přístrojů instalace. Při neznalosti parametrů dochází např. k zbytečnému navyšování zkratové odolnosti prvků, nepřesné funkci ochran, neselektivitě jistění atd. S těmito vadami je možné zařízení provozovat, ale způsobuje navýšení investic a především nespolehlivost provozu.

Výraznou úsporou energie lze v aplikaci ČOV získat využitím kogeneračních jednotek. Hlavním argumentem jejich použití je především fakt, že kalový plyn, který je palivem KJ zde vzniká jako odpadní produkt při hygienizaci a eliminaci odpadního kalu. Jde tedy pouze o koncové zpracování bioplynu, při zachování stávající technologie. Vlastní spotřeba provozu KJ je pak minimální.

V neposlední řadě musí být součástí návrhu elektrického zařízení také posouzení jeho hospodárnosti. Nízká pořizovací cena vždy neznamená (s ohledem na provozní náklady a spolehlivost) úsporu i v dlouhodobém časovém horizontu. Vzhledem k tomu, že pro investora je právě nízká pořizovací cena často jediným hodnotícím měřítkem, je nutné umět stanoviska návrhu obhájit na základě znalosti technických, ale také legislativních požadavků.

Hlavním přínosem a zároveň cílem této práce je především vytvoření uceleného přehledu kompletního návrhu elektrického zařízení aplikace ČOV.



6. Seznam použité literatury

- [1] BRADA K.: *Čerpadla ve vodním hospodářství*, NOEL 2000 Brno, 2004
- [2] AQUACONTACT Praha v.o.s.
Technologický návrh intenzifikace ČOV Benešov
- [3] Příručka techniky, volby a užití vybraných pohonů
ROUBÍČEK O.: *Elektrické motory a pohony*, BEN Praha, 2004
- [4] PAVELKA J.: *Elektrické pohony*, ČVUT v Praze, 2007
- [5] Norma ČSN EN 60034-1 ed. 2
Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti
- [6] PAVELKA J., ČEŘOVSKÝ Z., JAVŮREK J.: *Elektrické pohony*,
ČVUT v Praze, 2003
- [7] Katalog SIEMENS 04/1998
Trojfázové asynchronní motory hutní jeřábové kroužkové
- [8] Webové stránky ČVUT FEL:
<http://motor.feld.cvut.cz/www/vyuka> (A1M14TP1)
Dimenzování a návrh pohonu s asynchronními motory
- [9] Průvodce problematikou softstartérů, ABB, 2009
Softstartéry
- [10] Webové stránky firmy Moeller – Příručka zapojení
<http://www.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/motor>
- [11] Norma ČSN 33 2000-4-41 ed. 2
Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti - Ochrana před úrazem elektrickým proudem
- [12] Norma ČSN 33 2000-5-52 ed. 2
Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení
- [13] Norma ČSN 34 1610
Elektrický průmyslový rozvod v průmyslových provozovnách
- [14] FENCL F.: *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*,
ČVUT v Praze, 2009
- [15] KRYCHTÁLEK Z., PAUZA J.: *elektrické stanice*,
SNTL v Praze, 1989
- [16] HRON J.: *Hospodárná velikost transformátorů VN*,
projekt Cena Nadace ČEZ 2014
- [17] Norma ČSN 33 2190
Připojování elektrických strojů a pohonů s elektromotory



-
- [18] Norma ČSN 33 0120
Elektrotechnické předpisy – Normalizovaná napětí IEC
- [19] Webové stránky Elpro-Energo (katalog transformátorů SGB):
<http://www.elpro-energo.cz/>
- [20] Zlepšení účinnosti v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků
Ing. Miloš Molnár, EMCOS s.r.o., www.emcos.cz
- [21] Kompenzace – monitorování a úspory elektrické energie
Ing. Jiří Hanzlík, EMCOS s.r.o., www.emcos.cz
- [22] Webové stránky ZEZ SILKO (hradící tlumivky NN):
<http://www.zez-silko.cz>
- [23] Kompenzace účinnosti:
EMCOS <http://www.emcos.cz>
- [24] Norma ČSN EN 60909-0
Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů
- [25] Publikace IN-EL, KŘÍŽ M.
Zkratové proudy, základní veličiny, jejich výklad.
- [26] Příručka elektrotechnika OEZ, 2011
Jistící přístroje I
- [27] PPDS (Pravidla provozování distribučních soustav) – PŘÍLOHA 6
Standardy připojení zařízení k DS, vypracoval PDS, schváleno ERU
- [28] Přiřazování pojistek VN k distribučním transformátorům
OEZ s.r.o., www.odbornecasopisy.cz
- [29] Příručka elektrotechnika OEZ, 2012
Jistící přístroje II
- [30] Katalog Schneider Electric, *Rozvodny VN, SM6 Modulární rozvaděče, 2012*
- [31] Norma ČSN 33 2000-5-52 ed. 2
Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení
- [32] Norma ČSN 33 2000 5-51 ed. 3
Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení - Všeobecné předpisy
- [33] Webové stránky firmy Kopus – Kabelové nosné systémy
<http://www.kopus.cz/cs/technicka-podpora>
- [34] Katalog Prakab, *Silové kabely*
- [35] Odborný časopis pro elektrotechniku ELEKTRO, Květen 2010
- [36] Norma ČSN EN 60947-4-1 ed. 3
Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 4-1: Stykače a spouštěče motorů - Elektromechanické stykače a spouštěče motorů
-



