



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE

THE REACTIVE POWER COMPENSATION OF THE INDUSTRIAL COSTUMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ HANZELKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jiří Hanzelka

ID: 133964

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický úvod – viz semestrální projekt
2. Výpočet nové bilance jalového výkonu
3. Zohlednění energetického rušení od nově instalovaných spotřebičů – eliminace vzniku rezonancí s kompenzačními zařízeními
4. Návrh nové koncepce kompenzace jalového výkonu

DOPORUCENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 28. 5. 2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat problematiku kompenzace jalového výkonu a následně navrhnout novou koncepci pro průmyslového odběratele. V první části jsou popsány základy kompenzace, umístění kompenzace a možné způsoby kompenzace. V závěru této části je názorný příklad paralelní kompenzace jalového výkonu.

Druhá část se zabývá návrhem kompenzace jalového výkonu konkrétně pro čerpací stanici surové vody. Kompenzace byla řešena jak na nízké hladině napětí, tak i na vysoké hladině napětí. K výkresové dokumentaci byl použit program EPLAN Electric P8.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompenzace jalového výkonu, paralelní kompenzace, účinník, jalový výkon, kondenzátor, hrazená kompenzace, tlumivka

ABSTRACT

This thesis is focused on reactive power compensation and it suggests new conceptions for industrial customers. The first part describes the basics of compensation, location and ways of compensation. In conclusion of this part it is a good example of parallel reactive power compensation.

The second part deals with the design of reactive power compensation specifically for raw water pumping station. Compensation was solved both on a low voltage level and on the high voltage level. For drawings were used program EPLAN Electric P8.

KEY WORDS

Reactive power compensation, parallel compensation, power factor, reactive power, capacitor, detuned reactive power compensation, reactor

Prohlášení

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 28. května 2015

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	5
1. Základy kompenzace jalového výkonu	6
1.1 Jalový výkon	6
1.2 Účinník	6
1.3 Kompenzace	7
1.3.1 Sériová kompenzace.....	9
1.3.2 Paralelní kompenzace.....	10
1.4 Proč kompenzovat?	12
1.5 Překompensované sítě.....	13
2. Kompenzační zařízení	14
2.1 Základní možnosti umístění kompenzace	14
2.1.1 Individuální kompenzace	14
2.1.2 Skupinová kompenzace.....	14
2.1.3 Centrální kompenzace	15
2.1.4 Kombinovaná kompenzace.....	16
2.2 Rotační kompenzační zařízení	16
2.3 Kompenzační výkonové kondenzátory	17
2.4 Chráněné kompenzační sekce	19
2.5 Dekompenzační tlumivky	20
2.6 Kompenzační filtry.....	20
3. Regulace kompenzačních zařízení.....	22
3.1 Stupňovitá regulace.....	22
3.2 Plynulá regulace.....	23
4. Spínání kompenzačních zařízení.....	24
4.1 Kontaktní spínání	24
4.2 Bezkontaktní	24
5. Příklad výpočtu kompenzace jalového výkonu	25
5.1 Zadání	25
5.2 Stav před kompenzací	26
5.3 Stav po kompenzaci.....	26

6. Praktický návrh kompenzace jalového výkonu pro průmyslového odběratele	28
6.1 Návrh kompenzace pro čerpadla na napětové hladině 6 kV.....	29
6.2 Návrh kompenzace pro technologickou spotřebu na napětové hladině 0,4 kV	31
Závěr	37
Použitá literatura	38
Přílohy.....	40
Příloha A. Původní schéma zapojení.....	40
Příloha B. Navrhované schéma zapojení.....	41

Seznam obrázků

Obr. 1: Trojúhelník výkonů	6
Obr. 2: Posun čistě induktivní zátěže [2]	7
Obr. 3: Fázový posun čistě kapacitní zátěže [2]	7
Obr. 4: Odběr elektrické energie bez kompenzace	8
Obr. 5: Odběr elektrické energie s částečnou kompenzací	8
Obr. 6: Odběr elektrické energie s úplnou kompenzací	9
Obr. 7: Trojúhelník výkonu předa po kompenzaci	9
Obr. 8: Schéma zapojení sériové kompenzace	10
Obr. 9: Fázorový diagram sériové kompenzace [2]	10
Obr. 10: Schéma zapojení paralelní kompenzace	10
Obr. 11: Vykompenzována část vedení [1]	11
Obr. 12: Vykompenzované celé vedení [1]	11
Obr. 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace [2]	12
Obr. 14: Individuální zapojení kompenzace	14
Obr. 15: Skupinové zapojení kompenzace [1]	15
Obr. 16: Centrální zapojení kompenzace [1]	16
Obr. 17: V-křivky synchronního stroje [4]	17
Obr. 18: Výkonové kondenzátory [5]	18
Obr. 19: RLC článek	19
Obr. 20: Závislost impedance RLC odvodu na kmitočtu	20
Obr. 21: Schéma zapojení paralelní kompenzace	25
Obr. 22: Přehledové schéma původního stavu	28
Obr. 23: Přehledové schéma navrhovaného stavu	29
Obr. 22: Tlumivky VN [17]	31
Obr. 23: Tlumivky NN [16]	34

