

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh napájecí sítě průmyslového provozu

Anotace

Předložená bakalářská práce se zabývá návrhem napájecí sítě průmyslového provozu, kterým je průmyslová slévárna. Při návrhu se nejdříve stanoví stupně zabezpečení dodávky elektrické energie a poté se ze součinitele náročnosti stanoví výpočtové zatížení pro všechny motory. V následujícím kroku se stanovují velikosti kompenzátorových baterií jak pro jednotlivou, tak i pro skupinovou kompenzaci asynchronních motorů. Díky znalosti příkonu jednotlivých objektů je dále navržen dostatečný výkon transformátorů. V posledním kroku se stanoví velikosti průřezů vodičů do jednotlivých objektů.

Klíčová slova

Elektrický příkon objektu, kompenzace účinníku, dimenzování transformátorů, dimenzování vodičů, zkrat.

Abstract

The thesis deals with the design of an industrial distribution network. Firstly security level of electricity supply is determined, and then a design load for all equipment is determined by using coefficient of demands. In the next step an output of power-factor correction capacitors is determined for individual and sector compensations. Further a sufficient output of transformers is calculated thanks to knowledge of individual objects input-power. In the last step sizes of the cross sections of power lines into individual objects are determined.

Key words

Electric input of object, power-factor compensation, transformers dimensioning, conductors dimensioning, short circuit.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 STUPNĚ ZABEZPEČENÍ DODÁVKY.....	11
1.1 POŽADAVKY NA ROZVOD.....	11
1.2 ROZDĚLENÍ STUPŇŮ ZABEZPEČENÍ.....	11
1.2.1 Dodávky 1. stupně.....	11
1.2.2 Dodávky 2. stupně.....	12
1.2.3 Dodávky 3. stupně.....	12
2 VÝPOČTOVÉ ZATÍŽENÍ	13
2.1 SOUČINITEL NÁROČNOSTI.....	13
2.1.1 Určení součinitele náročnosti	13
2.1.2 Vypočtení součinitele náročnosti	13
2.2 MOŽNOSTI STANOVENÍ VÝPOČTOVÉHO ZATÍŽENÍ	14
3 KOMPENZACE ÚČINÍKU.....	16
3.1 ZAVEDENÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU	16
3.2 RŮZNÉ DRUHY KOMPENZACE.....	16
3.2.1 Sériová kompenzace.....	16
3.2.2 Paralelní kompenzace.....	17
3.3 VÝPOČET KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	20
3.3.1 Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku.....	20
3.4 ZAŘÍZENÍ PRO KOMPENZACI.....	21
3.4.1 Kondenzátorové baterie	21
3.4.2 Synchronní kompenzátory.....	24
4 STANOVENÍ POČTU A VÝKONŮ TRANSFORMÁTORŮ	25
4.1 TRANSFORMÁTOR.....	25
4.2 ZTRÁTY V TRANSFORMÁTORECH	26
4.3 PARALELNÍ CHOD TRANSFORMÁTORŮ	27
4.4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	29
5 KONTROLA NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ PŘI ROZBĚHU.....	30
6 DIMENZOVÁNÍ KABELŮ A LAN.....	31
6.1 DIMENZOVÁNÍ DLE DOVOLENÉHO PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ VODIČE	31
6.2 KONTROLA NA DOVOLENÝ ÚBYTEK NAPĚTÍ.....	31
6.3 KONTROLA NA OTEPLENÍ ZKRATOVÝMI PROUDY	32
7 ZADÁNÍ.....	33
8 VÝPOČTY A TABULKY	36
8.1 URČENÍ STUPNĚ ZABEZPEČENÍ DODÁVKY	36
8.2 VÝPOČTOVÉ ZATÍŽENÍ	36
8.2.1 Výpočet nebo určení součinitele náročnosti.....	36
8.2.2 Výpočtové zatížení.....	37
8.3 JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA OBJEKTU	39
8.4 KOMPENZACE ÚČINÍKU	40
8.4.1 Jednotlivá kompenzace	40
8.4.2 Skupinová kompenzace	41

8.4.1	<i>Celkové vykompenzování průmyslového provozu</i>	43
8.5	STANOVENÍ POČTU TRANSFORMÁTORŮ	44
8.6	KONTROLA NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ PŘI ROZBĚHU NEJVĚTŠÍHO MOTORU	50
8.7	VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU A DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ	51
8.8	VÝPOČET ČINNÝCH A JALOVÝCH ZTRÁT V ROZVODU	57
9	ZÁVĚR	59
	POUŽITÁ LITERATURA	60
	PŘÍLOHA A	1
	PŘÍLOHA B	4
	PŘÍLOHA C	5
	PŘÍLOHA D	6

Úvod

Zpracovávaná bakalářská práce na téma „Návrh napájecí sítě průmyslového provozu“ je zaměřena na optimalizaci napájecí sítě průmyslové slévárny, která se skládá z několika provozoven (např. válcovna, výrobní, vodárna, atd.). Dispoziční řešení provozoven a dostupná infrastruktura je vymezena zadáním bakalářské práce.

Předkládaná práce je zaměřena na návrh napájecí sítě průmyslového objektu, kterým je slévárna. Připojení je z 10 km vzdálené rozvodny, která je na napěťové hladině 22 kV. Spotřebiče v průmyslovém závodě jsou trojfázové asynchronní motory a tavící zařízení na hladině 6 kV, trojfázové asynchronní motory na hladině 0,4 kV a jednofázové osvětlení také na hladině 0,4 kV.

Napájecí síť je klíčovou složkou zajišťující provoz každé slévárny s tím, že je omezena vybranými kritérii. Nastavení optimální úrovně těchto kritérií je rozpracováno v následujících čtyřech částech práce.

V první části se řeší stupně zabezpečení dodávky, kterým se určí jednotlivě pro dané objekty. Dále se vypočte z instalovaného výkonu výpočtové zatížení. Dle určitých stupňů zabezpečení dodávky a výpočtového zatížení jsem navrhl do dispozičního plánu odpovídající síť a připojení k daným objektům.

V druhé části jsem se zabýval kompenzací daných spotřebičů. Ta bude provedena přidáním před spotřebič kondenzátorovou baterií, která částečně ulehčí síti od jalové složky elektrické energie. Ideálně by se měla pro každý spotřebič volit kompenzace jednotlivá, ale podle velikosti výkonů by to bylo nákladné. Pro spotřebiče menších výkonů se tedy volí kompenzace skupinová. Stejným postupem je aplikován i danému objektu.

V třetí části se navazuje na výpočty z druhé části a podle jejich výsledků je stanoven počet a výkon transformátorů, které zajistí dostatečnou dodávku elektrické energie do daných provozoven. U spotřebičů 1. a 2. stupně zabezpečení dodávky je vybráno mezi možnostmi paralelního chodu nebo záložním transformátorem. Správnost návrhu hlavního transformátoru je ověřeno výpočtem rozběhového proudu pro největší motor v objektu a hlídá se přetížení transformátoru v daných mezích.

V poslední části jsou voleny průřezy vodičů a kabelů, u nichž jsou brány v potaz zkratové poměry, úbytky napětí, hospodárnost provozu.

Seznam symbolů

P_i [W]	instalovaný výkon
β [-]	součinitel náročnosti
P_p [W]	výpočtové zatížení
Q_k [VAr]	výkon kompenzační baterie
$\cos \varphi$ [-]	účinník před kompenzací
$\cos \varphi_k$ [-]	účinník po kompenzaci
P_a [W]	ztráty jednotlivého chodu transformátoru
P_b [W]	ztráty paralelního chodu transformátoru
N [Kč]	náklady na nákup a provoz transformátorů
I_p [A]	provozní proud vodiče
I_N [A]	jmenovitý proud vodiče
ΔU_f [V]	úbytek napětí/změna napětí
$\Delta u_{\%}$ [%]	procentní úbytek napětí/procentní změna napětí
I_k'' [A]	rázový zkratový proud
I_{ke}'' [A]	ekvivalentní oteplovací proud
S [mm ²]	průřez vodiče
S_{\min} [mm ²]	minimální průřez vodiče
vvn	velmi vysoké napětí
vn	vysoké napětí
nn	nízké napětí

1 Stupně zabezpečení dodávky

Stupně zabezpečení dodávky jsou shrnuty v normě ČSN 34 1610, která zajišťuje jak bezpečnost osob, tak i bezpečnost, spolehlivost a hospodárnost rozvodů vysokého napětí (dále jen vn) a nízkého napětí (dále jen nn) v průmyslových provozech.

1.1 Požadavky na rozvod

V průmyslových provozovnách se zajišťuje různý stupeň dodávky elektřiny. Jsou kladeny na něj tyto požadavky:

- a) bezpečnost osob a věcí
- b) provozní spolehlivost
- c) přehlednost provozu
- d) snadná přizpůsobitelnost rozvodu při požadovaném přemísťování strojů
- e) možnost rychlého odstranění poruch
- f) hospodárnost provozu
- g) hospodárné využití opakovaných jednotek nebo celků
- h) malá spotřeba barevných kovů
- i) vzhled

V každé provozovně se zohledňuje jiný druh požadavku, je možné pořadí požadavků v provozovnách různě zaměňovat.

1.2 Rozdělení stupňů zabezpečení

Zajištění elektrické energie k jednotlivému pohonu nebo k jednotlivému objektu potřebuje určitý stupeň dodávky, který se dělí dle normy ČSN 34 1610.

1.2.1 Dodávky 1. stupně

Dodávky 1. stupně musí být zajištěny za každých okolností, aby nedocházelo přerušením dodávky k ohrožení lidských životů a k velkým ztrátám (např. zničení strojů, zastavení výroby, atd.), které značně převyšují náklady na zajištění dodávky 1. stupně. Rozhodnutí o dodávce se musí technicko-ekonomicky zdůvodnit.

Dodávky 1. stupně musí být zajištěny ze dvou nezávislých zdrojů (např. dvěma paralelně pracujícími generátory nebo nezávislými sítěmi elektrické energie), z nichž každý zdroj musí mít dostatečný výkon k pokrytí spotřeby dodávky 1. stupně při výpadku. Pokud spotřeba dodávky 1. stupně je poměrně malá, můžeme jí založit náhradním neelektrickým pohonem

přímo v objektu závodu. Nestačí-li náhradní neelektrický pohon k záloze 1. stupně, musí se dodat elektrická energie z nezávislé sítě k síti stálého napájení.

1.2.2 Dodávky 2. stupně

Dodávky 2. stupně musí být pokud možno zajištěny tak, aby přerušení a následné zastavení strojů způsobilo jen snížení nebo omezení výroby. Nesmí však dojít k ohrožení životů lidí.

Provedení dodávek 2. stupně se provádí dle místních poměrů. Počty a výkony transformátorů, průřezy vodičů se volí podle vzájemných záloh při výpadku elektrické energie. Dostatečné je připojení dvou transformátorů, aby alespoň jeden z nich zajistil bezproblémový chod při výpadku transformátoru. To se zajistí zálohovacím transformátorem nebo současným chodem dvou transformátorů.

1.2.3 Dodávky 3. stupně

Dodávky 3. stupně nemusí být zajištěny zvláštním opatřením. Mohou se připojit na jediný elektrický přívod a není k tomu nutné zvláštního zajištění.

Pokud jsou v průmyslovém závodě různé stupně zabezpečení dodávky, výkon rezervy se volí takový, aby pokryl elektrickou energií spotřebu 1. stupně.

[1]

2 Výpočtové zatížení

Při výpočtu výpočtového zatížení se vychází z režimu, ve kterém daný spotřebič bude pracovat. Podle režimu se určí jednotlivý součinitel náročnosti β nebo součinitel náročnosti a, b jednotlivých skupin elektrických spotřebičů.

2.1 Součinitel náročnosti

Součinitel náročnosti se buď při nezadaných parametrech vyčte z předem připravených tabulek s hodnotami součinitelů náročnosti pro jednotlivé spotřebiče nebo celé objekty. Avšak mnohem častěji a přesněji se spočte součinitel náročnosti ze zadaných hodnot.

2.1.1 Určení součinitele náročnosti

Součinitel náročnosti se dá podle daného vybavení provozoven určit už z předem stanovených tabulek s hodnotami, které se nacházejí v normě ČSN 34 16 10.

2.1.2 Vypočtení součinitele náročnosti

Součinitel náročnosti se dá vypočítat podle zadaných hodnot, které dosadíme do těchto vzorců:

$$a) \quad \beta = \frac{P_{\max}}{P_i} \quad (2.1)$$

kde: P_{\max} – příkon určený z maximálního odběru elektrické energie za jednu hodinu v období největšího odběru v roce;

P_i – součet jmenovitých výkonů všech spotřebičů, instalovaných v závodě, provozovně apod.;

$$b) \quad \beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad (2.2)$$

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

k_z – součinitel využití – poměr skutečně odebíraného výkonu spotřebičů, který je současně v chodu k jejich jmenovitému výkonu;

η_m – účinnost spotřebiče (motoru) při daném využití;

η_s – účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa až ke spotřebiči;

2.2 Možnosti stanovení výpočtového zatížení

Při určování výpočtového zatížení musíme zjistit, zda jde o řešení elektrického rozvodu pro:

- a) výrobní provoz jako celek
- b) skupinu spotřebičů nebo jednotlivé agregáty včetně pomocných pohonů nacházejících se ve výrobním provozu
- c) jeden spotřebič

Musí být zjištěno, zda každý stupeň projektu obsahuje podrobně stanovené součinitele náročnosti. V jednotlivých případech se určí podle stejných již fungujících provozoven, a dle očekávaných změn způsobených použitím nové výrobní technologie v nově projektovaných provozovnách.

Ad a) Výrobní provoz jako celek

Při určování výpočtového zatížení (P_p) výrobního provozu pro dimenzování přírodního zdroje a jejich napájecích vedení se vychází z instalovaného výkonu (P_i) a předpokládaného součinitele náročnosti (β):

$$P_p = P_i \cdot \beta \quad (2.3)$$

Ad b) Výpočtové zatížení skupiny spotřebičů

Při určování výpočtového zatížení (P_p) skupiny spotřebičů připojených na jeden rozvaděč se vychází z instalovaného výkonu (P_i) spotřebičů a součinitele náročnosti stanoveného pro danou skupinu spotřebičů z maxima nebo ze vzorce „dvojčlenného“:

$$P_p = a \cdot P_x + b \cdot P_n \quad (2.4)$$

kde: P_x – součet jmenovitých výkonů x největších spotřebičů charakterizujících určitou skupinu;

P_n – součet jmenovitých výkonů všech elektrických spotřebičů této skupiny včetně P_x ;

a, b – součinitelé náročnosti jednotlivých skupin elektrických spotřebičů;

Pro a) i b) platí stejné stanovení výpočtového proudu (I_p):

- pro trojfázové spotřebiče

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} \quad (2.5)$$

- pro jednofázové spotřebiče

$$I_p = \frac{P_p \cdot \sqrt{3}}{U_s \cdot \cos \varphi} \quad (2.6)$$

kde: U_s – jmenovité střídavé napětí sdružené [V];

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

Ad c) Jeden spotřebič

Při určování výpočtového zatížení pro jeden spotřebič (P_{p1}) se vychází z jmenovitého (instalovaného) výkonu spotřebiče (P_{i1}) a jeho účinnosti (η):

$$P_{p1} = \frac{P_{i1}}{\eta_m} \quad \text{tedy: } P_{p1} \geq P_{i1} \quad (2.7)$$

Stanovení výpočtového proudu (I_p):

I) Pro trvalý provoz:

$$I_{p1} = \frac{P_{p1}}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} \quad (2.8)$$

II) Pro přerušovaný nebo krátkodobí provoz:

$$I_{p1} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{\sum_{j=1}^n t_j}} \quad (2.9)$$

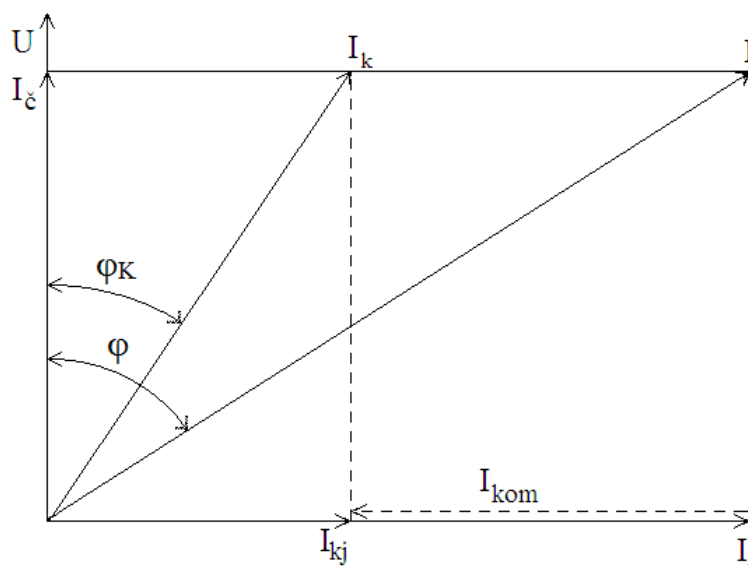
Pozn. pro přerušovaný proud se nesmí počítat úbytek napětí.