-
- [37] Příručka softstartů Danfos, *Pocket Guide VLT® Soft Starter*
 - [38] Katalog OEZ Letohrad, *Pojistkové systémy Varius*
 - [39] Vlastní spotřeba kogeneračních jednotek na ČOV
Ing. Miloslava Melounová, SOVAK ČR, www.sovak.cz
 - [40] Úspora energie pomocí kogenerace
TEDOM, www.kogenerace.tedom.com
 - [41] Projekční podklady KJ TEDOM řady CENTO
TEDOM, www.kogenerace.tedom.com
 - [42] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2013,
ze dne 27 listopadu 2013
 - [43] Zákon č. 165/2012 Sb. O podporovaných zdrojích energie
 - [44] PPDS (Pravidla provozování distribučních soustav) – PŘÍLOHA 4
Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí PDS, vypracoval PDS, schváleno ERU
 - [45] PROVOZNÍ INSTRUKCE:
Požadavky na zařízení pro regulaci a ovládání výroben z obnovitelných zdrojů energie připojovaných do distribuční soustavy ČEZ Distribuce, a.s
ČEZ Distribuce, a.s., 2012.
 - [46] PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY PRO VÝROBNY ELEKTŘINY
pro připojení na síť ČEZ Distribuce, a.s
ČEZ Distribuce, a.s., 2012.
 - [47] Návrh pohonu čerpadla, připojení na síť, vykreslení v Eplanu
Václav Novák, bakalářská práce ČVUT FEL, 2012



7. Seznam obrázků

Obr. 1 - Ponorné kalové čerpadlo Flygt

Obr. 2 - Ventilátorová charakteristika

Obr. 3 - (A) S1 trvalé zatížení; P-výkon zátěže, ΔP -elektrické ztráty, ϑ -teplota, (B) S2 krátkodobé zatížení; P-výkon zátěže, ΔP -elektrické ztráty, ϑ -teplota, t_z -doba chodu s konstantním zatížením

Obr. 4 - Dovolené oteplení vinutí pro jednotlivé třídy izolace; $\vartheta_{C,max}$ - maximální teplota okolí, $\Delta\vartheta$ - dovolené oteplení vinutí, ϑ_{max} - maximální teplota izolační třídy

Obr. 5 - Celkové ztráty v transformátorech vn/nn do 1000 kVA v závislosti na zatížení;
1- ztráty, 2 – křivky stejného výkonu

Obr. 6 - Přibližné úbytky napětí na transformátorech při různém zatížení

Obr. 7 - Hrazená kompenzace

Obr. 8 - Hradící tlumivky

Obr. 9 - Fázorový diagram zdánlivého výkonu S

Obr. 10 - Zkratový proud el. blízkého zkratu s klesající střídavou složkou

Obr. 11 - Souměrný trojfázový zkrat

Obr. 12 - Příklad nezauzlené sítě

Obr. 13 - Zkrat napájený ze síťového napáječe přes transformátor

Obr. 14 - Součinitel K pro sériové obvody jako funkce poměru X/R

Obr. 15 - Celkové schéma napájení ČOV Benešov

Obr. 16 - Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy

Obr. 17 - Vývod vn pro TS (odpínač s pojistkou)

Obr. 18 - Vypínací charakteristiky pojistek aM a gG

Obr. 19 - Typy koordinace pro jištění softartéru (rychlou) polovodičovou pojistkou nebo motorovým spouštěčem

Obr. 20 - Schéma kalového a plynového hospodářství

Obr. 21 - Úspora energie pomocí kogenerace

Obr. 22 - Provoz KJ v kombinaci paralelního a nouzového režimu



8. Seznam tabulek

Tab. 1 - Mezní hodnoty oteplení pro střídavá vinutí strojů o výkonech 600W až 200kW

Tab. 2 - Seznam spotřebičů napájených z rozvaděče RM8

Tab. 3 - Potřebný výkon transformátorů pro spouštění AM

Tab. 4 - Parametry suchého transformátoru SGB typ DTTH 400/20

Tab. 5 - Typické hodnoty zkratového výkonu sítě vn a složky jeho impedance převedené na úroveň nn

9. Seznam příloh

[P1] – seznam spotřebičů ČOV Benešov

[P2] – celkové schéma napájení ČOV Benešov

[P3] – technické parametry KJ TS Cento 120

[P4] – výpočty SW SICHR

[P5] – vyjádření ČEZ Distribuce, a.s.

[P6] – celková situace ČOV Benešov

[P7] – blokové schéma ČOV Benešov (regulace KJ)

[P8] – schéma zapojení RM8 - vývod Z02.65

[P9] – schéma zapojení RM5 - návaznost na KJ

[P10] – schéma zapojení R-KJ – návaznost na RM5

[P11] – tabulka stavů KJ

[P12] – dispozice kotelny

[P13] – rozvodna R-22kV ČOV Benešov