Seznam symbolu a zkratek

C	kapacita	[F]
C_n	jmenovitá kapacita	[F]
$\cos\varphi$	účinnost	[-]
f	frekvence	[Hz]
f_r	rezonanční frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
I_ξ	činný proud	[A]
I_j	jalový proud	[A]
I_{LC}	skutečný proud kompenzačního článku	[A]
I_n	jmenovitý proud	[A]
L	indukčnost	[H]
L_n	jmenovitá indukčnost	[H]
P	činný výkon	[W]
p	činitel ztlumení	[-]
Q	jalový výkon	[VAr]
Q_c	výkon kompenzační baterie	[VAr]
Q_{LC}	skutečný výkon kompenzačního článku	[VAr]
Q_n	jmenovitý výkon kondenzátoru	[VAr]
R	odpor	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
U_{nc}	jmenovité napětí kondenzátoru	[V]
U_{ns}	jmenovité napětí sítě	[V]
X	reaktance	[Ω]
X_c	kapacitní reaktance	[Ω]
X_L	induktivní reaktance	[Ω]
X_{LC}	celková reaktance kompenzačního článku	[Ω]
ΔP	tepelné ztráty	[W]
ΔU	úbytek napětí na vedení	[V]
β	soudobost	[-]
φ	fázový posun	[$^\circ$]

Úvod

Kompensace jalového výkonu je efektivní způsob snižování odběru celkového elektrického výkonu z elektráren průmyslovými odběrateli. Snažíme se, aby stroje v průmyslovém podniku odebíraly jalový výkon z paralelně připojeného kompenzačního zařízení a ne ze sítě. Tím dojde k poklesu celkového přenášeného (zdánlivého) výkonu v síti, sníží se ztráty na vedení a zlepší se zkratové poměry dané sítě.

V první kapitole (úvodní) této práce jsou shrnuty a vysvětleny, základní pojmy, hlavně co to jalový výkon je, a proč je pro nás důležitý. Poté je zde zmíněn účinník, který nám charakterizuje podíl mezi činným a zdánlivým výkonem. Jedná se vlastně o parametr, který nám udává to, jak efektivně odebíráme elektrickou energii. Také je v této kapitole okrajově zmíněna sériová kompenzace, nicméně tou se tato práce ve větší míře nezabývá.

V druhé kapitole, je popsáno rozdělení umístění kompenzačních zařízení a technické možnosti kompenzace.

Další kapitoly se zabývají způsobem regulace a druhy spínání kompenzačních zařízení.

V předposlední kapitole je uveden příklad návrhu kompenzace pro průmyslového odběratele, na kterém jde vidět, jak se změní parametry odebírané energie před a po kompenzaci.

Cíl této práce je praktický návrh kompenzace pro průmyslového odběratele.