[1]

3 Kompenzace účinníku

3.1 Zavedení kompenzace účinníku

Kompenzace účinníku se zavádí pro snížení ztrát při přenosu a rozvodu elektrické energie. Průmyslové závody mají větší odběr elektrické energie a tak se šetření více projeví, protože asynchronní motory více zatěžují síť jalovou energií. Jalová složka elektrické energie je nezbytná pro vytvoření magnetického pole, a tak můžeme přeměnit činnou složku elektrické energie v práci. Přívod k asynchronnímu motoru je vytěžován jak činnou složkou, tak i jalovou složkou elektrické energie, tedy se musí přívodní vodiče i rozvodná zařízení dimenzovat na zdánlivou složku proudu I . Ta je větší o jalovou složku, která způsobuje i větší úbytky napětí a činné ztráty v přenosu úměrné I^2 . Jalová složka proudu se sníží nebo potlačí tak zvanou kompenzací účinníku nebo také kompenzací jalového proudu.



Obr. 3.1 Účinek kompenzování na účinník. [2]

3.2 Různé druhy kompenzace

3.2.1 Sériová kompenzace

Při sériové kompenzaci jsou kondenzátory zapojeny v sérii s kompenzovaným zařízením a prochází jím stejný provozní proud, který se mění stejně se zatížením bez jakéhokoliv časového zpoždění. Tato vlastnost je výhodná při odstraňování škodlivého vlivu u indukčních zařízení. Sériová kompenzace se vyskytuje nejvíce u svářeček, dále u vedení vn a vvn.

Výkon sériového kondenzátoru je vyjádřen:

$$Q_c = U \cdot I_c \quad (3.1)$$

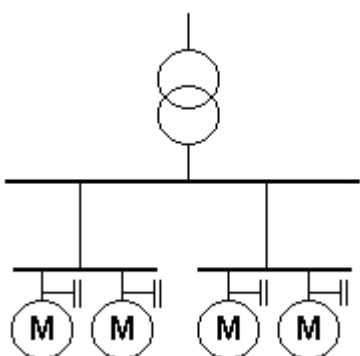
3.2.2 Paralelní kompenzace

Způsoby kompenzace v průmyslových závodech jsou následující:

- jednotlivý,
- skupinový,
- centrální,
- smíšený.

3.2.2.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

Při jednotlivé kompenzaci má každý spotřebič indukčního výkonu vlastní vhodně dimenzovaný kondenzátor.



Obr. 3.2 Jednotlivá kompenzace. [2]

Výhody:

- kompenzace indukčního výkonu se provádí u spotřebiče nejlépe až na jeho přívodních svorkách, čímž je odlehčené vedení až ke spotřebiči, a to vede i ke snížení úbytku napětí na přívodním vedení ke spotřebiči,
- není třeba regulace jalového výkonu, protože kondenzátor je zapínán a vypínán zároveň se spotřebičem, což ulehčuje nebezpečnost překompenzování,
- jednodušší a provozně spolehlivější než ostatní způsoby kompenzace.

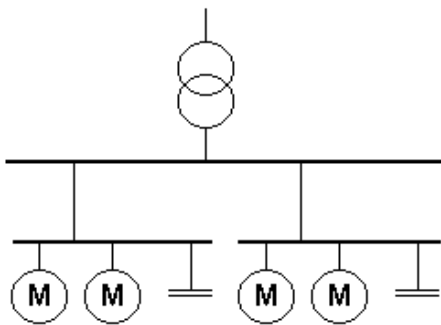
Nevýhody:

- u málo používaných spotřebičů je i málo využitý kondenzátor, tudíž jsou vyšší náklady na kompenzaci a z ekonomického hlediska se nevyplatí individuální kompenzace,

- vzhledem k rozptýlenému rozmístění kondenzátorů je kontrola a údržba obtížnější,
- nebezpečí překompenzování u spotřebičů s rychle se měnící zátěží.

3.2.2.2 Skupinová kompenzace

Při skupinové kompenzaci se kondenzátory připojují na svorkové napájecí rozvaděče s několika indukčními spotřebiči. Kondenzátor je umístěn v blízkosti indukčního spotřebiče, tudíž dojde k odlehčení úseku vedení po skupinový rozvaděč. V navazující části, která vychází ze skupinového rozvaděče a je zakončena indukčním spotřebičem již odlehčena není. Velikost kondenzátoru se řídí soudobím odebíraným výkonem (ne součet instalovaných výkonů motorů). Využití skupinové kompenzace je využíváno především v rozvodech nízkého napětí.



Obr. 3.3 Skupinová kompenzace. [2]

Výhody:

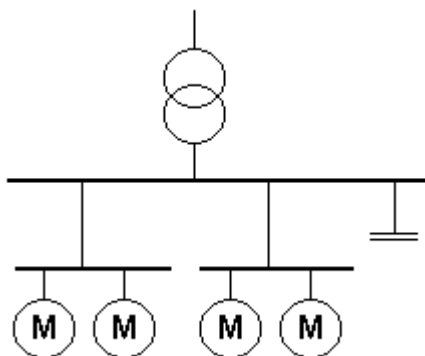
- kondenzátor při skupinové kompenzaci je úsporněji využit oproti jednotlivé kompenzaci,
- odlehčení sítě až po skupinový rozvaděč kompenzací.

Nevýhody:

- nutnost opatřit kondenzátory vypínacími, zapínacími, řídicími prvky a jištěním,
- nutnost řízení velikosti kompenzačního výkonu, tj. nutnost automatické regulace jalového výkonu,
- vedení od skupinového rozvaděče k indukčnímu spotřebiči není kompenzováno.

3.2.2.3 Ústřední (centrální) kompenzace

Při ústřední kompenzaci se doplňují indukční spotřebiče centrálním připojením kondenzátorů na vstupní přípojnici hlavního rozvaděče nebo na sběrny v rozvodně. Tohoto se využívá v menších průmyslových závodech.



Obr. 3.4 Centrální kompenzace. [2]

Výhody:

- kompenzační výkon je lépe využit při dokompenzování.

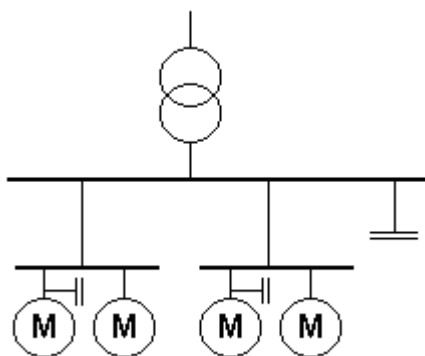
Nevýhody:

- potřeba velikosti kapacitního výkonu lze regulovat automaticky,
- přívody z přípojnice k indukčním spotřebičům nejsou vykompenzovány.

3.2.2.4 Smíšená kompenzace

Při smíšené kompenzaci se užívá v průmyslových závodech kompenzace individuální, skupinová a centrální. V průmyslových závodech, kde jsou motory velkých výkonů v trvalém provozu se kompenzuje individuálně, u skupin menších motorů s kratší dobou chodu se kompenzuje skupinově a v hlavní transformovně se dokompenzuje na požadovanou hodnotu účinníku centrálním kondenzátorem.

Přesně nejde určit, která z daných druhů kompenzace je nejvýhodnější. Obvykle se navrhne několik variant kompenzace a propočítá se nejvýhodnější z hlediska ekonomické efektivity.



Obr. 3.5 Smíšená kompenzace. [2]

3.3 Výpočet kompenzačního výkonu

Výkon se určí výpočtem upraveným podle toho, jaký cíl chceme kompenzací dosáhnout.

Při návrhu se vychází z:

- z požadovaného zlepšení účinníku,
- z požadovaného zmenšení zdánlivého výkonu,
- z požadovaného zvětšení využití příkonu,
- z požadovaného zmenšení ztrát při přenosu,
- z požadovaného zlepšení napěťových poměrů.

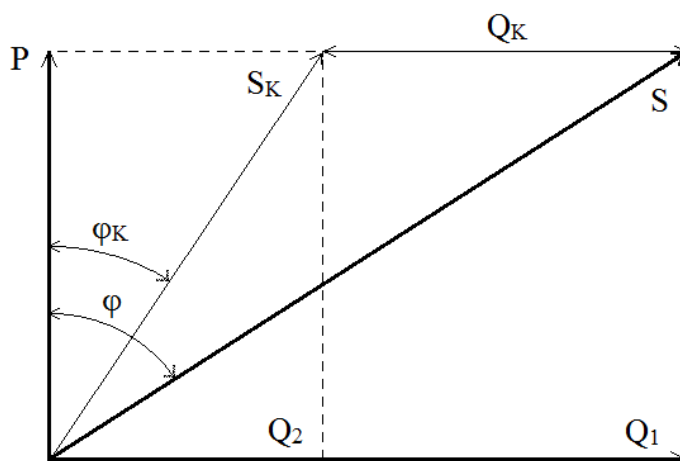
U nových zařízení se nedá vyjít z naměřených hodnot elektroměrů. Veličiny potřebné ke kompenzaci se musí určit z instalovaného výkonu, soudobosti a účinníku kompenzace.

3.3.1 Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku

Při řešení tohoto typu kompenzace se musí znát:

- zdánlivý výkon S ,
- činný výkon P ,
- účinník před kompenzací $\cos \varphi$,
- požadovaný účinník po kompenzaci $\cos \varphi_k$.

FÁZOROVÝ DIAGRAM



Obr. 3.6 Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku. [4]

Pomocí výše uvedeného obrázku lze vyjádřit obecný rovnicový vztah, který je následující:

$$Q_k = Q_1 - Q_2 \quad (3.2)$$

kde: Q_1 - jalový indukční výkon před kompenzací;
 Q_2 - jalový indukční výkon po kompenzací;
 Q_k - jalový indukční výkon, o který je vykompenzováno.

Z obrázku 3.6 lze též určit následující rovnicové vztahy:

$$Q_1 = P \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3.3)$$

$$Q_2 = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k \quad (3.4)$$

Dosažením do rovnice se získá následující vztah:

$$Q_k = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad (3.5)$$

3.4 Zařízení pro kompenzaci

Nejpoužívanějším prostředkem jsou kondenzátorové baterie, ale mohou být použity i synchronní kompenzátory a jiné.

3.4.1 Kondenzátorové baterie

Kondenzátorová baterie se skládá z několika kondenzátorů zapojených do trojúhelníka nebo do hvězdy, které jsou připojeny na kompenzační rozvaděč, na kterém se nachází i spínací nebo ochranné prvky, regulátor jalového výkonu a ostatní ochranná zařízení.

Kondenzátorové baterie se používají pro konstantní nebo pomalu měnící se zátěž, protože spínání kondenzátorových baterií není zrovna jednoduché (doplňují je přechodové děje). Tyto baterie jsou využity pro málo časté přepínání a odpojování.

U kondenzátorových baterií se sledují především hlavní parametry – napětí, proud a teplota. Proud kondenzátoru je dán přímo úměrně napětím, kapacitě a kmitočtu, který je přibližně konstantní - dle uvedeného vzorce:

$$I = U \cdot C \cdot 2\pi \cdot f \quad (3.7)$$

kde: I – proud procházející sériovým kondenzátorem;

U – napětí na sériovém kondenzátoru;

f – frekvence, na které je sériový kondenzátor připojen.

Jsou dány určité podmínky pro provoz kondenzátoru:

- proud nesmí přesáhnout trvale 143% jmenovité hodnoty proudu,
- při poklesu proudu o více než 20% - doporučeno odpojit a vyměnit.

Druhy spínání:

- váňové – kompenzační stupně se spínají pouze v řadě za sebou, v jednotlivých poměrech 1:2:4:8:16, aby se změny jalového výkonu co nejjemněji pokryly,
- kruhové – kompenzační stupně jsou přibližně stejně velké, kdy se pouze prohazují stupně nejdéle zapnuté se stupni nejdéle vypnutými. Dochází k snížení počtu spínacích operací a zvýšení životnosti spínacích prvků.

Častější výskyt energetického rušení v průmyslových sítích zapříčinilo kladení mnohem vyšších nároků na elektromagnetickou odolnost regulátorů jalového výkonu.

3.4.1.1 Kondenzátorové baterie pro nn

V kompenzačních zařízeních nn se užívají trojfázové kondenzátorové jednotky, což jsou jednofázové kondenzátory připojené na sdružené napětí – do trojúhelníka a k nim jsou zapojeny i vybíjejí odpory.

Pro zapojení do trojúhelníka se používá napětí sdružené, které je o $\sqrt{3}$ větší než napětí fázové.

Zapojení do hvězdy:

$$Q_{komY} = 3 \cdot (2\pi \cdot f) \cdot C \cdot U_f^2 \quad (3.8)$$

Zapojení do trojúhelníka:

$$Q_{kom\Delta} = 3 \cdot (2\pi \cdot f) \cdot C \cdot (\sqrt{3} \cdot U_f)^2 = 6 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f^2 \quad (3.9)$$

Jejich poměr je:

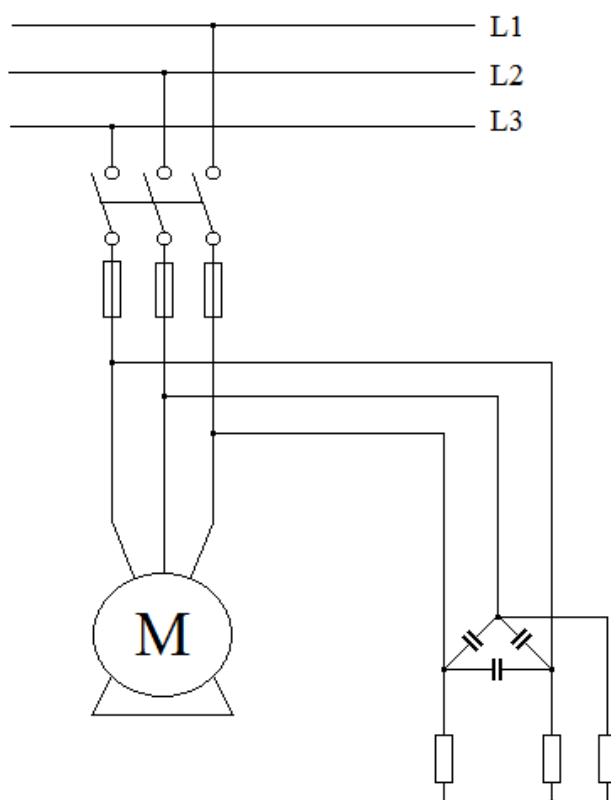
$$\frac{Q_{kom_{\Delta}}}{Q_{kom_Y}} = \frac{3 \cdot (2\pi \cdot f) \cdot C \cdot U_f^2}{6 \cdot (2\pi \cdot f) \cdot C \cdot U_f^2} = 3 \quad (3.10)$$

kde: f - frekvence sítě;

C – kapacita kondenzátoru;

U_f – fázové napětí.

Proto má zapojení do trojúhelníka 3x větší kompenzační výkon než pro zapojení do hvězdy.

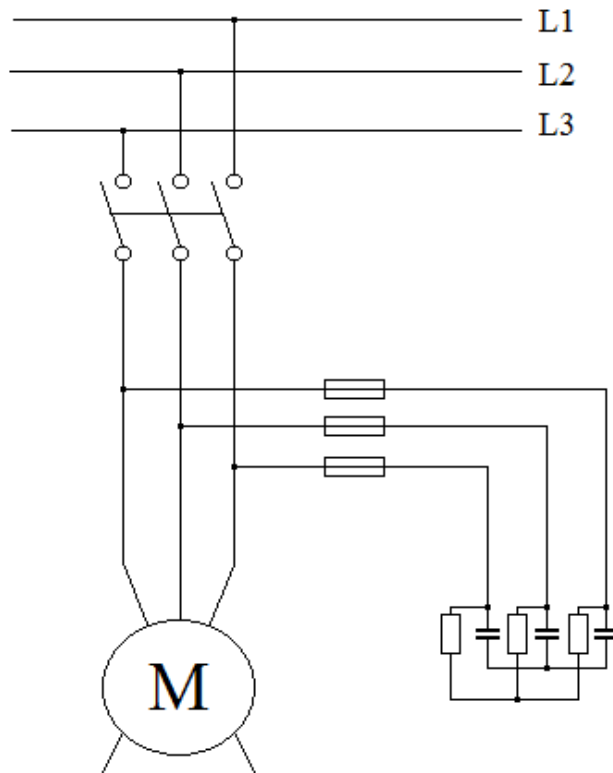


Obr. 3.7 Zapojení kompenzačních baterií a vybíjecích odporů na napětí nn. [2]

3.4.1.2 Kondenzátorové baterie pro vn

V kompenzačních zařízeních vn se užívají trojfázové kondenzátorové jednotky, což jsou jednofázové kondenzátory spojené na fázové napětí – do hvězdy a k nim jsou zapojeny i vybíjecí odpory.

I když je zapojení do trojúhelníka výhodnější, používá se zapojení do hvězdy, protože na hladině vn už by bylo velice drahé dimenzovaná kondenzátorů na sdružené napětí, na napětí fázové jsou nižší napěťové nároky.



Obr. 3.8 Zapojení kompenzačních baterií a vybíjecích odporů na napětí vn. [2]

3.4.2 Synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátor je synchronní motor bez mechanického zatížení. Změnou jeho buzení je možné měnit spotřebu nebo dodávku jalové energie. V přebuzeném stavu se synchronní motor chová jako zdroj indukční jalové energie.

Oproti kondenzátorům se u synchronních kompenzátorů při poklesu napětí zvyšuje odebíraný kapacitní výkon, tím se zmenšuje úbytek napětí v síti a napětí se udržuje.

V průmyslových sítích synchronní kompenzátory plní funkci centrální kompenzace na hlavních vstupních rozvodnách. S ohledem na jejich dobu reakce jsou vhodné ke kompenzaci stabilní zátěže nebo ke změně bez dynamických rázů. Jinak by mohlo dojít k občasnému nedokompenzování nebo překompenzování, čím se může ještě více změnit kolísání napětí. Synchronní kompenzátory nejsou vhodné pro kompenzaci elektrických obloukových pecí, pohonů atd. S ohledem na provozní náklady jsou postupně v průmyslových závodech nahrazovány kompenzátorovými bateriemi.

[2] [3] [4]

4 Stanovení počtu a výkonů transformátorů

4.1 Transformátor

Transformátor je elektrický stroj, který se používá ke změně napětí střídavého proudu při stálém kmitočtu. Pracuje na principu elektromagnetické indukce, ale bez točivého pohybu.

Umožňuje rozvod a přenos energetické energie při vysokém napětí a malém proudu, což minimalizuje Jouleovy ztráty. Jeho účinnost je až 98% pro stroje středních výkonů, dále má minimální náklady na údržbu oproti motorům, protože nemá pohyblivou část.

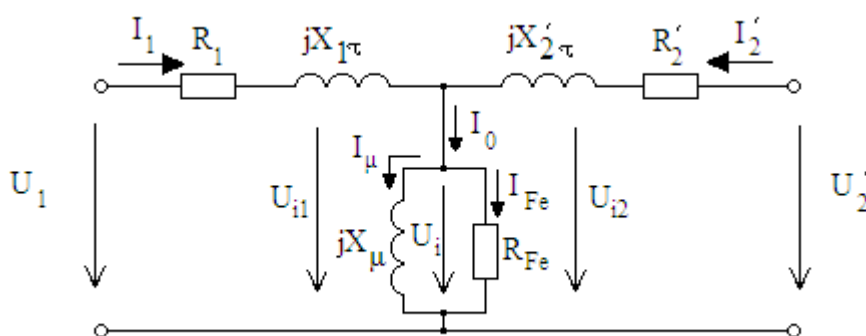
Hlavními částmi transformátorů jsou magnetický obvod a vinutí. Magnetický obvod je složen z izolovaných plechů, do jejichž struktury byl přidán křemík, který omezuje ztráty v železe.

Po připojení primárního vinutí ke zdroji a rozpojení sekundárního vinutí začne proud $i(t)$ budit magnetický tok $\phi(t)$. Uzavřený magnetický tok má dvě složky:

- hlavní tok $\phi_{lh}(t)$, který zajišťuje magnetickou vazbu mezi primární a sekundární stranou, a také přenos energie,
- rozptylový tok $\phi_{1r}(t)$, který se uzavírá pouze kolem primárního vinutí a nepodílí se tak na přenosu energie.

Lze určit vztah:
$$\phi_1(t) = \phi_{lh}(t) + \phi_{1r}(t) \quad (4.1)$$

Jednotlivým složkám magnetického toku odpovídají reaktance nebo spíše indukčnosti, u kterých platí: $X_h > X_r$.



Obr. 4.1 Náhradní schéma transformátoru. [5]

Hodnoty na sekundární straně s čárkou jsou převedeny na stranu primární (schéma platí pro transformátor s převodem 1).

Převod transformátoru, mezi skutečnými a převedenými veličinami platí vztahy:

$$U'_2 = p \cdot U_2 \quad I'_2 = \frac{1}{p} \cdot I_2 \quad Z'_2 = p^2 \cdot Z_2$$

kde: U_2, I_2, Z_2 - hodnoty sekundárního vinutí pro převod transformátoru 1;

p – převod transformátoru;

U'_2, I'_2, Z'_2 - hodnoty sekundárního vinutí pro různý převod transformátoru.

4.2 Ztráty v transformátorech

Transformátory mají ztráty dvojího druhu, a to naprázdno a nakrátko stejně jako měření, které se provádí na transformátorech.

Měření nakrátko lze přesně vyčíslit při vyzkratovaném sekundárním vinutí transformátoru. Cílem je změřit napětí nakrátko, které charakterizuje impedanci nakrátko. To ovlivňuje i průběh účinníku a průběh ztrát nakrátko.

Ztráty nakrátko jsou dány:

- ztrátami Jouleovými, které jsou velké, protože vinutím protéká jmenovitý proud,
- ztrátami přídavnými, které zahrnují ztráty vlivem skinefektu,
- ztráty v železe, jelikož magnetický obvod není nasycen, jsou skoro zanedbatelné.

Ztráty nakrátko:
$$\Delta P_k = \Delta P_d + \Delta P_{jk} \quad (4.2)$$

Pro ztráty Jouleovy platí:
$$\Delta P_{jk} = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (4.3)$$

Měření naprázdno se určí při rozpojeném sekundárním vinutí (naprázdno). Veškerý příkon slouží ke krytí ztrát naprázdno. Úkolem je určení ztrát v magnetickém obvodu a ve vinutí, který se měří proudem naprázdno při jmenovitém napětí.

Ztráty naprázdno jsou dány:

- ztrátami v železe, které se rozlišují na ztráty vířivými proudy, jež jsou dány objemem a magnetickou vodivostí transformátorových plechů (jsou magneticky nasycené), a na ztráty hysterezní, ty jsou dány magnetickou tvrdostí transformátorových plechů a napájecí frekvencí,
- ztrátami Jouleovými, které jsou oproti ztrátám v železe zanedbatelné.

Ztráty naprázdno:
$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0} \quad (4.4)$$

$$\text{Pro ztráty Jouleovy platí: } \Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (4.5)$$

$$\text{Pro ztráty v železe platí: } \Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Platí: } \Delta P_{FeV} &\approx U^2, f^2 \\ \Delta P_{FeH} &\approx U^2, f \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.3 Paralelní chod transformátorů

Paralelní chod transformátorů se dělí na:

- krátkodobý provoz, kdy jeden z transformátorů není ve stálém provozu a slouží jen k záloze při výpadku druhého z transformátorů. Výhoda jednoho transformátoru je velká impedance a tedy i omezení zkratového proudu. Nevýhoda je nutnost přepnout druhý transformátor při výpadku.
- trvalý provoz, kdy oba transformátory běží současně a při výpadku slouží druhý transformátor k náhradě. Výhoda paralelního chodu je okamžité zálohování při výpadku jednoho z transformátorů. Nevýhodou je menší impedance paralelních transformátorů a tedy i větší zkratové proudy.

Oba transformátory by měly mít dostatečný výkon pro případnou náhradu a při výpadku jednoho z transformátorů.

Při výpadku jednoho z transformátorů by měl mít záložní transformátor takový výkon, aby pokryl dodávku 1. a 2. stupně zabezpečení.

Podmínky trvalého chodu transformátorů:

- stejná vstupní a výstupní napětí, tj. stejný převod a fázový posuv tj. stejný hodinový úhel,
- přibližně stejné napětí nakrátko,
- nutné nepřekročit I_k , pro který je zařízení dimenzováno,
- poměr jmenovitých výkonů nejvýše 1:2.

Využití skupiny paralelně pracujících transformátorů:

$$\chi = \frac{P_1 + P_2 \cdot \frac{u_{k1}}{u_{k2}} + P_3 \cdot \frac{u_{k1}}{u_{k3}} + \dots}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots} \quad (4.8)$$

kde: u_{kl} - je nejnižší hodnota napětí nakrátko ve skupině transformátorů;

Pro krátkodobý paralelní chod jsou některé podmínky o něco mírnější (u_k, S_n).

Pro výpočet vhodného zapojení paralelních transformátorů se musí nejdříve určit přechodový výkon, který se stanoví:

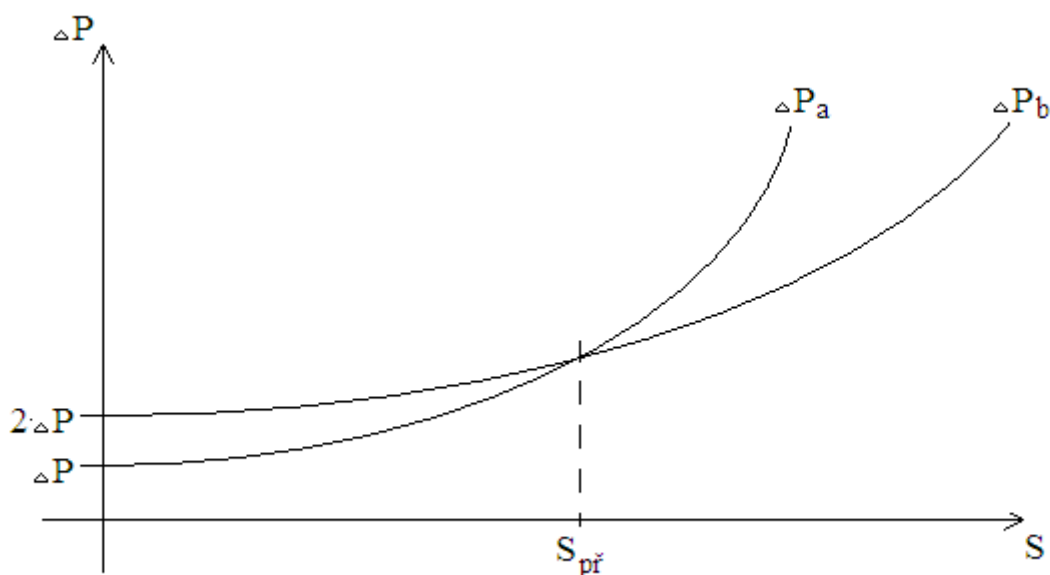
$$S_{př} = S_n \cdot \sqrt{(n^2 + n) \cdot \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k}} \quad (4.9)$$

kde: n - počet transformátorů v provozu;

ΔP_0 - ztráty naprázdno, které jsou dané na rok;

ΔP_k - ztráty nakrátko, které jsou také dané na rok;

S_n - jmenovitý výkon transformátoru;



Obr. 4.2 Grafické znázornění přechodového výkonu transformátoru.

Zatížitelnost transformátoru by měla ideálně být 60 ÷ 70% svého jmenovitého výkonu.

Jestliže přechodový výkon je větší než námi přenášený výkon, je výhodné použít jednotlivý transformátor se zálohovým transformátorem, protože použitím paralelní kombinace by byly ztráty naprázdno dvojnásobné a ztráty nakrátko v poměru kvadrátů výkonů, z toho plyne nákladnější provoz.

Pakliže je přechodový výkon menší než námi přenášený výkon, vyplatí se buď použít současný chod dvou transformátorů, nebo užití většího výkonu jednotlivého transformátoru.

Vyčíslení ztrát pro různé varianty:

a) jeden transformátor v provozu

$$\Delta P_a = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \quad (4.10)$$

b) paralelní provoz dvou transformátorů

$$\Delta P_b = 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

4.4 Ekonomické zhodnocení transformátorů

- vychází se: z investičních nákladů
z provozních nákladů
- ztráty závisí na činných ztrátách transformátoru
- ekonomická výhodnost se obvykle počítá na dobu 5-7 let

Celkové náklady:

$$N = C + \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \right] \cdot 24 \cdot 365 \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k \quad (4.12)$$

kde: C – cena transformátoru

n – doba vyhodnocovacího období

k – roky

ΔP_0 – ztráty naprázdno

ΔP_k – ztráty nakrátko

B – cena za 1kWh elektrické energie

d – průměrný roční nárůst ceny elektrické energie v %

e – inflační míra v %

[2] [5]

5 Kontrola napěťových poměrů při rozběhu

Uvažuje se rozběh největšího motoru v průmyslovém objektu, protože se bere nejhorší stav, který může nastat. Dále bereme všechny ostatní spotřebiče v provozu a hlídáme zatížení hlavního transformátoru, rozběhy motorů bývají do minuty a neměly by přesáhnout přetížení 125% jmenovitého výkonu transformátoru. Kontrola změny napětí je dána změnou napětí na transformátoru způsobeným rozbíhajícím se rotorem. Změna napětí v distribuční síti nesmí překročit 3%, v ostatních případech pouze 6% (pro rozběhy několikrát denně). V síti vn je změna napětí 2%, v ostatních případech do 4%, pokud se překročí, musí se zvolit jiný způsob rozbíhání motoru, aby se snížila impedance sítě nebo transformátor s nižší impedancí.

Základní podmínka:
$$S_p < S_{NT} \quad (5.1)$$

Změna zatížení transformátoru při rozběhu:
$$S_{mr} \cong i_k \cdot S_m \quad (5.2)$$

Kontrola změny napětí:
$$\Delta U_f = R_T \cdot I_T \cdot \cos \varphi + X_T \cdot I_T \cdot \sin \varphi \quad (5.3)$$

Výpočet odporu a reaktance rozbíhajícího motoru:
$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{NT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} \quad (5.4)$$

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} \quad (5.5)$$

Rozběhový proud:
$$I_r = i_k \cdot I_N = i_k \cdot \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (5.6)$$

[2]

6 Dimenzování kabelů a lan

Při dimenzování průřezu proudových částí budeme nejdříve navrhovat průřezy daného vodiče pro protékající proudy a zároveň podle dovolené provozní teploty izolace a poté kontrolovat úbytky napětí a oteplení zkratovými proudy.

6.1 Dimenzování dle dovoleného proudového zatížení vodiče

Jelikož podmínky, které jsou zadány, nejsou podmínky základní, musíme nalézt konstanty v normě, které nám umožní přepočítat na základní podmínky. Konstanta k_1 - charakterizuje měrný teplotní odpor půdy, k_2 - průměrnou teplotu okolní půdy, k_3 - způsob uložení kabelů.

Z výkonu spotřebiče se výpočtem určí proud, který bude vodičem protékat.

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (6.1)$$

Poté se aplikují vybrané konstanty pro výpočet jmenovitého proudu daného základního prostředí:

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_N \geq I_p \quad (6.2)$$

kde: I_N – jmenovitý proud vodiče;

I_p – provozní proud vodiče;

I_{dov} – dovolený provozní proud vodiče;

Dále se z katalogu výrobce vyhledá průřez S [mm²] pro dané I_N .

6.2 Kontrola na dovolený úbytek napětí

Kontrola na dovolený úbytek napětí se určí ze zvolených parametrů průřezu vodiče. Dovolený úbytek napětí by měl být menší jak 5%. Když kontrola na dovolený úbytek nevyjde, musí se zvolit větší průřez kabelu nebo navrhnout jiný materiál vodiče.