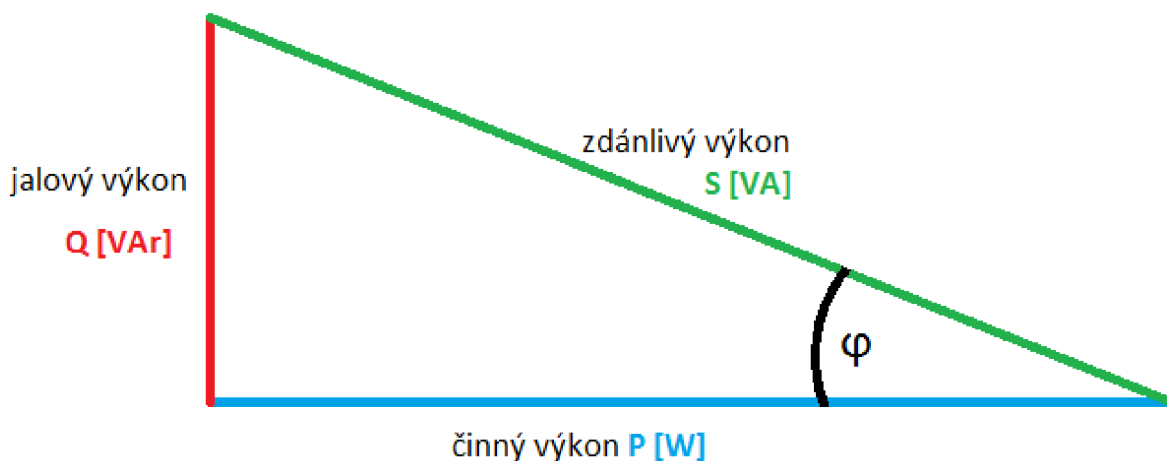
1. Základy kompenzace jalového výkonu

Tato kapitola se zabývá pochopením hlavního základu pro kompenzaci jalového výkonu. Objasňuje, co přesně jalový výkon znamená, k čemu je potřeba a jak ho kompenzovat. Dále je zmíněn účinník a v závěru důvody proč vlastně kompenzovat.

1.1 Jalový výkon

Stejně jako činný výkon, také jalový výkon odebírají ze sítě stroje, které jsou založeny na induktivním nebo kapacitním principu, jako jsou například: motory, zářivky svářečky, indukční pece, transformátory. Motor, který má induktivní charakter, potřebuje jalový výkon, aby mohl naindukovat napětí. Toto napětí vytváří magnetické pole ve vinutí statoru, a to neustále vzniká a zaniká s frekvencí sítě, na kterou je spotřebič připojen. Tudiž se jalový výkon nepřetržitě obousměrně přelívá ze zdroje do spotřebiče a naopak.

Vektorovým součtem činného výkonu, který koná práci, a jalového výkonu dostáváme výkon zdánlivý, který je znázorněn na Obr. 1 tzv. trojúhelník výkonů.



Obr. 1: Trojúhelník výkonů

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} [VA; W, VAr] \quad (1)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi [VAr; V, A-] \quad (2)$$

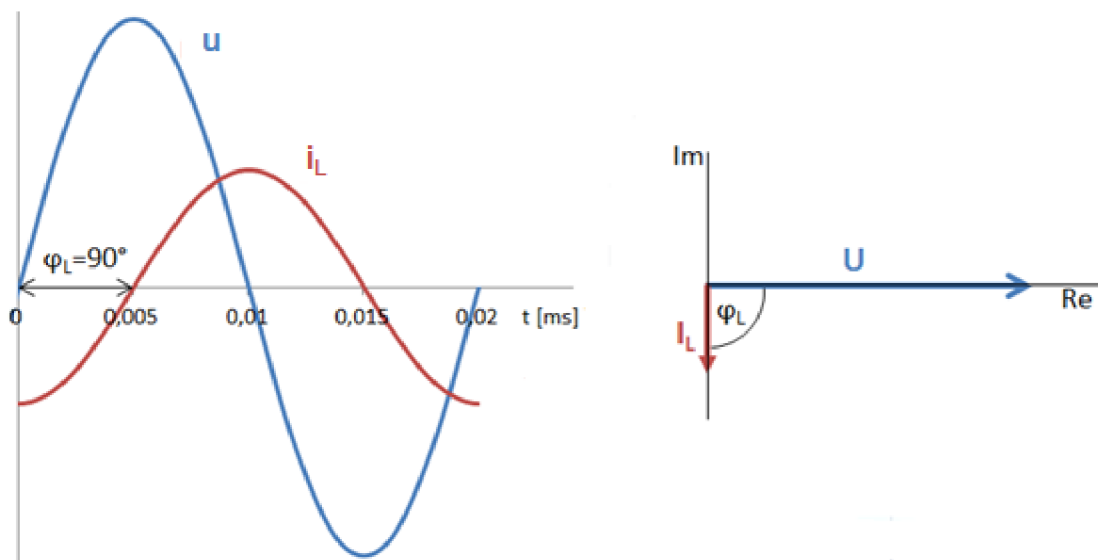
$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi [W; V, A-] \quad (3)$$