Úbytek napětí se vypočte:

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi \quad (6.3)$$

kde: R_k – odpor vodiče na 1 km;

X_k – reaktance vodiče na 1 km;

l – délka vodiče;

I_p – provozní proud vodiče;

Poté se procentně určí:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_f \cdot \sqrt{3}}{U_n} \cdot 100 \quad (6.4)$$

A musí platit podmínka:

$$\Delta u_{\%} \leq \Delta u_{\% DOV} (\leq 5\%) \quad (6.5)$$

6.3 Kontrola na oteplení zkratovými proudy

Nejčastější poruchou, která je v sítích, je zkrat. Velikost zkratového proudu záleží na vzdálenosti od zdroje elektrické energie. Aby se nemusel počítat celý obvod od zdroje až ke zkratu udává se tzv. zkratový výkon sítě nebo také zkratový proud sítě. Kontrola na oteplení zkratovými proudy se určuje z tohoto vzorce:

$$S \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \quad (6.6)$$

kde: I_{ke} – ekvivalentní oteplovací proud;

t_k – maximální doba trvání zkratu;

K – konstanta;

Ekvivalentní oteplovací proud se vypočte:

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k \quad (6.7)$$

kde: k_e – konstanta, která záleží na místě zkratu a době trvání zkratu;

I_k – rázový zkratový proud, který obvodem protéká při zkratu;

Konstanta K se dá přesně vypočítat nebo se také dá přibližně vyčíst z tabulek pro daný materiál. Konstanta se vypočte:

$$K = \sqrt{\frac{c_0 \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{(\vartheta_f + \vartheta_K)}{(\vartheta_f + \vartheta_I)}} \quad (6.8)$$

kde: c_0 – specifické teplo;

ρ_{20} – měrný odpor při 20°C;

ϑ_f – fiktivní teplota;

ϑ_K – dovolená teplota při zkratu;

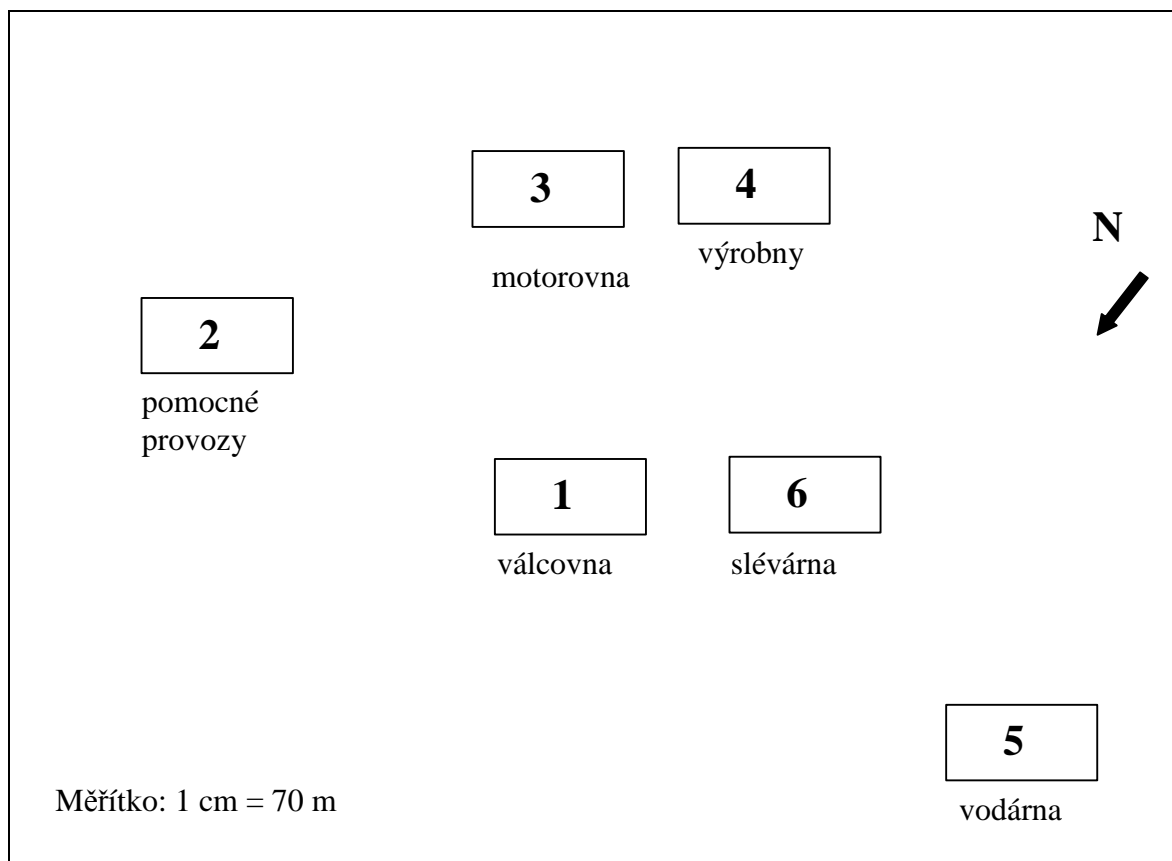
ϑ_I – dovolená provozní teplota;

[6]

7 Zadání

Návrh rozvodné sítě se provádí pro závod slévárny, která má danou infrastrukturu, výkony spotřebičů a umístění objektů v dispozičním řešení závodu. Úkolem je tedy navrhnout rozvodnou síť, vykompenzování jalového výkonu, počty a výkony transformátorů a nadimenzovat přívodní vodiče do objektů.

Dispoziční řešení provozů závodu



Napájení v místě N z veřejné rozvodny 22 kV ($S''_k = 350$ MVA) vzdálené od N 10 km.

Spotřebiče: vn - motory 6 kV

nn - 3fázové, většinou motory 400 V

Druh provozu: třisměnný provoz

noční odběr vn ... 30%

nn ... 50%

Ztráty v rozvodech: 10%

Rezerva výkonu napájecích transformátorů min. 15%

Kabely uložené v zemi: přímo těsně vedle sebe, měrný teplotní odpor půdy 1,5 Km/W, průměrná teplota půdy 25°C.

Soupis spotřebičů

Číslo spotř.	Číslo objektu	Skupina spotřebičů	Počet spotř.	Zadané údaje o spotřebičích	Využití motoru	Soudobost	B	Napětí	
1	1	Motory vn	Σ	$S_i = 1200 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_{stř} = 0,7$, $\eta = 0,94$	_____	___	0,70	6 kV	
2		Osvětlení	Σ	$S_i = 200 \text{ kVA}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	_____	___	0,80	nn	
3	2	Motory nn	Σ	$P_i = 1400 \text{ kW}$, $Q_i = 900 \text{ kVAr}$, $\eta = 0,80$	_____	___	0,50	nn	
4		Pomocné provozy	Osvětlení	Σ	$S_i = 64 \text{ kVA}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	_____	___	0,70	nn
5	3	Motory vn	3	$S_n = 400 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_n = 0,89$ $I_{jo} = 12,7 \text{ A}$, $\eta = 0,90$ $I_r/I_n = 5$, $\cos\varphi_r = 0,3$ $M_z/M_n = 0,8$, $M_{max}/M_n = 2,5$	85%	0,66	___	6 kV	
6		Osvětlení	Σ	$P_i = 200 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	-----	-----	0,80	nn	
7	4	Motory nn	Σ	$P_i = 1300 \text{ kW}$, $Q_i = 900 \text{ kVAr}$, $\eta = 0,80$	_____	___	0,70	400 V	
8		Výrobní	Osvětlení	Σ	$P_i = 150 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	-----	-----	0,80	nn
9	5	Motory vn	4	$S_n = 140 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_n = 0,65$, $I_{jo} = 6,3 \text{ A}$, $\eta = 0,90$	75%	0,75	___	6 kV	
10		Vodárna	Motory nn	Σ	$S_i = 400 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_{stř} = 0,72$ $\eta = 0,80$	_____	___	0,50	nn
11			Osvětlení	Σ	$P_i = 100 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	-----	-----	0,80	nn
12	6	Tavicí zařízení	2	$S_n = 2200 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_n = 0,9$, $\eta = 0,90$	95%	0,50	___	6 kV	
13		Slévárna	Osvětlení	Σ	$P_i = 200 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0,90$	-----	-----	0,80	nn

Zadání:

- Stanovte požadovaný stupeň zabezpečení dodávky pro jednotlivé skupiny spotřebičů (viz. ČSN 34 1610).
- Navrhnete schéma napájení cementárny (umístění vstupní rozvodny, umístění podružných rozvoden a transformoven, počty transformátorů a typ sítě s ohledem na zabezpečení dodávky elektrické energie podle stanovených stupňů zabezpečení dodávky), záložní vedení a záložní transformátory kreslete čárkovaně. Zakreslete do dispozičního schématu umístění trafostanic a trasy kabelových vedení. Nakreslete schéma napájení.
- Stanovte výpočtové zatížení P_p jednotlivých navržených rozvoden, resp. transformoven. Uvažujte dva režimy provozu: denní a noční směna (oba bez zahrnutí a se zahrnutím kompenzace účinníku, zhodnoťte přínos kompenzace).

- Stanovte počty a výkony transformátorů s ohledem na spolehlivost dodávky, na měnící se odběrem při denní a noční směně a hospodárnost provozu. V případě paralelního chodu transformátorů zkontrolujte podmínky paralelního chodu.
- Navrhňte kompenzaci účinníku. Vypočítejte potřebný kompenzační výkon pro skupinovou kompenzaci na účinník alespoň 0,95. Výkony kompenzačních kondenzátorů volte podle katalogu některého z výrobců. Při návrhu počtu a velikosti stupňů zohledněte velikost potřebného kompenzačního výkonu pro noční směnu. Motory vn větších výkonů kompenzujte individuálně.
- Zkontrolujte napěťové poměry při rozběhu největšího motoru vn a zkontrolujte, zda při rozběhu motoru není napájecí transformátor nedovoleně přetížen (nad 125%).
- Vypočítejte zkratové poměry (velikost I''_k a S''_k) na podružných rozvodnách (rozvaděčích) R6.
- Navrhňte průřezy napájecích vedení v průmyslovém závodě (kabely 6 kV) a průřez připojovacího vedení 22 kV k veřejné distribuční síti.
- Vyčíslete činné a jalové ztráty v rozvodné soustavě (v transformátorech a vedeních) pro denní směnu. Pro jednoduchost uvažujte během směny konstantní zatížení. Pro vámi zvolený tarif vyčíslete roční provozní náklady (pouze na základě ztrát v rozvodu).

8 Výpočty a tabulky

8.1 Určení stupně zabezpečení dodávky

Určení stupňů zabezpečení dodávky se dělá dle normy ČSN 34 1610, kde se dle daného vybavení objektů určí jistý stupeň zabezpečení dodávky.

Tabulka 8.1 Objekty a příslušný stupeň důležitosti odběru.

Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Skupina spotřebičů	Stupeň zabezpečení dodávky
1	1. Válcovna	motory vn	2
2		Osvětlení	3
3	2. Pomocné provozy	motory nn	3
4		Osvětlení	3
5	3. Motorovna	motory vn	2
6		Osvětlení	3
7	4. Výrobný	motory nn	2
8		Osvětlení	3
9	5. Vodárna	motory vn	3
10		motory nn	3
11		Osvětlení	3
12	6. Slévárna	tavící zařízení	1
13		Osvětlení	3

8.2 Výpočtové zatížení

8.2.1 Výpočet nebo určení součinitele náročnosti

Součinitelé náročnosti nejsou určeny z tabulek normy ČSN 34 1610, protože jsou pro dané provozovny buď součinitelé určeny přímo, nebo jsou dle vzorce 2.2 vypočteny.

Ukázka výpočtu součinitele náročnosti pro objekt č. 3 Motorovna.

Zadané hodnoty:

$$k_s = 85\% \Rightarrow 0,85;$$

$$k_z = 0,66;$$

$$\eta_s = 0,9;$$

$$\eta_m = 0,9;$$

Dosazení a výpočet podle vzorce 2.2:

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s} = \frac{0,85 \cdot 0,66}{0,9 \cdot 0,9} = 0,693$$

U ostatních spotřebičů byly hodnoty β spočteny obdobně a jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 8.2 Znamé nebo vypočtené součinitele náročnosti.

Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Skupina spotřebičů	Součinitel náročnosti
1	1. Válcovna	motory vn	0,7
2		osvětlení	0,8
3	2. Pomocné provozy	motory nn	0,5
4		Osvětlení	0,7
5	3. Motorovna	motory vn	0,693
6		Osvětlení	0,8
7	4. Výrobný	motory nn	0,7
8		Osvětlení	0,8
9	5. Vodárna	motory vn	0,694
10		motory nn	0,5
11		Osvětlení	0,8
12	6. Slévárna	tavící zařízení	0,586
13		Osvětlení	0,8

8.2.2 Výpočtové zatížení

Výpočtové zatížení je stanoveno ze skupiny trojfázových motorů pro jednotlivé provozovny, které byly převzaty z tabulky 8.2.

Ukázka výpočtu výpočtového zatížení pro objekt č. 3 Motorovna.

Zadané nebo vypočtené hodnoty pro trojfázové motory: 3 kusy motorů;

Pro 1 motor:

$$S_n = 400 \text{ kVA};$$

$$\cos \varphi_n = 0,89 \quad \Rightarrow \quad \sin \varphi_n = 0,456;$$

$$\beta = 0,693;$$

$$U = 6 \text{ kV};$$

Dosazení a vypočtení podle vzorce 2.3 pro zdánlivý, činný a jalový výkon.

$$S_p = 3 \cdot S_n \cdot \beta = 3 \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 0,693 = 831,6 \text{ kVA}$$

$$P_p = S_p \cdot \cos \varphi = 831,6 \cdot 10^3 \cdot 0,89 = 740,1 \text{ kW}$$

$$Q_p = S_p \cdot \sin \varphi = 831,6 \cdot 10^3 \cdot 0,456 = 379,2 \text{ kVAr}$$

V dalším kroku je proveden výpočet dle vzorce 2.5 s cílem určit celkový proud potřebný pro objekt.

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{740,1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,89} = 80 \text{ A}$$

Pro jednofázový spotřebič se také hodnoty β odečetly z tabulky 8.2.

Zadané hodnoty pro jednofázové osvětlení:

$$P_i = 200 \text{ kW};$$

$$\cos \varphi = 1;$$

$$\beta = 0,8;$$

$$U = 0,4 \text{ kV};$$

Výpočet vychází ze vzorce 2.3.

$$P_{po} = P_i \cdot \beta = 200 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 160 \text{ kVA}$$

$$Q_{po} = S_{po} \cdot \sin \varphi = 160 \cdot 10^3 \cdot 0 = 0 \text{ kVAr}$$

Pro jednofázový spotřebič je použit vzorec 2.6.

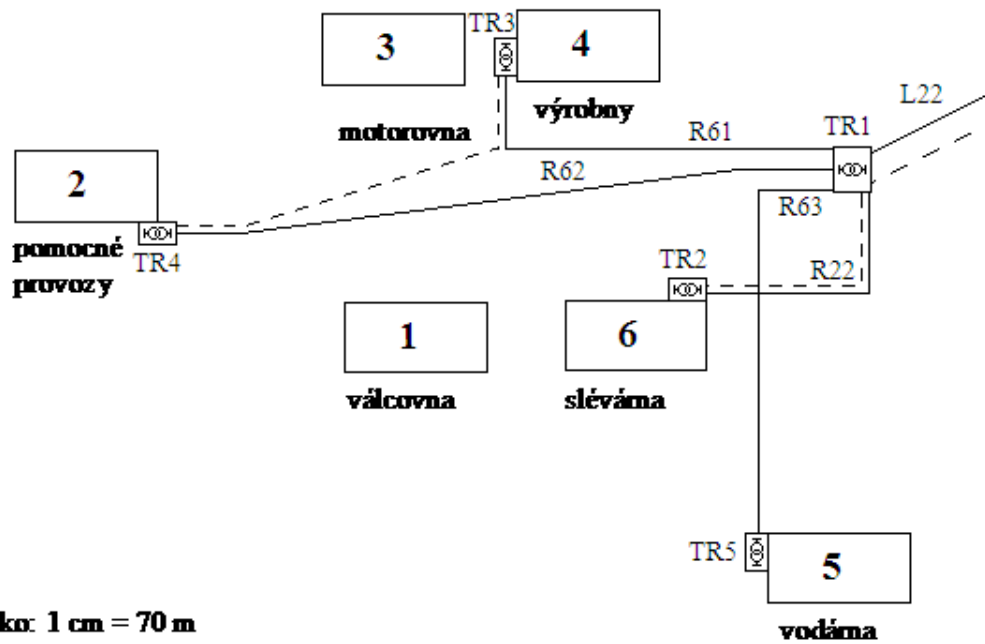
$$I_{po} = \frac{\sqrt{3} \cdot P_{po}}{U_s} = \frac{\sqrt{3} \cdot 200 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 693 \text{ A}$$

U ostatních spotřebičů byly hodnoty výkonů, proudů a účinnků spočteny obdobně a jsou shrnuty v následující tabulce 8.3.

Tabulka 8.3 Výpočet výpočtového zatížení.

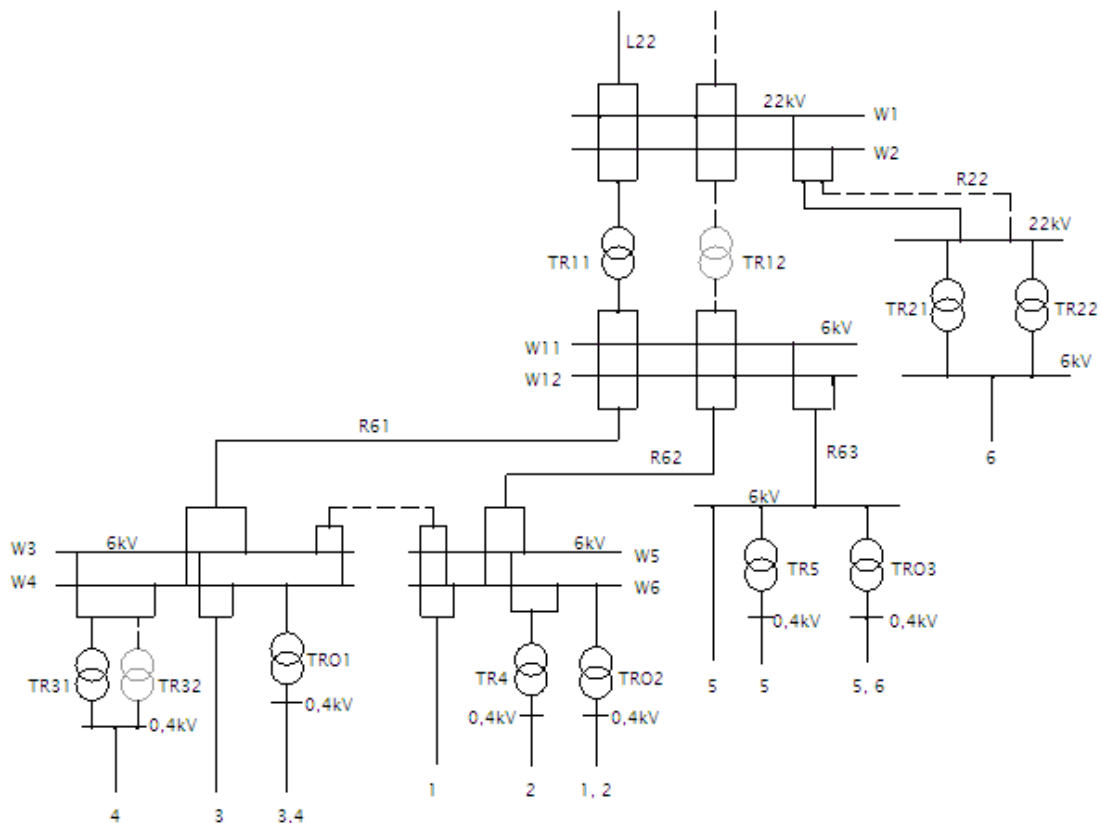
Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Napětí spotřebičů	Činný výkon P_p [kW]	Jalový výkon Q_p [kVAr]	Zdánlivý výkon S_p [kVA]	Proud spotřebiče I_p [A]	Účinník $\cos \varphi$ [-]
1	1. Válcovna	6kV	588	600	840	81	0,7
2		0,4kV	160	0	160	693	1
3	2. Pomocné provozy	0,4kV	700	450	832,2	1202	0,841
4		0,4kV	44,8	0	44,8	194	1
5	3. Motorovna	6kV	740,1	379,2	831,6	80	0,89
6		0,4kV	160	0	160	693	1
7	4. Výrobný	0,4kV	910	630	1107	1598	0,822
8		0,4kV	120	0	120	520	1
9	5. Vodárna	6kV	252,7	296	389	37,5	0,65
10		0,4kV	144	139	200	289	0,72
11		0,4kV	80	0	80	347	1
12	6. Slévárna	6kV	2322	1125	2580,2	249	0,9
13		0,4kV	160	0	160	693	1

Ze zadaných nebo vypočtených hodnot je stanoven návrh rozvodné sítě obr. 8.1, dále se bude ověřovat vyhovující zapojení a počítávat další součásti rozvodné sítě.



Obr. 8.1 Navržené zapojení objektů v závodě.

8.3 Jednopolové schéma závodu



Obr. 8.2 Jednopolové schéma rozvodu.

8.4 Kompenzace účinníku

Na hladině vn byla dána přednost jednotlivé kompenzaci a pro hladinu nn se spíše volila skupinová kompenzace. Pouze když nebylo možné splnit jednotlivou kompenzaci na vn kompenzovalo se skupinově. Volené kompenzátorové baterie jsou nechráněné a neregulovatelné kondenzátory.

8.4.1 Jednotlivá kompenzace

Při jednotlivé kompenzaci se vychází z příkonu motoru a soudobosti. Při návrhu jednotlivé kompenzace se musí vycházet ze ztrát motoru naprázdno, aby při odlehčení motoru nebyla síť překompenzována.

Ukázka kompenzace pro trojfázové motory vn v objektu č. 3 Motorovna.

Zadané hodnoty pro: 3kusy motorů;

Výpočet pro 1 motor, ostatní motory jsou stejné.

$$S_n = 400kVA;$$

$$\cos \varphi = 0,89 \quad \Rightarrow \quad \sin \varphi = 0,456;$$

$$I_{jo} = 12,7A; \quad \eta_m = 0,9;$$

$$k_z = 85\% \Rightarrow 0,85; \quad U = 6kV;$$

$$P_n = S_n \cdot \cos \varphi = 400 \cdot 10^3 \cdot 0,89 = 356kW$$

$$Q_n = S_n \cdot \sin \varphi = 400 \cdot 10^3 \cdot 0,456 = 182,4kVAr$$

Účinník motoru před kompenzací:

$$\cos \varphi_n = 0,89 \quad \Rightarrow \quad \tan \varphi_n = 0,5123$$

Očekávaný účinník po kompenzaci:

$$\cos \varphi_k = 0,96 \quad \Rightarrow \quad \tan \varphi_k = 0,2917$$

- pro jeden motor:

$$Q_{jo} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{jo} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 12,7 = 132kVAr$$

$$Q_{kom} \leq 0,9 \cdot Q_{jo} = 118,8kVAr$$

Volím kompenzační baterii o výkonu 100kVAr na napěťovou hladinu 6kV od firmy EMCOS typ EIK6, která byla vyčtená z tabulky D. 1 v příloze D.

Výpočty kontroly jednotlivé kompenzace:

$$P_p = k_z \cdot \frac{P_n}{\eta_m} = 0,85 \cdot \frac{356 \cdot 10^3}{0,9} = 336,2kVAr$$

$$\Delta Q = \frac{Q_n}{\eta_m} - Q_{jo} = \frac{182,4 \cdot 10^3}{0,9} - 132 = 70,6kVAr$$

$$Q_p = Q_{jo} + \Delta Q \cdot \left(\frac{k_z \cdot P_n}{P_n}\right)^2 = 132 - 70,6 \cdot \left(\frac{0,85 \cdot 356 \cdot 10^3}{356 \cdot 10^3}\right)^2 = 183 \text{ kVAr}$$

$$Q_p' = Q_p - Q_{kom} = 183 - 100 = 83 \text{ kVAr}$$

Vypočtení účinníku po kompenzaci:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_p}{S_p} = \frac{P_p}{\sqrt{P_p^2 + Q_p'^2}} = \frac{336,2}{\sqrt{(336,2 \cdot 10^3)^2 + (83 \cdot 10^3)^2}} = 0,971$$

U spotřebiče č. 9 se kompenzace vypočte obdobně a výsledky jsou shrnuty v následující tabulce. Zapojení kondenzátorových baterií je navrženo na obr. 3.8.

Tabulka 8.4 Velikosti kondenzátorových baterií pro jednotlivou kompenzaci.

Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Počet motorů	Napětí	Velikost komp. baterie pro 1 motor	Typ	Účinník po kompenzaci pro 1 motor
5	3	3 ks	6kV	100 kVAr	EIK 100/1	0,971
9	5	4 ks	6kV	50 kVAr	EIK 050/1	0,86

8.4.2 Skupinová kompenzace

Při skupinové kompenzaci se vychází z výpočtového výkonu, pro který se určí minimální velikosti kondenzátorové baterie, aby dané objekty byly vykompenzovány na požadovaný účinník.

Při počtech je využit vzorec 3.5.

Ukázka kompenzace pro trojfázové motory nn v objektu č. 2 Pomocné provozovny.

Zadané hodnoty:

$$P_i = 1400 \text{ kW};$$

$$Q_i = 900 \text{ kVAr};$$

$$\beta = 0,5;$$

$$U = 0,4 \text{ kV};$$

$$\text{noční zatížení } 50\% \quad \Rightarrow \quad z_n = 0,5;$$

Výpočet ze vzorce 2.3.

$$P_p = P_i \cdot \beta = 1400 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 700 \text{ kW}$$

$$Q_p = Q_i \cdot \beta = 900 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 450 \text{ kVAr}$$

Účinník skupiny motorů před kompenzací:

$$\cos \varphi_{stř} = 0,8412 \quad \Rightarrow \quad \text{tg } \varphi_{stř} = 0,6429$$

Účinník skupiny motorů po kompenzaci:

$$\cos \varphi_k = 0,96 \quad \Rightarrow \quad \operatorname{tg} \varphi_k = 0,2917$$

výpočet:

- pro DEN

$$Q_{kom} = P_p \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{stř} - \operatorname{tg} \varphi_k) = 700 \cdot 10^3 \cdot (0,6429 - 0,2917) = 246 \text{ kVAr}$$

Volím kompenzační baterii o výkonu 300kVAr (12x25kVAr) na napěťovou hladinu 0,4kV od firmy EMCOS typu VARKOM I, která byla vyčtena z tabulky D. 2 v příloze D.

Výpočet účinníku s užitím kompenzátorových baterií přes den.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_p}{S_p} = \frac{700 \cdot 10^3}{\sqrt{(700 \cdot 10^3)^2 + (450 \cdot 10^3 - 300 \cdot 10^3)^2}} = 0,978$$

- pro NOC

$$Q_{kom} = z_n \cdot P_p \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{stř} - \operatorname{tg} \varphi_k) = 0,5 \cdot 700 \cdot 10^3 \cdot (0,6429 - 0,2917) = 110 \text{ kVAr}$$

Volím kompenzační baterii o výkonu 150kVAr (6x25kVAr) na napěťovou hladinu 0,4kV od firmy EMCOS typu VARKOM I, která byla vyčtena z tabulky D. 2 v příloze D.

Výpočet účinníku s užitím několika kompenzátorových baterií pro vykompenzování objektu přes noc.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_p \cdot z_n}{S_p} = \frac{700 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{\sqrt{(700 \cdot 10^3 \cdot 0,5)^2 + \{(450 \cdot 10^3 \cdot 0,5 - 150 \cdot 10^3)\}^2}} = 0,978$$

kde: z_n – noční odběr (vn 30%, nn 50% - viz zadání);

U ostatních spotřebičů byly hodnoty kompenzačních baterií spočteny obdobně a jsou shrnuty v následující tabulce. Zapojení kondenzátorových baterií je podle obr. 3.7.

Tabulka 8.5 Velikosti jednotlivých baterií pro skupinovou kompenzaci.

Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Napětí	Velikost kompenzačních baterií		Účinník po kompenzaci	
			DEN	NOC	DEN	NOC
1	1	6kV	500kVAr (20x25kVAr)	200kVAr (8x25kVAr)	0,986	0,994
3	2	0,4kV	300kVAr (12x25kVAr)	150kVAr (6x25kVAr)	0,978	0,978
7	4	0,4kV	450kVAr (18x25kVAr)	225kVAr (9x25kVAr)	0,981	0,981
10	5	0,4kV	100kVAr (8x12,5kVAr)	50kVAr (4x12,5kVAr)	0,965	0,965

8.4.1 Celkové vykompenzování průmyslového provozu

Vykompenzování průmyslového objektu při denním zatížení je stanoveno sečtením činného a jalového výkonu všech motorů i skupin motorů po kompenzaci a činných výkonů osvětlení jednotlivých objektů.

Tabulka 8.6 Jednotlivé spotřebiče po kompenzaci.

Číslo spotřebiče	Číslo objektu	Skupina spotřebičů	Činný výkon [kW]	Jalový výkon [kVAr]
1	1. Válcovna	motory vn	588	100
2		osvětlení	160	0
3	2. Pomocné provozy	motory nn	700	150
4		osvětlení	44,8	0
5	3. Motorovna	motory vn	740	179,18
6		osvětlení	160	0
7	4. Výrobný	motory nn	910	180
8		osvětlení	120	0
9	5. Vodárna	motory vn	252,78	146
10		motory nn	144	39
11		osvětlení	80	0
12	6. Slévárna	tavící zařízení	2322,22	1124,7
13		Osvětlení	160	0

$$P_p = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + P_{p4} + P_{p5} + P_{p6} + P_{p01} + P_{p02} + P_{p03} + P_{p04} + P_{p05} + P_{p06}$$

$$P_p = 588 + 700 + 740 + 910 + 252,78 + 144 + 2322,22 + 160 + 44,8 + 160 + 120 + 80 + 160$$

$$P_p = 6381,5 \text{ kW}$$

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} + Q_{p4} + Q_{p5} + Q_{p6} = 100 + 150 + 179,18 + 180 + 146 + 39 + 1124,7$$

$$Q_p = 1918,88 \text{ kVAr}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{6381,5^2 + 1918,88^2} = 6663,76 \text{ kVA}$$

Vypočtení celkového účinníku po kompenzaci, kromě kompenzace objektu č. 6 slévárna, kde je vznik vyšších harmonických.

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{S_p} = \frac{6381,5}{6663,76} = 0,958$$

Průmyslový objekt je přes den vykompenzován v rámci tolerance, která je $\cos \varphi = 0,95$ až 1. Při nedodržení tohoto pásma tolerance se platí penále, které je stanoveno procentem z ceny elektrické energie.

8.5 Stanovení počtu transformátorů

Velikost transformátoru se určí dle zdánlivého výkonu, který je jím přenášen. Dále se nepočítá s hodnotami kompenzace z tabulky 8.6, ale berou se všechny asynchronní motory i elektrická pec vykompenzované na $\cos \varphi = 0,96$.

Ukázka určení velikosti transformátoru TR2, který spojuje provozovnu č. 6 slévárnu, která má stupeň zabezpečení 1.

Výkon přenášený přes den: $S_{p2} = 2419kVA$;

Výkon přenášený přes noc: $S_{p2} = 725,7kVA$;

Pro denní zatížení se volí současný chod transformátorů $S_{pN} = 2500kVA$ z hladiny 22 kV na hladinu 6 kV.

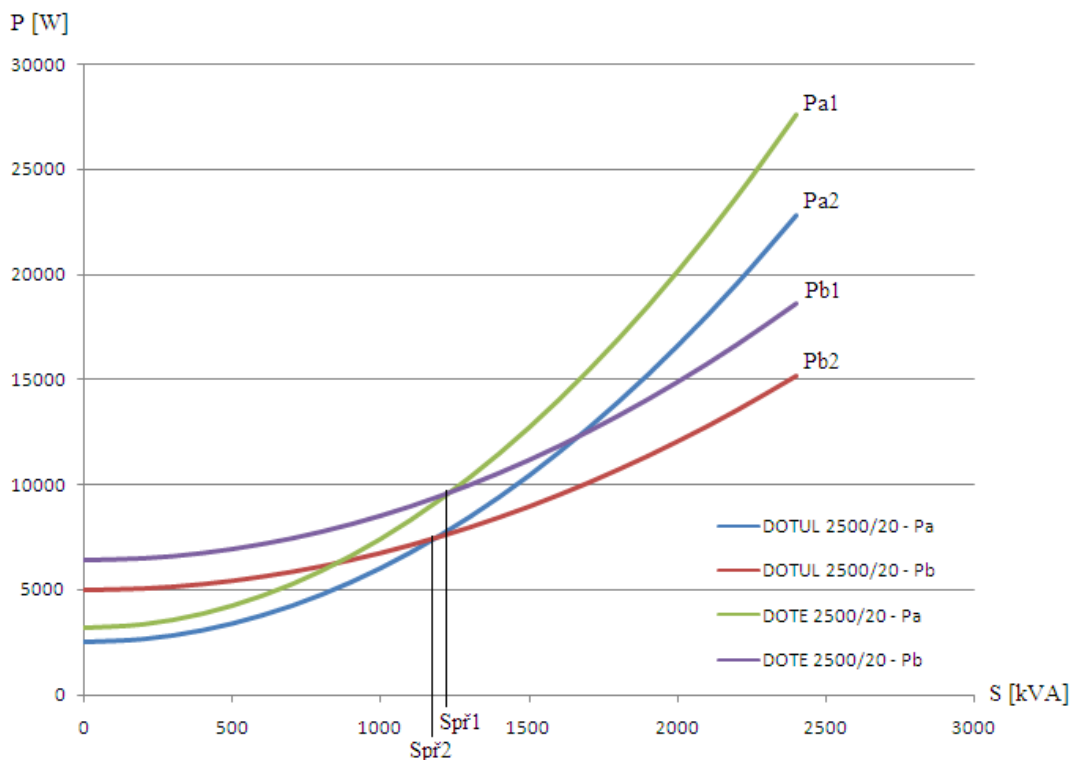
Z tabulky o transformátorech je vybrán pro výkon varianta DUTE 2500/20 a srovnána s DOTUL 2500/20 o stejném výkonu. Hodnoty ΔP_k a ΔP_0 jsou brány z přílohy A, tabulky A.1. Určení přechodového zdánlivého výkonu ze vzorce 4.9, který ukáže výhodnost zapojení transformátorů.