1.2 Účinník

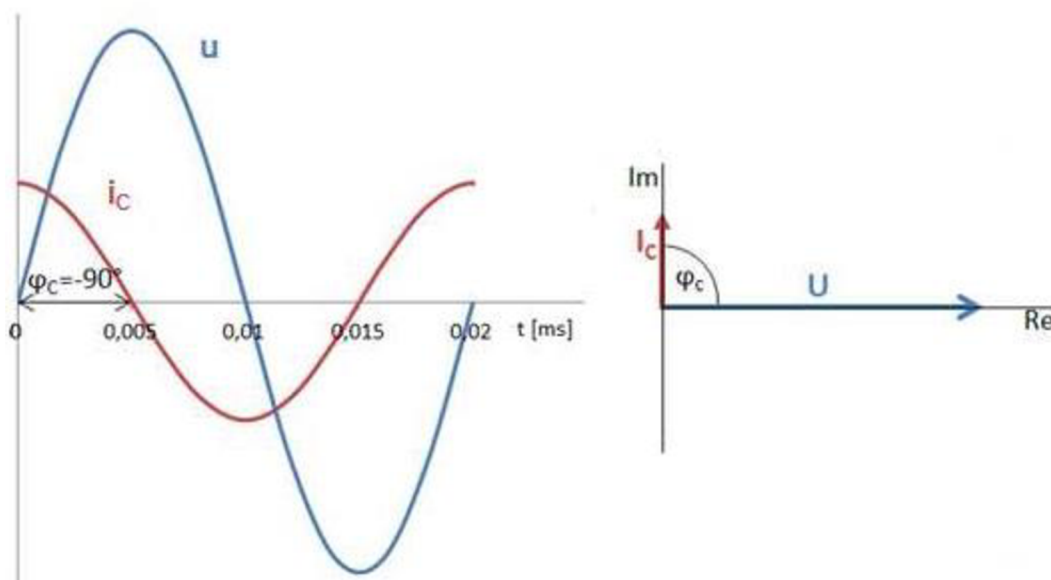
Na Obr. 1 je zobrazen ještě jeden důležitý parametr, tím je poměr mezi činným a zdánlivým výkonem. Jeho název je účinník $\cos\varphi$.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} [-; W, VA] \quad (4)$$

Účinníkem lze zhodnotit kvalitu odběru elektrické energie ze sítě, tedy jak velkou část zdánlivého výkonu obsahuje výkon činný. Účinník je závislý na fázovém vzájemném posuvu napětí a proudu. Pokud má zátěž induktivní charakter (v obvodě je cívka) zpožďuje se proud I_L o -90° za napětím viz Obr. 2. Má-li zátěž kapacitní charakter (v obvodě je kondenzátor) předbíhá proud I_C o $+90^\circ$ napětí viz Obr. 3. Potom je výsledná velikost proudu rovna rozdílu těchto dvou proudů a i výsledný jalový výkon je dán rozdílem kapacitního a induktivního jalového výkonu.



Obr. 2: Posun čistě induktivní zátěže [2]



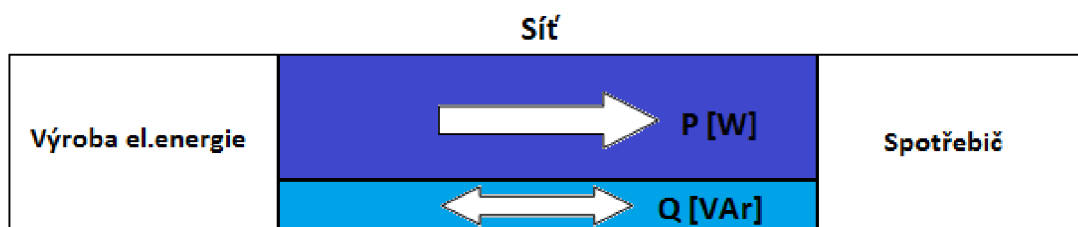
Obr. 3: Fázový posun čistě kapacitní zátěže [2]

1.3 Kompenzace

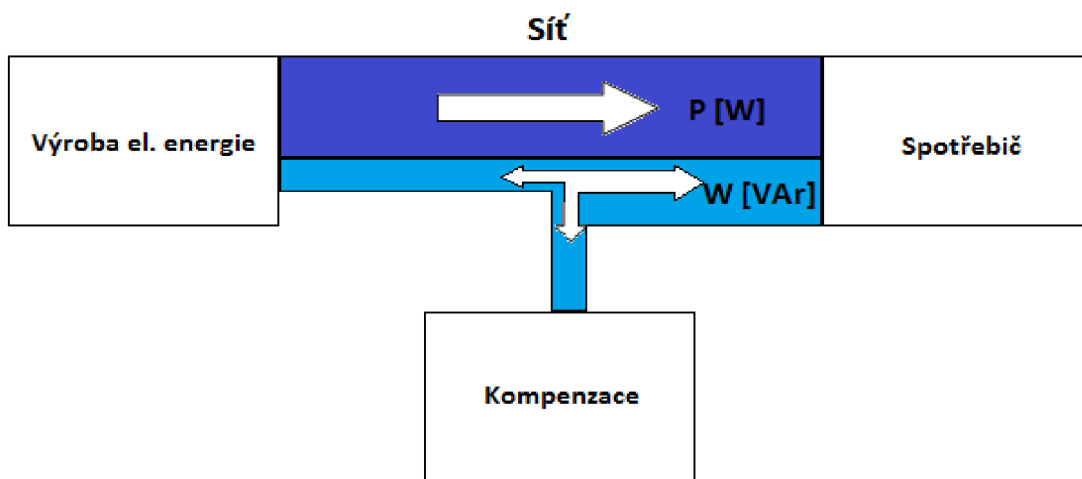
Principem kompenzace odběru elektrické energie je snaha, aby spotřebič neodebíral jalový výkon ze sítě a tím danou síť zbytečně nezatěžoval. Aby k tomu nedocházelo, je nutné zdroj jalového výkonu umístit co nejbližší ke spotřebiči například cívku