Výpočet přechodového výkonu pro typ transformátoru DOTE 2500/20.

$$S_{př1} = S_{pN} \cdot \sqrt{(n^2 + n) \cdot \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k}} = 2500 \cdot \sqrt{(1^2 + 1) \cdot \frac{3200}{26500}} = 1228,6kVA \approx 49\%$$

Výpočet přechodového výkonu pro typ transformátoru DOTUL 2500/20.

$$S_{př2} = S_{pN} \cdot \sqrt{(n^2 + n) \cdot \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k}} = 2500 \cdot \sqrt{(1^2 + 1) \cdot \frac{2500}{22000}} = 1191,83kVA \approx 47,7\%$$



Obr. 8.3 Grafické znázornění přechodového výkonu transformátorů DOTUL 2500/20 a DOTE 2500/20.

Pro přenášený výkon se vyplatí v obou variantách současný chod dvou transformátorů.

Dále se provede výpočet podle vzorce 4.11 vyčíslení ztrát pro současný chod dvou transformátorů.

Transformátor typu DOTE 2500/20.

$$P_b = 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] = 2 \cdot \left[3200 + 26500 \cdot \left(\frac{2419/2}{2500} \right)^2 \right] = 18805,3W$$

Transformátor typu DOTUL 2500/20.

$$P_b = 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] = 2 \cdot \left[2500 + 22000 \cdot \left(\frac{2419/2}{2500} \right)^2 \right] = 15298,7W$$

Tento výpočet ukazuje na výhodnost zapojení dvou současných transformátorů typu DOTUL 2500/20. Tato výhodnost bude ověřena ekonomickým zhodnocením, které je počítáno podle vzorce 4.12.

Ekonomické zhodnocení dvou současně zapojených transformátorů jsou hodnoty z přílohy A tabulky A.1, z nichž dosazujeme pro typ DOTE 2500/20.

$$C = 823.872 \text{ Kč};$$

$$B = 3,15 \text{ Kč za } 1 \text{ kWh};$$

$$d = 5 \%; \quad e = 2,5 \%; \quad k = 1-7 \text{ let};$$

$$N = 2 \cdot \left\{ C + \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k \right\}$$

$$N = 2 \cdot \left\{ 823.872 + \sum_{k=1}^n \left[3.200 + 26.500 \cdot \left(\frac{2.419/2}{2.500} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{5}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{2,5}{100} \right)^k \right\}$$

$$N = 4.110.893,3 \text{ Kč}$$

Dosažení pro typ DOTUL 2500/20.

$$C = 1.006.320 \text{ Kč};$$

$$B = 3,15 \text{ Kč za } 1 \text{ kWh};$$

$$d = 5 \%; \quad e = 2,5 \%; \quad k = 1-7 \text{ let};$$

$$N = 2 \cdot \left\{ C + \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k \right\}$$

$$N = 2 \cdot \left\{ 1.006.320 + \sum_{k=1}^n \left[2.500 + 22.000 \cdot \left(\frac{2.419/2}{2.500} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{5}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{2,5}{100} \right)^k \right\}$$

$$N = 4.016.493,8 \text{ Kč}$$

Pro denní zatížení vychází podle ekonomického zhodnocení lépe společný chod transformátorů typu DUTE 2500/20.

Pro noční zatížení je doporučen současný chod transformátorů $S_{pN} = 2500 \text{ kVA}$.

Z tabulky o transformátorech je vybrán pro výkon varianta DUTE 2500/20 a srovnána s DOTUL 2500/20 o stejném výkonu. Hodnoty ΔP_k a ΔP_0 jsou brány z přílohy A, tabulky A.1.

Určení přechodového zdánlivého výkonu ze vzorce 4.9, který je stejný jako pro denní zatížení pro transformátor DUTE 2500/20 i pro transformátor DOTUL 2500/20.

Pro přenášený výkon se vyplatí v obou variantách jednotlivý chod transformátoru, ale pro zaručenou a nepřerušovanou dodávku se doporučuje současný chod dvou transformátorů i přes větší ztráty a tedy i dražším provozu přes noc.

Dále se vypočte vyčíslení ztrát pro současný chod dvou transformátorů.

Transformátor typu DUTE 2500/20.

$$P_b = 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] = 2 \cdot \left[3200 + 26500 \cdot \left(\frac{725,7/2}{2500} \right)^2 \right] = 7.516,5W$$

Transformátor typu DOTUL 2500/20.

$$P_b = 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] = 2 \cdot \left[2500 + 22000 \cdot \left(\frac{725,7/2}{2500} \right)^2 \right] = 5.926,9W$$

Tento výpočet ukazuje na výhodnost zapojení dvou současných transformátorů typu DOTUL 2500/20. Tato výhodnost bude ověřena ekonomickým zhodnocením, které je počítáno podle vzorce 4.12.

Ekonomické zhodnocení dvou současně zapojených transformátorů jsou hodnoty z přílohy A tabulky A.1, z nichž dosazujeme pro typ DUTE 2500/20.

$$B = 3,15 \text{ Kč za } 1 \text{ kWh};$$

$$d = 5 \%; \quad e = 2,5 \%; \quad k = 1-7 \text{ let};$$

$$N = \sum_{k=1}^n 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k =$$

$$N = \sum_{k=1}^n 2 \cdot \left[3.200 + 26.500 \cdot \left(\frac{725,7/2}{2.500} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{5}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{2,5}{100} \right)^k =$$

$$N = 1.969.061,9 \text{ Kč}$$

Stejné dosazení pro typ DOTUL 2500/20.

$$B = 3,15 \text{ Kč za } 1 \text{ kWh};$$

$$d = 5 \%; \quad e = 2,5 \%; \quad k = 1-7 \text{ let};$$

$$N = \sum_{k=1}^n 2 \cdot \left[\Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S/2}{S_n} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k =$$

$$N = \sum_{k=1}^n 2 \cdot \left[2.500 + 22.000 \cdot \left(\frac{2.419/2}{2.500} \right)^2 \right] \cdot 12 \cdot 365 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{5}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{2,5}{100} \right)^k =$$

$$N = 1.552.643,2 \text{ Kč}$$

U nočního zatížení vychází podle ekonomického zhodnocení lépe současné spojení dvou transformátorů typu DOTUL 2500/20

Tabulka 8.7 Celkové zhodnocení denního i nočního zatížení.

Pro typy transformátorů	Náklady na zatížení		
	Denní [Kč]	Noční [Kč]	Celkové [Kč]
DOTE 2500/20	4.110.893,3	1,969.061,9	6.079.955,2
DOTUL 2500/20	4.016.493,8	1.552.643,2	5.569.137

Ekonomické zhodnocení, které bylo vypočítáno na 7 let, vyšlo lépe pro současný chod dvou transformátorů typu DOTUL 2500/20, což je i naznačené v tabulce 8.7.

Pro ostatní transformátory byly vypočteny následující hodnoty:

TR1 (22/6kV)

Stupeň zabezpečení dodávky 2.

Hodnoty transformátoru jsou voleny z tabulky A.1 v příloze A.

Pro denní zatížení je výkon $S_P = 4177,36 \text{ kVA}$, noční zatížení je výkon $S_P = 2113,01 \text{ kVA}$.

Denní – volba jednotlivého transformátor typu DOT 6300H/20.

Noční – volba mezi jednotlivými transformátory typu DOTE 2500/20 a DOTUL 2500/20.

Tabulka 8.8 Celkové zhodnocení denního i nočního zatížení pro TR 1.

Pro typy transformátorů	Vyčíslení ztrát	Náklady na zatížení	
	P_a [W]	Denní [Kč]	Noční [Kč]
DOT 6300H/20	23.526,3	5.903.945,6	-
DOTE 2500/20	22.130,8	-	3.640.422,9
DOTUL 2500/20	18.216,1	-	3.121.396,4

Celkové ekonomické zhodnocení je vidět z tabulky 8.8, kdy pro denní provoz je vhodný jednotlivý transformátor typu DOT 6300H/20 a pro noční provoz je vhodný jednotlivý transformátor typu DOTUL 2500/20.

TR3 (6 /0,4 kV)

Stupeň zabezpečení dodávky 2.

Hodnoty transformátoru jsou voleny z tabulky A.2 v příloze A.

Pro denní zatížení je výkon $S_P = 947,94 \text{ kVA}$, noční zatížení je výkon $S_P = 473,97 \text{ kVA}$.

Denní – volba mezi jednotlivý transformátor typu DOTZ 1600/10 nebo DOTUL 1600/10.

Noční – volba mezi jednotlivými transformátory typu DOTE 1250/10 a DOTUL 1250/10.

Tabulka 8.9 Celkové zhodnocení denního i nočního zatížení pro TR 3.

Pro typy transformátorů	Vyčíslení ztrát	Náklady na zatížení	
	P_a [W]	Denní [Kč]	Noční [Kč]
DOTZ 1600/10	9.220,2	1.714.547,4	-
DOTUL 1600/10	6.614,2	1.513.143,3	-
DOTE 1250/10	3.941	-	516.198,2
DOTUL 1250/10	2.931,5	-	383.979,2

Z ekonomického hlediska je vidět, že pro denní provoz se nejlépe hodí jednotlivý transformátor typu DOTUL 1600/10 a pro noční provoz se zase hodí jednotlivý transformátor typu DOTUL 1250/10.

TR4 (6 /0,4 kV)

Stupeň zabezpečení dodávky 3.

Hodnoty transformátoru jsou voleny z tabulky A.2 v příloze A.

Pro denní zatížení je výkon $S_p = 729,17$ kVA, noční zatížení je výkon $S_p = 364,58$ kVA.

Pro denní a noční zatížení je vybíráno mezi jednotlivým transformátorem typu DOTE 1000/10 nebo typu DOTUL 1000/10.

Tabulka 8.10 Celkové zhodnocení denního i nočního zatížení pro TR 4.

Pro typy transformátorů	Vyčíslení ztrát		Náklady na zatížení	
	P_a [W] den	P_a [W] noc	Denní [Kč]	Noční [Kč]
DOTE 1000/10	7.282,7	3.095,6	1.293.154,4	405.477
DOTUL 1000/10	6151	2.362,7	1.247.882,4	309.477

Z ekonomického hlediska je vidět, že pro denní i noční provoz se nejlépe hodí jednotlivý transformátor typu DOTUL 1000/10.

TR5 (6 /0,4 kV)

Stupeň zabezpečení dodávky 3.

Hodnoty transformátoru jsou voleny z tabulky A.2 v příloze A.

Pro denní zatížení je výkon $S_p = 150$ kVA, noční zatížení je výkon $S_p = 75$ kVA.

Pro denní a noční zatížení se volí mezi jednotlivým transformátorem typu DOTN 250/10 nebo typu DOTUL 250/10.

Tabulka 8.11 Celkové zhodnocení denního i nočního zatížení pro TR5.

Pro typy transformátorů	Vyčíslení ztrát		Náklady na zatížení	
	P_a [W] den	P_a [W] noc	denní [Kč]	noční [Kč]
DOTN 250/10	2.046	939	420.703,3	122.993,1
DOTUL 250/10	1.415	672,5	418.513	88.806,1

Z ekonomického hlediska je vidět, že pro denní i noční provoz se nejlépe hodí jednotlivý transformátor typu DOTUL 250/10.

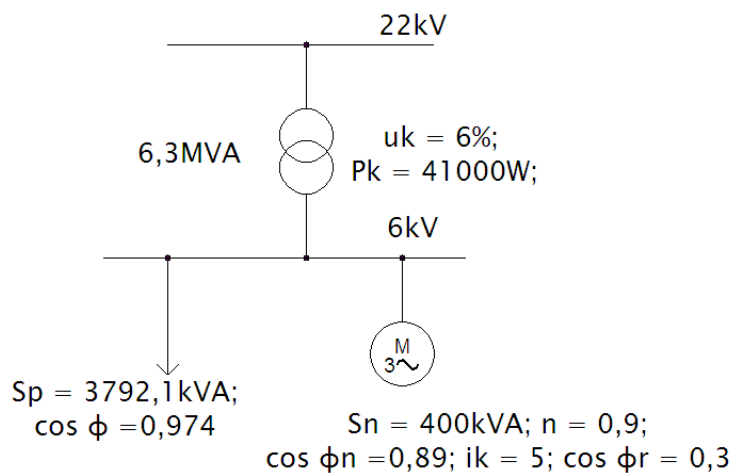
8.6 Kontrola napěťových poměrů při rozběhu největšího motoru

Největší motor se nachází v provozovně č. 3 Motorovna, kde se vychází ze zadání:

$$S_n = 400 \text{ kVA}; \quad \cos \varphi_n = 0,89; \quad \eta = 0,9; \quad \frac{I_r}{I_n} = 5; \quad \cos \varphi_r = 0,3;$$

Ostatní odběry jsou:

$$S_2 = 3789,4 \text{ kVA}; \quad \cos \varphi = 0,974;$$



Obr. 8.4 Zjednodušené schéma při rozběhu motoru.

Výpočet příkonu motoru.

$$S_m = \frac{S_n}{\eta} = \frac{400}{0,9} = 444,44 \text{ kVA}$$

Přibližná kontrola výkonů protékajících transformátorem a splnění podmínky dle vzorce 5.1.

$$S_p = S_2 + S_m = 3792,1 + 444,44 = 4236,54 \text{ kVA} < S_{NT} \approx 67,25\%$$

Výpočet příkonu motoru při rozběhu podle vzorce 5.2.

$$S_{mr} \cong i_k \cdot S_m = 5 \cdot 444,44 = 2222,22 \text{ kVA}$$

Přibližná kontrola výkonů protékajících transformátorem při rozběhu a splnění podmínky ze vzorce 5.1.

$$S_p' = S_2 + S_{mr} = 3792,1 + 2222,22 = 6014,3 \text{ kVA} < S_{NT} \approx 95,5\%$$

Dále bude kontrola změny napětí podle vzorce 5.3, do kterého se musí vypočítat odpor a reaktance rozbíhajícího se motoru podle vzorců 5.4 a 5.5.

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{NT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{41 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^6} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{6,3 \cdot 10^6} = 0,0372 \Omega$$

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{6,3 \cdot 10^6} = 0,343 \Omega$$

Výpočet rozběhového proudu ze vzorce 5.6.

$$I_r = i_k \cdot I_N = i_k \cdot \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 5 \cdot \frac{444,44}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 213,83 \text{ A}$$

Dosazení do vzorce 5.3.

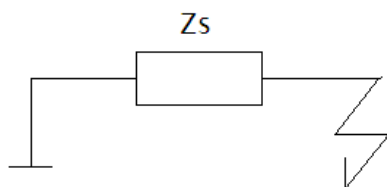
$$\Delta U_f = R_T \cdot I_T \cdot \cos \varphi_r + X_T \cdot I_T \cdot \sin \varphi_r = 0,037 \cdot 213,83 \cdot 0,3 + 0,343 \cdot 213,83 \cdot 0,954 = 72,34 \text{ V}$$

Vyjádření procentní změny napětí.

$$\Delta u_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot 72,34}{6 \cdot 10^3} = 2,09\% < 4\% \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

8.7 Výpočet zkratového proudu a dimenzování vodičů

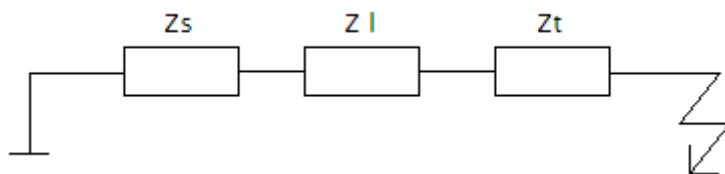
Zkratový proud pro dimenzování na L22 se vypočítá jako jediná impedance v obvodu.



Obr. 8.5 Zjednodušené schéma při zkratu před vedením L22.

$$I_{k1}'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{350 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 9,2 \text{ kA}$$

Zkratový proud na R6 se spočítá jako zapojení impedance sítě, vodiče a transformátoru do série.



Obr. 8.6 Zjednodušené schéma při zkratu na rozvaděč R6.

Odpory a reaktance kabelů a lan jsou vyčteny z přílohy C.

Impedance sítě:

$$Z_s = \frac{U^2 \cdot c}{S_k''} = \frac{(6 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,1}{350 \cdot 10^6} = 0,1113 \Omega$$

$$X_s = 0,987 \cdot Z_s = 0,1117 \Omega$$

$$R_s = 0,16 \cdot X_s = 0,0179 \Omega$$

Impedance lana AlFe6 :

$$X_l = X_k \cdot l \cdot \frac{1}{p^2} = 0,35 \cdot 10 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,26 \Omega$$

$$R_l = R_k \cdot l \cdot \frac{1}{p^2} = 0,284 \cdot 10 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,21 \Omega$$

Impedance transformátoru:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{NT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{41 \cdot 10^3 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{(6,3 \cdot 10^6)^2} = 0,0372 \Omega$$

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{6,3 \cdot 10^6} = 0,343 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 0,341 \Omega$$

Dále budou odpory a reaktance sečteny kvůli určení výsledné impedance.

$$Z_c = \sqrt{(R_s + R_l + R_T)^2 + (X_s + X_l + X_T)^2} = 0,761 \Omega$$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_c} = \frac{1,1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,761} = 5 \text{ kA}$$

Nejprve je dimenzován přívodní vodič na hladině napětí 22 kV, který je volen jako kabel 22-AXEKVCEY. Pro dané podmínky se vyhledají přepočítací koeficienty na základní podmínky. Tabulky pro přepočet na základní podmínky jsou v příloze B, pro k_1 v tabulce B.1, pro k_2 v tabulce B.2 a pro k_3 v tabulce B.3.

Tabulka 8.12 Přepočítací koeficienty pro 22-AXEKVCEY.

k_1	0,79
k_2	0,96
k_3	1

Tento kabel přenáší zdánlivý výkon $S_p = 6591,32 \text{ kVA}$ s $\cos\varphi = 0,982$ na vzdálenost 10 km . Podle vzorce 6.1 se vypočte procházející proud.

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{6591,32}{\sqrt{3} \cdot 22} = 173 \text{ A}$$

Dle vzorce 6.2 se vypočte jmenovitý proud v základním prostředí.

$$I_N \geq \frac{173}{0,79 \cdot 0,96 \cdot 1} = 228,1 \text{ A}$$

V tabulkách tomuto jmenovitému proudu odpovídá průřez 70 mm^2 , kterému přísluší

$$R_k = 0,443 \Omega/\text{km} \text{ a } X_k = 0,207 \Omega/\text{km}.$$

Kontrola na úbytek napětí dle vzorce 7.3.

$$\Delta U_f = 0,443 \cdot 10 \cdot 173 + 0,207 \cdot 10 \cdot 173 = 820,5 \text{ V}$$

Podle vzorce 6.4 je $\Delta u\% = 6,45\%$, což nevyhovuje podmínce ve vzorci 6.5. Musí být tedy zvětšen průřez na $S = 95 \text{ mm}^2$ s těmito hodnotami $R_k = 0,32 \Omega/\text{km}$ a $X_k = 0,2011 \Omega/\text{km}$. Pro tento průřez vyšel úbytek napětí $\Delta u\% = 4,8\%$, který už vyhovuje podmínce ve vzorci 6.5.

Při oteplení se vychází ze vzorce 6.6, kde je $t_k = 0,5 \text{ s}$, této hodnotě byla vyčtena z tabulek hodnota $k_e = 1,02$, která charakterizuje místo a hladinu při zkratu, a podle vzorce 6.7 vypočten ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} .

$$I_{ke} = k_e \cdot I_{k1} = 1,02 \cdot 9,2 \cdot 10^3 = 9,384 \text{ kA}$$

Pro výpočet K se vyšlo ze vzorce 6.8 pro vodič hliník a izolace zesíťený polyetylén.

$$K = \sqrt{\frac{2,417 \cdot (20 + 228)}{0,02941} \cdot \ln \frac{228 + 250}{228 + 90}} = 91,14 [-]$$

Po dosazení do vzorce 6.6 bude provedena kontrola na oteplení zkratového proudu.

$$S \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{9384 \cdot \sqrt{0,5}}{91,14} = 72,7 \text{ mm}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Nyní bude vypočítán průřez pro lano 22kV AlFe6.

Tabulka 8.13 Přepočítávací koeficienty pro lano AlFe6.

k_1	1
k_2	1
k_3	1

Proud I_p je stejný jako u kabelu 22-AXEKVCEY s tím rozdílem, že koeficienty jsou 1 se $I_p = I_N$. Odporů a reaktancí kabelů jsou vyčteny z tabulky C.3 v příloze C. Pro průřez 70mm^2 a 95mm^2 nevyhovuje lano na úbytky napětí, takže vyhovující je průřez $S=120\text{mm}^2$, která má $R_k = 0,284\Omega/\text{km}$ a $X_k = 0,35\Omega/\text{km}$ pro něž je úbytek $\Delta u\% = 4,7\%$ a tím vyhovuje vzorci 6.5. Na oteplení při zkratu se vychází ze vzorce 6,6, kde $K \cong 82[-]$, po dosazení vyjde $S_{\min} = 80,92\text{mm}^2$, což vyhovuje průřezu $S = 120\text{mm}^2$.

Jako ideálnější se zdá být lano AlFe6, které má sice menší odpor, ale reaktance je větší než 22-AXEKVCEY. Po srovnání lze doporučit spíše lano AlFe6, které je vhodnější při hledání a opravě poruch.

Hodnoty k příslušným proudům jsou vyčteny z tabulky v příloze C, tabulka C.3.

V ostatních případech jsou použity kabely 6-AYKCY a kabel 22-AXEKVCEY.

Tabulka 8.14 Hodnoty potřebné k dimenzování kabelů.

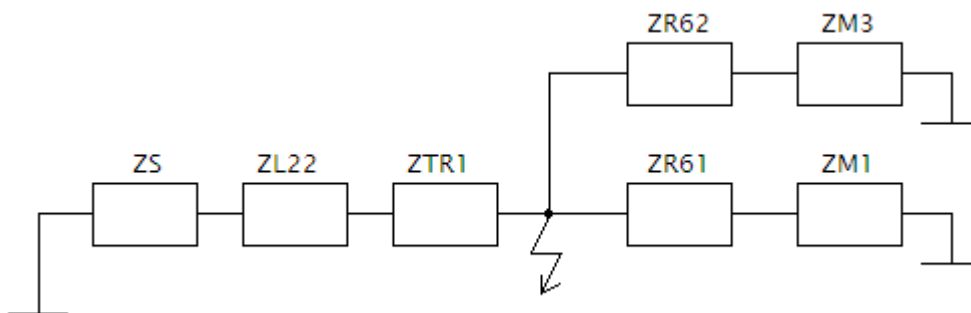
	P_p [kW]	Q_p [kVAr]	S_p [kVA]	$\cos \varphi$	l [km]	I_p [A]	k_1	k_2	k_3
R61	1930	481,1	1989,1	0,97	0,46	191,4	0,79	0,95	0,9
R62	1492,8	375,7	1539,34	0,97	0,7	148,12	0,79	0,95	0,9
R63	636,8	115,73	647,21	0,984	0,4	62,28	0,79	0,95	1
R22	2322,22	677,3	2419	0,96	0,28	63,48	0,79	0,96	1

Při výpočtu dimenzování kabelů se postupovalo podobně jako u ukázkového příkladu s kabelem 22-AXEKVCEY, pro přívod elektrické energie do závodu.

Tabulka 8.15 Shrnutí vypočtených hodnot a vyčtených hodnoty z tabulek v příloze C.

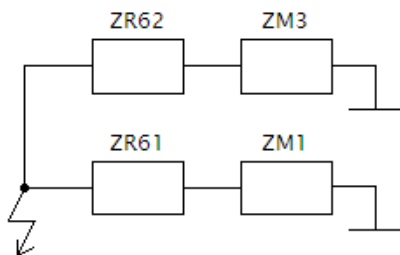
	I_N [A]	S [mm^2]	R_k [Ω/km]	x_k [Ω/km]	Δu_f [%]	S_{\min} [mm^2]	
L22	172,98	120	0,284	0,35	4,7	72,7	vyhovuje
R61	283,4	185	0,194	0,078	0,53	50,2	vyhovuje
R62	220	120	0,299	0,078	0,93	50,2	vyhovuje
R63	83	70	0,513	0,085	0,38	50,2	vyhovuje
R22	83	35	0,868	0,22	0,13	18,83	vyhovuje

Pro kontrolu správného nadimenzování kabelů se ověří výpočtem zkratového proudu i s příspěvkem největších motorů, které jsou v provozu.



Obr. 8.7 Zjednodušené schéma zkratu na rozvaděči R6 i s příspěvkem od motorů.

Zkratový proud dodávaný do místa zkratu je vypočtený $I_{k2}'' = 5 \text{ kA}$ a zbývá vypočítat zkratový proud od motorů.



Obr. 8.8 Zjednodušené schéma pro výpočet zkratového proudu od motorů.

Hodnoty odporů a reaktancí jsou pro určené kabely vyčteny z přílohy C.

Výpočet impedance horní větve.

$$R_{R62} = R_k \cdot l = 0,299 \cdot 0,7 = 0,2093 \Omega$$

$$X_{R62} = X_k \cdot l = 0,078 \cdot 0,7 = 0,0546 \Omega$$

$$Z_{R62} = \sqrt{R_{R62}^2 + X_{R62}^2} = 0,2163 \Omega$$

$$R_{M3} = 0,04 \cdot X_{M3} = 0,04 \cdot 8,1 = 0,324 \Omega$$

$$X_{M3} = \frac{1}{i_k} \cdot \frac{U_n^2}{2 \cdot S_M} = \frac{1}{5} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 444,44 \cdot 10^3} = 8,1 \Omega$$

$$Z_{M3} = \sqrt{R_{M3}^2 + X_{M3}^2} = 8,1065 \Omega$$

$$R_H = R_{M3} + R_{R62} = 0,5333 \Omega$$

$$X_H = X_{M3} + X_{R62} = 8,155 \Omega$$

Výpočty impedance dolní větve.

$$R_{R61} = R_k \cdot l = 0,194 \cdot 0,46 = 0,0892\Omega$$

$$X_{R61} = X_k \cdot l = 0,078 \cdot 0,46 = 0,0359\Omega$$

$$Z_{R61} = \sqrt{R_{R61}^2 + X_{R61}^2} = 0,0962\Omega$$

$$R_{M1} = 0,04 \cdot X_{M1} = 0,343\Omega$$

$$X_{M1} = \frac{1}{i_k} \cdot \frac{U_n^2}{S_P} = \frac{1}{5} \cdot \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{840 \cdot 10^3} = 8,571\Omega$$

$$Z_{M1} = \sqrt{R_{M1}^2 + X_{M1}^2} = 8,578\Omega$$

$$R_D = R_{M1} + R_{R61} = 0,4322\Omega$$

$$X_D = X_{M1} + X_{R61} = 8,61\Omega$$

Hodnoty odporů a reaktancí se paralelně sečtou a vypočte se výsledná rektance.

$$R_C = 0,239\Omega;$$

$$X_C = 4,187\Omega;$$

$$Z_{CM} = 4,194\Omega;$$

Výpočet zkratového proudu.

$$I_{kz}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{CM}} = \frac{1,1 \cdot (6 \cdot 10^3)}{\sqrt{3} \cdot 4,194} = 0,91kA$$

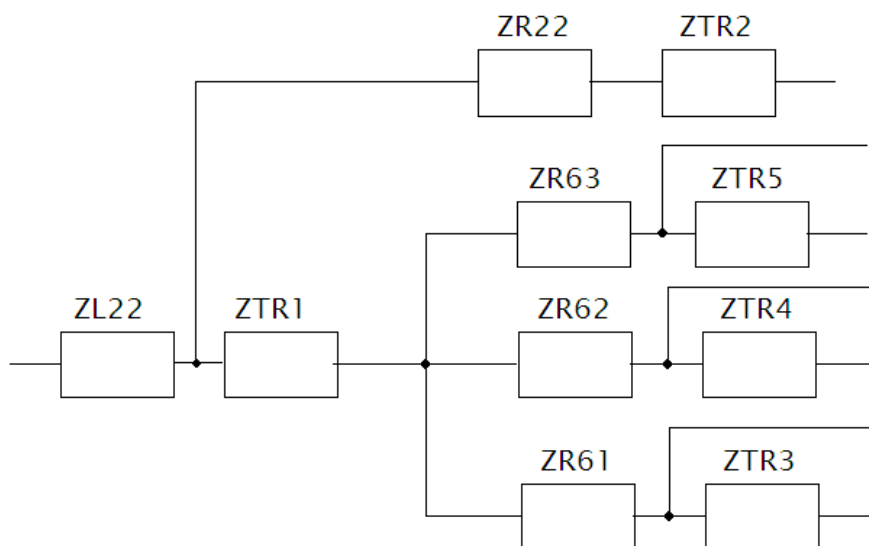
Navržené kabely se zkontrolují podle vzorce 6.6.

$$I_{ke} = (I_{kz}'' + I_{k2}'') \cdot k_e = (5 + 0,91) \cdot 10^3 \cdot 1,04 = 6,15kA$$

$$S \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{6,15 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,5}}{73,34} = 59,26mm^2$$

Kabely R61, R62, R63 vyhovují, protože nejmenší je průřez kabelu R63, který je $S = 70mm^2$, ostatní kabely mají průřez R61 – $S = 185mm^2$ a R62 – $S = 120mm^2$.

8.8 Výpočet činných a jalových ztrát v rozvodu



Obr. 8.9 Schéma zapojení pro rozvod elektrické energie.

Pro jednotlivé impedance v obvodu je známa činná i reálná složka impedance, ze které se vypočítají činné a jalové ztráty v rozvodu.

Ukázka výpočtu pro impedanci R61, který podle dispozičního řešení vede k objektům č. 3 a č. 4. Navrhnut je kabel 6-AYKCY, který má tyto hodnoty odporu $R = 0,0893\Omega$ a reaktanci $X = 0,0359\Omega$, jímž protéká proud $I = 191,4A$. Tyto hodnoty se dosadí do vzorce:

$$\Delta P_p = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0893 \cdot 191,4^2 = 9814,24W$$

$$\Delta Q_p = 3 \cdot X \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0358 \cdot 191,4^2 = 3945,5VAr$$

Při výpočtu ostatních ztrát v rozvodu se počítalo obdobně jako v ukázkovém příkladu, hodnoty všech výpočtů jsou shrnuty v následující tabulce 8.16.

Tabulka 8.16 Shrnutí hodnot jednotlivých impedancí.

	R [Ω]	X [Ω]	I [A]	P _p [W]	Q _p [VAr]
L22	2,84	3,5	173	254995,08	314254,5
R22	0,243	0,0616	63,48	2937,6589	744,69048
R61	0,0893	0,0359	191,4	9814,2379	3945,4775
R62	0,2093	0,0546	148,12	13775,834	3593,6957
R63	0,2052	0,034	62,28	2387,7883	395,63744
TR1	0,5	4,61	109,55	18001,804	165976,63
TR2	1,026	5,717	63,48	12403,449	69113,563
TR3	0,2813	1,32	91,21	7020,627	32944,286
TR4	0,311	1,7	70,16	4592,6231	25104,371
TR5	0,378	2,13	14,43	236,12704	1330,5571

Ztráty činné i jalové jsou též na transformátorech, kde jsou způsobeny chodem nakrátko a naprázdno.

Ukázka výpočtu činných a jalových ztrát na transformátoru je pro TR1, kde činné ztráty naprázdno a nakrátko jsou vyčteny z tabulky A.1 v příloze A, $P_0 = 5500W$ a $P_k = 41000W$.

Jalové ztráty se musí vypočítat:

$$\text{naprázdno} - \Delta Q_0 = \frac{i_0}{100} \cdot S_n = \frac{3,3}{100} \cdot 6300 \cdot 10^3 = 207,9 \text{ kVAr}$$

$$\text{nakrátko} - \Delta Q_k = \frac{u_k}{100} \cdot S_n = \frac{6}{100} \cdot 6300 \cdot 10^3 = 378 \text{ kVAr}$$

Hodnoty u_k a S_n jsou vyčteny také z tabulek A.1 v příloze A. Při výpočtu jmenovitého proudu

se vyšlo ze vzorce 2.5 a 2.6 - $S = \frac{6300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 165A$. Poté se dosadilo do vzorců pro

výpočet celkových činných a jalových ztrát:

$$\text{Činné ztráty} - \Delta P_T = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 = 5,5 + 41 \cdot \left(\frac{109,55}{165}\right)^2 = 23,5 \text{ kW}$$

$$\text{Jalové ztráty} - \Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 = 207,9 + 378 \cdot \left(\frac{109,55}{165}\right)^2 = 458,36 \text{ kVAr}$$

U výpočtu ostatních ztrát v transformátorech se vycházelo stejně jako v ukázkovém příkladě, hodnoty ztrát v transformátorech jsou shrnuty v následující tabulce 8.17.

Tabulka 8.17 Shrnutí hodnot ztrát při denním chodu transformátoru.