nebo častěji používaný kondenzátor. Jelikož je převážná většina elektrických spotřebičů založena na induktivním charakteru (odebírají ze sítě takzvaný induktivní jalový výkon Q_L), tak pro snížení jalového výkonu musíme dodat výkon opačného charakteru, tedy kapacitní jalový výkon Q_K .

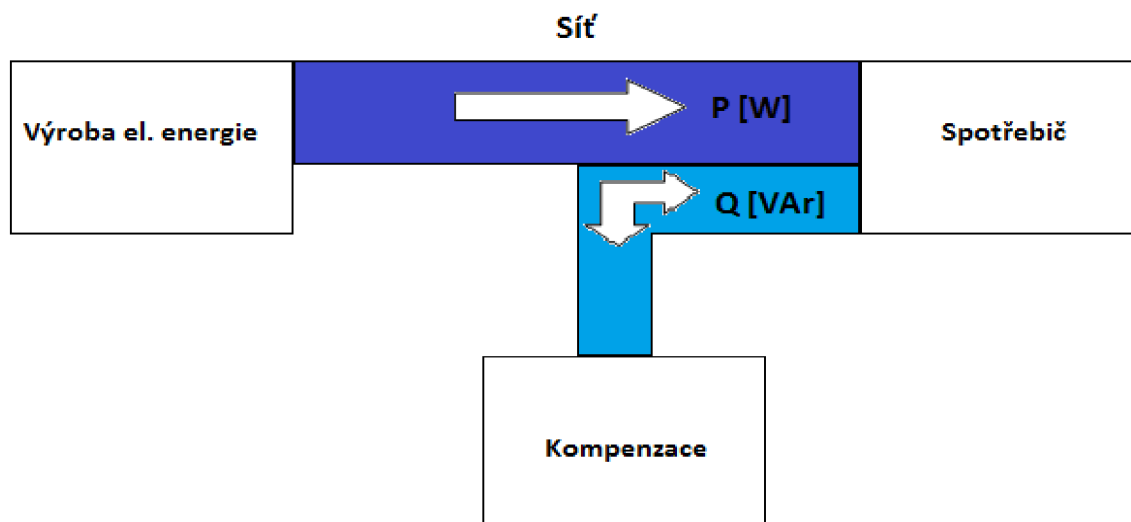
Kompence má celkem 3 stavy. Prvním z těchto stavů je tzv. **žádná kompenzace**, kdy se jalový výkon vyměňuje mezi místem výroby (elektrárnou) a spotřebičem (motor) a maximálně tím zatěžuje elektrickou síť, jak lze vidět na Obr. 4. Dále existuje **částečná kompenzace** Obr. 5, kdy větší část jalového výkonu kmitá mezi kompenzátorem a spotřebičem a menší část jalového výkonu si spotřebič odeberá i ze sítě. A v poslední řadě **kompenzace úplná** kdy se jalový výkon vyměňuje jen mezi kompenzátorem a spotřebičem a ze sítě si už jalový výkon neodebírá, jak lze vidět na Obr. 6. Toto by ale znamenalo, že účinník $\cos\varphi = 1$, to v praxi nelze, neboť by hrozilo překompenzování a nevyžádané dodávání jalového výkonu do sítě. Nejčastěji dochází ke kompenzování na účinník $\cos\varphi = 0,97$.



Obr. 4: Odběr elektrické energie bez kompenzace

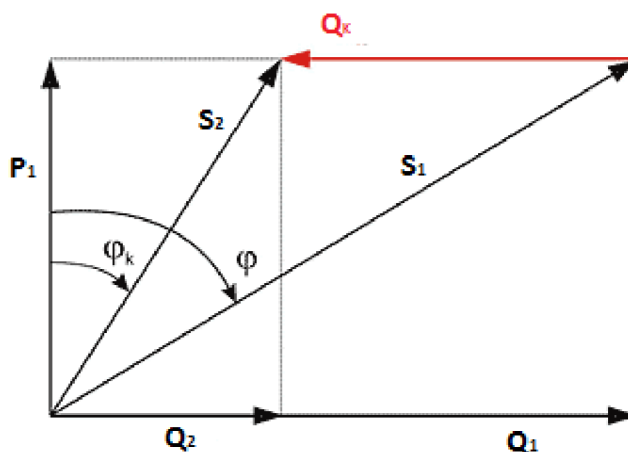


Obr. 5: Odběr elektrické energie s částečnou kompenzací



Obr. 6: Odběr elektrické energie s úplnou kompenzací

Na dalším Obr. 7 je znázorněn fázový diagram se všemi vyznačenými výkony před a po kompenzaci při stejné velikosti činného výkonu.



Obr. 7: Trojúhelník výkonu předa po kompenzaci

- P_1 ... činný výkon
- S_1 ... zdánlivý výkon před kompenzací
- S_2 ... zdánlivý výkon po kompenzaci
- Q_1 ... jalový výkon před kompenzací
- Q_2 ... jalový výkon po kompenzaci
- Q_k ... jalový výkon dodaný kompenzátořem
- φ_1 ... účinník $\cos\varphi$ před kompenzací
- φ_2 ... účinník $\cos\varphi$ po kompenzaci

1.3.1 Sériová kompenzace

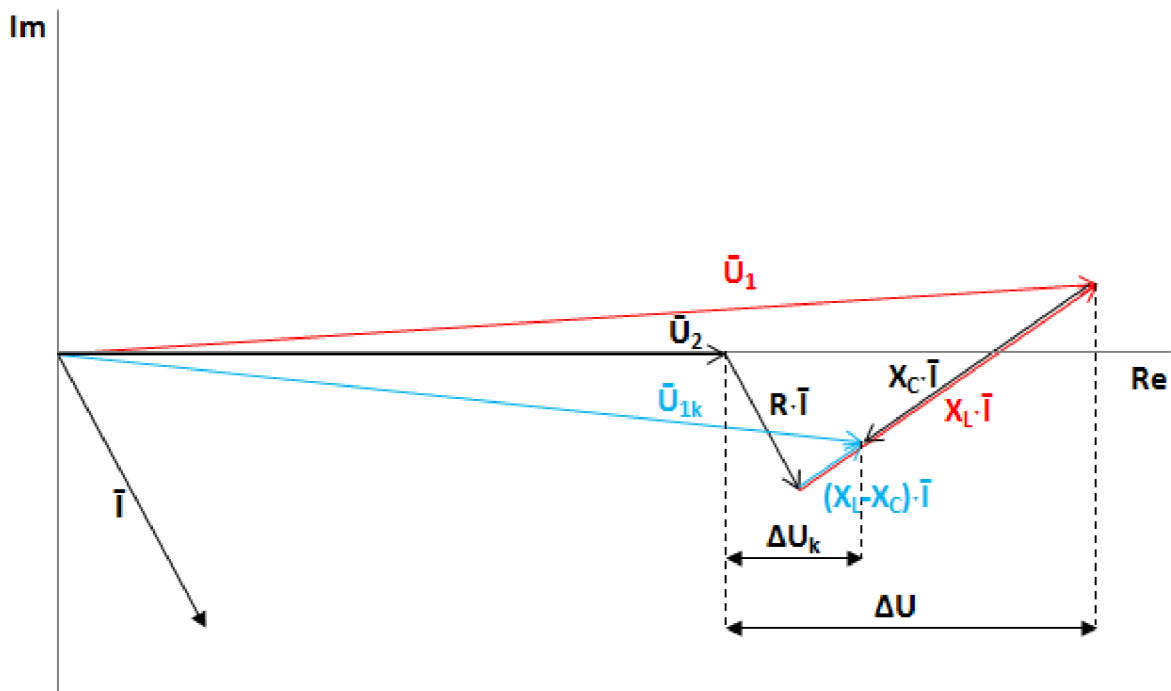
Jak z názvu vyplývá tak se jedná o kompenzační zařízení připojené do série s vedením. Sériová kompenzace se využívá ke kompenzaci úbytku napětí na velké vzdálenosti u VVN (velmi vysoké napětí) a VN (vysoké napětí) vedeních, kde kompenzuje podélnou

impedanci a nikoliv jalový výkon. Přenášený výkon je stále stejný. Na Obr. 8 je znázorněno schéma zapojení, kde kondenzátor C slouží jako kompenzační zařízení.