	ΔP_T [kW]	ΔQ_T [kVAr]	ΔP_0 [kW]	ΔP_k [kW]	ΔQ_0 [kVAr]	ΔQ_k [KVAr]	u_k [%]	i_0 [%]	S_n [kVAr]	I_N [A]
TR1	23,5	458,36	5,5	41	207,9	378	6	3,3	6300	165
TR2	46,2	455,27	2,5	22	82,5	150	6	3,3	2500	65,6
TR3	6,6	109,67	1,7	14	52,8	96	6	3,3	1600	154
TR4	6,2	76,747	1,1	9,5	33	60	6	3,3	1000	96,2
TR5	1,41	11,998	0,425	2,75	6	10	4	2,4	250	24,1

Po sečtení jednotlivých ztrát činných složek v rozvodu elektrické energie a ztrát při chodu transformátoru jsou $\Delta P = 410.036,6W$ při ceně $B = 3,15 \text{ kW/h}$.

Pro denní směnu je poté vyčíslení činných ztrát na roční provoz v rozvodu $N = 5.567.275 \text{ Kč}$.

9 Závěr

Výsledkem mé bakalářské práce je zpracovaný návrh napájecí sítě, který odpovídá všem platným normám. Řešení zadaného tématu je rozděleno do 6 kapitol. V první kapitole jsou všechny prvky napájecí sítě rozděleny podle stupně zabezpečení dodávky tak, aby odpovídaly normě ČSN 34 1610. V druhé kapitole jsou vybrány výpočty pro provozní vlastnosti jednotlivých motorů ke zjištění výpočtového zatížení.

Ve třetí kapitole je stanovena kompenzace účinníku pro jednotlivé prvky a celou provozovnu. Kompenzace účinníku je nastavena tak, aby nedošlo k nedokompenzování/překompenzování a tedy finančním postihům ze strany dodavatele energie.

Ve čtvrté kapitole jsou analyzovány napájecí transformátory tak, aby byla splněna podmínka jejich 60-70% zatížení. Současně je pro každý transformátor stanovena jedna z možností jeho jednotlivého nebo současného chodu. Výběr nejvhodnějšího chodu byl proveden na základě hodnocení ztrát transformátoru a ekonomických kritérií jeho pořízení a provozu na dobu sedmi let.

Díky dodržení podmínky zatížení z předcházející kapitoly je možné v páté kapitole změřit rozběh největšího z motorů, který odebírá největší rozběhový proud, a zatížení rozběhovým výkonem přes hlavní transformátor. V šesté kapitole je řešeno dimenzování přírodních vodičů do celého průmyslového provozu a i k jednotlivým motorům. Správnost průřezu vodiče je kontrolována na tyto nároky: dovolené proudové zatížení vodiče, úbytek napětí na vodiči a oteplení vodiče účinkem zkratového proudu.

V průběhu práce jsem narazil na další zajímavá témata z oblasti elektroenergetiky, které nebyly součástí mé bakalářské práce, ale s řešeným tématem úzce souvisejí. Jedná se např. o působení vyšších harmonických na energetickou síť.

Použitá literatura

- [1] Úřad pro normalizaci a měření: *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách-norma ČSN 34 1610*, ÚNM Praha 10, 1983.
- [2] Tesařová M., Štroblová M.: *Průmyslová elektroenergetika*, ZČU Plzeň, 2000.
- [3] Korenc V., Holoubek J.: *Kompenzace jalového výkonu v praxi*, IN-EL Praha, 1999.
- [4] Hála P., Lacina B.: *Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů*, Brno, svazek 7.
- [5] Bartoš V.: *Teorie elektrických strojů*, Plzeň 2006.
- [6] Teorie k dimenzování vodičů od Doc. Ing. P. Hejtmánková Ph.D., <http://home.zcu.cz/~hejtman/PEC/Prednasky/pred4.pdf>, staženo dne: 25.5.2012.
- [7] Katalog kondenzátorových baterií pro jednotlivou kompenzaci od firmy EMCOS, http://www.emcos.cz/pdf/katlist-VN_KE-57-503-2005.pdf, staženo dne: 20.5.2012.
- [8] Katalog kondenzátorových baterií pro skupinovou kompenzaci od firmy EMCOS, http://www.emcos.cz/pdf/katkomp_KE-51-011-2012.pdf, staženo dne: 20.5.2012.
- [9] Podklady pro dimenzování vodičů od Doc. Ing. M. Tesařové Ph.D., <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Dimenzovani.zip>, staženo dne: 26.5.2012.
- [10] Hodnoty jednotlivých transformátorů 6/ 0,4 kV od firmy Elpro energo, <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/technicka-data/tabulky-6-10kv/>, staženo dne: 15.5.2012.
- [11] Hodnoty jednotlivých transformátorů 22/ 6 kV od firmy Elpro enegro, <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/technicka-data/tabulky-22kv/>, staženo dne: 15.5.2012.

Příloha A – Hodnoty transformátorů použité ve výpočtech

Tabulka A.1 Hodnoty transformátoru 22/6kV. [11]

Typ		Jm. výkon	P ₀	P _k	u _k	Hmotnost	Z toho olej	Cena bez DPH
		[kVA]	[W]	[W]	[%]	[kg]	[kg]	[Kč]
DOTN	50/20	50	175	1350	4	460	140	72.128
DOTEL	50/20	50	125	1100	4	510	130	91.392
DOTUL	50/20	50	110	1100	4	610	160	102.480
DOTN	100/20	100	290	2150	4	590	170	92.512
DOTEL	100/20	100	210	1750	4	590	120	105.728
DOTUL	100/20	100	210	1475	4	770	190	129.360
DOTN	160/20	160	390	3100	4	840	190	131.712
DOTEL	160/20	160	300	2350	4	960	230	172.032
DOTUL	160/20	160	300	2000	4	1060	260	178.080
DOTN	250/20	250	570	4100	4	1010	240	158.368
DOTEL	250/20	250	425	3250	4	1040	230	186.368
DOTUL	250/20	250	425	2750	4	1270	300	213.360
DOTN	400/20	400	750	6000	4	1240	290	194.432
DOTEL	400/20	400	610	4600	4	1520	330	272.384
DOTUL	400/20	400	610	3850	4	1590	330	267.120
DOTN	630/20	630	1030	8400	4	1760	410	275.968
DOTEL	630/20	630	860	6500	4	1940	390	347.648
DOTUL	630/20	630	860	5400	4	2030	420	341.040
DOTZ	800/20	800	1150	11000	6	2060	490	276.864
DOTEL	800/20	800	980	8500	6	2220	510	348.096
DOTUL	800/20	800	905	7640	6	2370	490	451.248
DOTE	1000/20	1000	1700	10500	6	2570	540	345.408
DOTEL	1000/20	1000	1100	10500	6	2710	600	424.928
DOTUL	1000/20	1000	1100	9500	6	2680	560	510.272
DOTE	1250/20	1250	2000	13500	6	2850	600	383.040
DOTEL	1250/20	1250	1350	13500	6	2860	610	448.448
DOTUL	1250/20	1250	1350	11000	6	3270	700	622.608
DOTZ	1600/20	1600	2200	20000	6	3840	850	516.096
DOTEL	1600/20	1600	1700	17000	6	3670	760	575.456
DOTUL	1600/20	1600	1700	14000	6	3920	780	746.368
DOTE	2000/20	2000	2900	22000	6	4700	950	631.680
DOTEL	2000/20	2000	2100	22000	6	4700	950	736.960
DOTUL	2000/20	2000	2100	18000	6	4710	950	896.784

Pokračování tabulky A.1

Typ		Jm. výkon	P ₀	P _k	u _k	Hmotnost	Z toho olej	Cena bez DPH
		[kVA]	[W]	[W]	[%]	[kg]	[kg]	[Kč]
DOTE	2500/20	2500	3200	26500	6	6130	1400	823.872
DOTEL	2500/20	2500	2500	26500	6	5980	1620	937.664
DOTUL	2500/20	2500	2500	22000	6	5990	1300	1.140.496
DOT	3150H/20	3150	3700	26000	6	7500	1700	1.680.000
DOT	4000H/20	4000	4900	35000	6	11000	3000	2.464.000
DOT	6300H/20	6300	5500	41000	6	14000	3000	3.136.000

Tabulka A.2 Hodnoty transformátoru 6/0,4kV. [10]

Typ		Jm. výkon	P ₀	P _k	u _k	Hmotnost	Z toho olej	Cena bez DPH
		[kVA]	[W]	[W]	[%]	[kg]	[kg]	[Kč]
DOTN	50/10	50	175	1350	4	460	140	69.552
DOTEL	50/10	50	125	1100	4	510	130	88.128
DOTUL	50/10	50	110	1100	4	610	160	98.820
DOTN	100/10	100	290	2150	4	590	170	89.208
DOTEL	100/10	100	210	1750	4	590	120	101.952
DOTUL	100/10	100	210	1475	4	770	190	124.740
DOTN	160/10	160	390	3100	4	840	190	127.008
DOTEL	160/10	160	300	2350	4	960	230	165.888
DOTUL	160/10	160	300	2000	4	1060	260	171.720
DOTN	250/10	250	570	4100	4	1010	240	152.712
DOTEL	250/10	250	425	3250	4	1040	230	179.712
DOTUL	250/10	250	425	2750	4	1270	300	205.740
DOTN	400/10	400	750	6000	4	1240	290	187.488
DOTEL	400/10	400	610	4600	4	1520	330	262.656
DOTUL	400/10	400	610	3850	4	1590	330	257.580
DOTN	630/10	630	1030	8400	4	1760	410	266.112
DOTEL	630/10	630	860	6500	4	1940	390	335.232
DOTUL	630/10	630	860	5400	4	2030	420	328.860
DOTZ	800/10	800	1150	11000	6	2060	490	266.976
DOTEL	800/10	800	980	8500	6	2220	510	335.664
DOTUL	800/10	800	905	7640	6	2370	490	435.132
DOTE	1000/10	1000	1700	10500	6	2570	540	333.072
DOTEL	1000/10	1000	1100	10500	6	2710	600	409.752
DOTUL	1000/10	1000	1100	9500	6	2680	560	492.048

Pokračování tabulky A.2

Typ		Jm. výkon	P_0	P_k	u_k	Hmotnost	Z toho olej	Cena bez DPH
		[kVA]	[W]	[W]	[%]	[kg]	[kg]	[Kč]
DOTE	1250/10	1250	2000	13500	6	2850	600	376.200
DOTEL	1250/10	1250	1350	13500	6	2860	610	440.440
DOTUL	1250/10	1250	1350	11000	6	3270	700	611.490
DOTZ	1600/10	1600	2200	20000	6	3840	850	506.880
DOTEL	1600/10	1600	1700	17000	6	3670	760	565.180
DOTUL	1600/10	1600	1700	14000	6	3920	780	733.040
DOTE	2000/10	2000	2900	22000	6	4700	950	620.400
DOTEL	2000/10	2000	2100	22000	6	4700	950	723.800
DOTUL	2000/10	2000	2100	18000	6	4710	950	880.770
DOTE	2500/10	2500	3200	26500	6	6130	1400	809.160
DOTEL	2500/10	2500	2500	26500	6	5980	1620	920.920
DOTUL	2500/10	2500	2500	22000	6	5990	1300	1.120.130

Příloha B – Hodnoty přepočítávacích koeficientů na základní podmínky

Tabulka B.1 Přepočítávací součinitelé proudové zatížitelnosti pro půdu s různým měrným tepelným odporem. [9]

Druh kabelu	Měrný tepelný odpor půdy Km/W						
	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5	2,0
Celoplastové kabely	1,11	1,05	1,00	0,96	0,90	0,79	0,71

Tabulka B.2 Přepočítávací součinitelé proudové přetížitelnosti podle teploty okolí pro kabely uložené přímo v zemi. [9]

Nejvyšší dovolená provozní teplota jádra [°C]	Teplota prostředí [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
65	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,58	0,47
70	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
75	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74	0,67	0,60
80	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,65
90	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71

Tabulka B.3 Přepočítávací součinitelé při seskupení několika kabelů v zemi. [9]

Počet obvodů	Vzdálenost mezi kabely [m]				
	Nulová	Jeden průměr kabelu	0,125 m	0,25 m	0,5 m
2	0,75	0,8	0,85	0,9	0,9
3	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
4	0,6	0,6	0,7	0,75	0,8
5	0,55	0,55	0,65	0,7	0,8
6	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8

Příloha C – Průřezy a jmenovité proudy kabelů a lan

Tabulka C.1 Hodnoty pro kabel 6-AYKCY. [9]

Typ: 6-AYKCY			
S [mm ²]	I _N [A]	R [Ω/km]	X [Ω/km]
25	109	1,43	0,097
35	129	1,02	0,094
50	156	0,718	0,088
70	186	0,513	0,085
95	204	0,378	0,082
120	235	0,299	0,078
150	268	0,239	0,078
185	306	0,194	0,078
240	357	0,149	0,078

Tabulka C.2 Hodnoty pro kabel 22-AXEKVCEY. [9]

Typ : 22-AXEKVCEY			
S [mm ²]	I _N [A]	R [Ω/km]	X [Ω/km]
35	165	0,868	0,220
50	250	0,641	0,214
70	303	0,443	0,207
95	360	0,32	0,020
120	407	0,253	0,195
150	445	0,206	0,188
185	498	0,164	0,185
240	568	0,125	0,182

Tabulka C.3 Hodnoty pro lano AlFe6. [9]

Typ : AlFe6			
S [mm ²]	I _N [A]	R [Ω/km]	X [Ω/km]
16	78	2,31	0,35
25	104	1,531	0,35
35	140	0,98	0,35
50	165	0,774	0,35
70/1	208	0,546	0,35
70/7	209	0,547	0,35
95/1	267	0,38	0,35
95/7	262	0,395	0,35

Typ : AlFe6			
S [mm ²]	I _N [A]	R [Ω/km]	X [Ω/km]
120	329	0,284	0,35
150	356	0,253	0,35
185	421	0,197	0,35
210	451	0,179	0,35
240	490	0,158	0,35
300	574	0,126	0,35
350	660	0,103	0,35
450	775	0,0818	0,35

Příloha D – Velikosti kondenzátorových baterií od firmy EMCOS

Tabulka D.1 Velikost kondenzátorové baterie pro jednotlivou kompenzaci typ EIK. [7]

Typ	Komp. výkon [kVAr]	Proud I_v [A]
EIK6 -050/1	50	6,6
EIK6 -075/1	75	9,8
EIK6 -100/1	100	13,1
EIK6 -150/1	150	19,6
EIK6 -200/1	200	26,2
EIK6 -250/1	250	32,8
EIK6 -300/1	300	39,3
EIK6 -400/1	400	52,4
EIK6 -500/1	500	65,5
EIK6 -600/1	600	78,7

Tabulka D.2 Velikosti kondenzátorové baterie pro skupinovou kompenzaci typ VARKOM I. [8]

Typ	Komp. výkon [kVAr]	Proud I_v [A]
EV-44/7	44 (7x6,25)	89
EV-50/4	50 (4x12,5)	103
EV-56/9	56 (9x6,25)	116
EV-63/5	63 (5x12,5)	129
EV-63/10	63 (10x6,25)	129
EV-68/11	68 (11x6,25)	142
EV-75/6	75 (6x12,5)	155
EV-87/7	87 (7x12,5)	181
EV-93/15	93 (15x6,25)	191
EV-100/8	100 (8x12,5)	206
EV-100/16	100 (16x6,25)	206
EV-112/9	112 (9x12,5)	232
EV-112/18	112 (18x6,25)	232
EV-118/19	118 (18x6,25)	243
EV-125/5	125 (5x25)	258
EV-125/10	125 (10x12,5)	258
EV-137/11	137 (11x12,5)	284
EV-150/6	150 (6x25)	310
EV-150/12	150 (12x12,5)	310
EV-175/7	175 (7x25)	361
EV-175/14	175 (14x12,5)	361
EV-200/8	200 (8x25)	413
EV-200/16	200 (16x12,5)	413

Typ	Komp. výkon [kVAr]	Proud I_v [A]
EV-225/9	225 (9x25)	464
EV-225/18	225 (18x12,5)	464
EV-250/10	250 (10x25)	516
EV-275/11	275 (11x25)	568
EV-300/6	300 (6x50)	619
EV-300/12	300 (12x25)	619
EV-325/13	325 (13x25)	670
EV-350/7	350 (7x50)	722
EV-350/14	350 (14x25)	722
EV-375/15	375 (15x25)	772
EV-400/8	400 (8x50)	825
EV-400/16	400 (16x25)	825
EV-450/9	450 (9x50)	929
EV-450/18	450 (18x25)	929
EV-500/10	500 (10x50)	1032
EV-500/20	500 (20x25)	1032
EV-550/11	550 (11x50)	1135
EV-600/12	600 (12x50)	1238
EV-650/13	650 (13x50)	1339
EV-700/14	700 (14x50)	1442
EV-750/15	750 (15x50)	1545
EV-800/16	800 (16x50)	1648