Obr. 8: Schéma zapojení sériové kompenzace

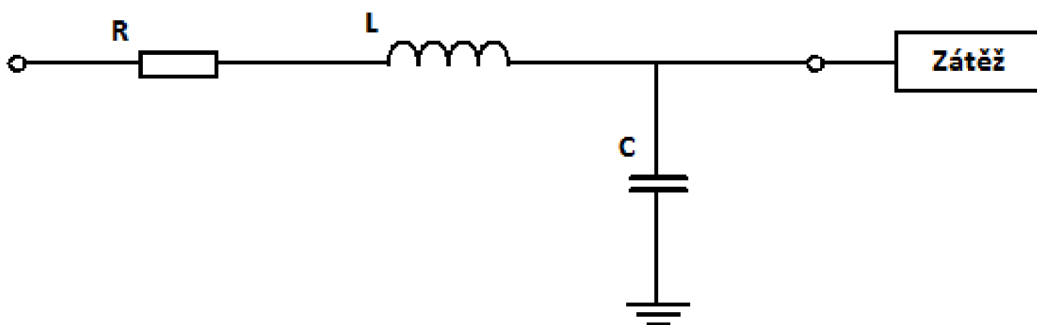
Na fázorovém diagramu Obr. 9 můžeme vidět změnu napěťových poměrů před (U_1) a po kompenzaci (U_{1k})



Obr. 9: Fázorový diagram sériové kompenzace [2]

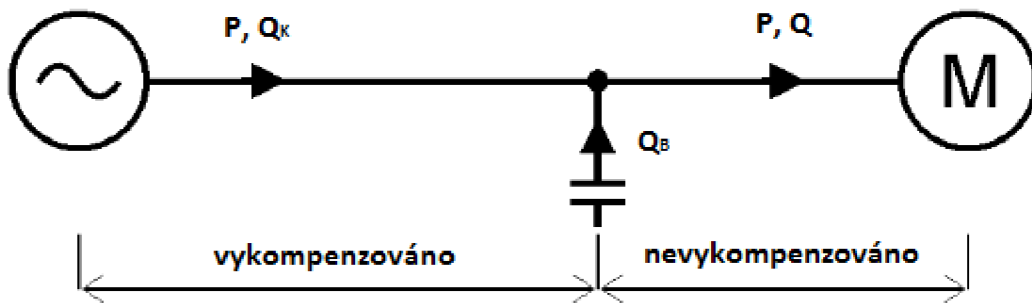
1.3.2 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace je častější a používá se ke kompenzování jalového výkonu, na rozdíl od sériové kompenzace, kde se kompenzují úbytky napětí. Kompenzační prostředek (většinou se používá kondenzátorová baterie) je zapojený paralelně ke spotřebiči a dodává mu potřebný jalový výkon.

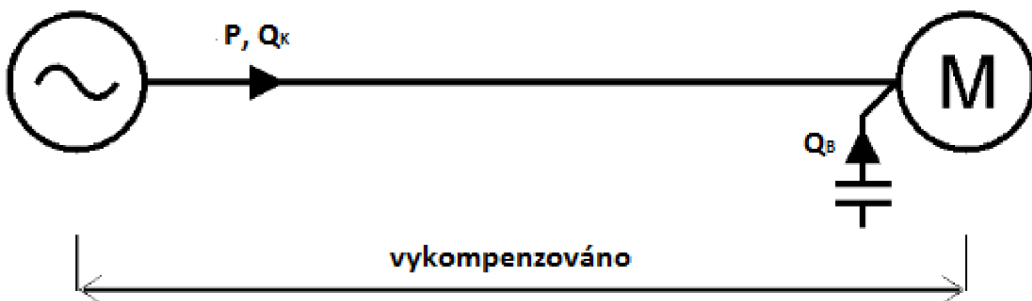


Obr. 10: Schéma zapojení paralelní kompenzace

Kondenzátorová baterie by měla být umístěna co nejbližší místu zátěže (např. motor), aby se vykompenzovala co největší část vedení, jak to lze vidět na Obr. 11 a Obr. 12, avšak ne vždy je to možné.



Obr. 11: Vykompenzována část vedení [1]



Obr. 12: Vykompenzované celé vedení [1]

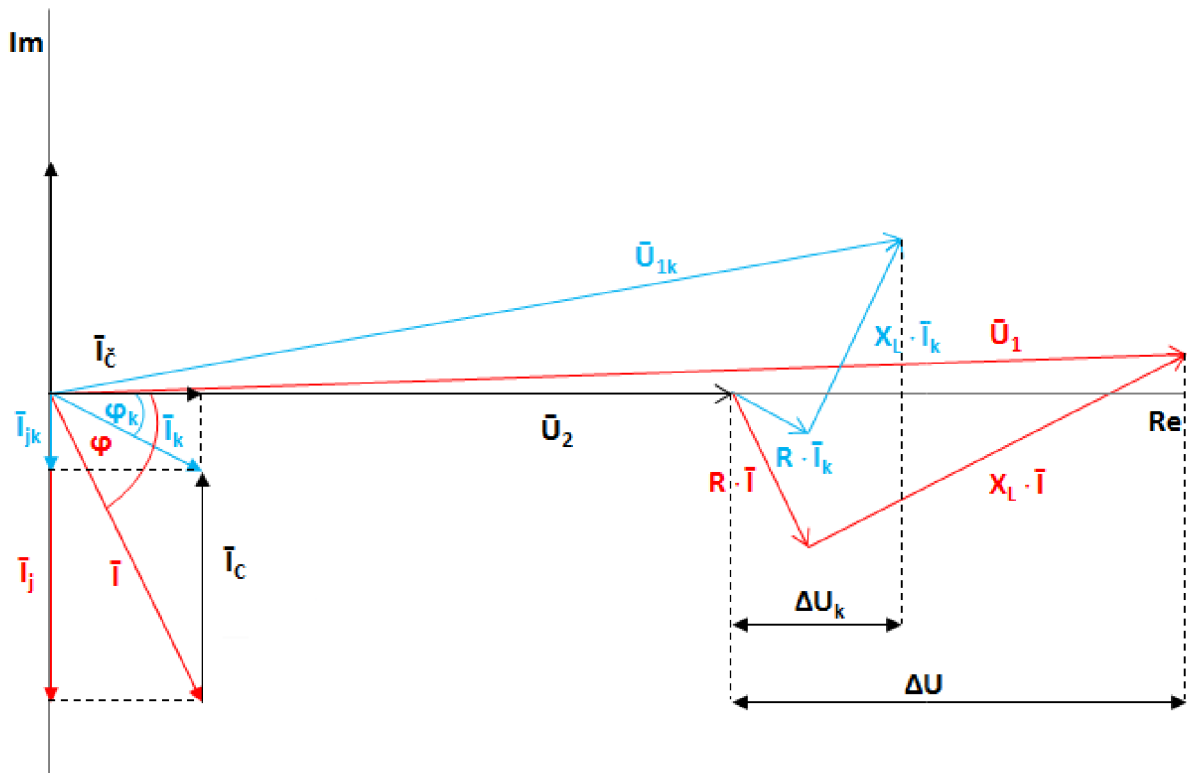
P... činný výkon

Q... jalový výkon pro činnost spotřebiče

Q_K ... jalový výkon procházející vedením po kompenzaci

Q_B ... jalový výkon dodávaný kondenzátorovou baterií (kompenzační výkon)

Na fázorovém diagramu je zobrazen princip paralelní kompenzace, kde modrá část je s kompenzací a červená bez kompenzace.



Obr. 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace [2]

Potřebný jalový výkon kondenzátorové baterie lze vypočítat pomocí vztahu:

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad [\text{Var}; \text{W}, -] \quad (5)$$

1.4 Proč kompenzovat?

- **snížení nákladů na rozvodnou síť** – transformátory, elektrické rozvodny, průřezy vodičů musí být dimenzovány na zdánlivý výkon. Snížením jalového výkonu se automaticky sníží i zdánlivý výkon a je možné dimenzovat na menší výkony.

- **snížení tepelných ztrát** – ztráty jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu. Pokud se podaří snížit jalovou složku proudu, sníží se tím celkový proud a tím poklesnou i celkové ztráty. To je znázorněno i v následující rovnici.

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \cdot (I_c^2 + I_j^2) [W; \Omega, A] \quad (6)$$

- **snížení úbytků napětí na vedení** – úbytek napětí je způsoben zdánlivým proudem I s fázovým posunem φ a impedancí sítě, tedy činným odporem R a reaktancí X .

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi [V; \Omega, A, -, \Omega] \quad (7)$$

- **zlepšení zkratových poměrů v síti** – je způsobeno snížením buzení generátoru, dochází ke zmenšení nárazového zkratového proudu a nesymetrie ss (stejnoseměrné) složky a v důsledku toho dochází ke zlepšení vypínacích podmínek a namáhání vypínače.

1.5 Překompenzované sítě

Překompenzované sítě se nejčastěji vyskytují u dlouhých kabelových vedení nebo u dlouhých nezátížených vedení, kdy kapacita roste zejména s délkou, geometrickým uspořádáním kabelu a jeho napěťovou hladinou. Tento základní parametr (kapacita) vedení může způsobit, že při nesprávném provozu kompenzačních zařízení dochází k nárůstu, nevyžádané dodávky kapacitního výkonu. Abychom tuto nevyžádanou dodávku kapacitního výkonu eliminovali, je nutné do obvodu zapojit tzv. dekompenzační tlumivku. Tlumivka se chová jako opak kondenzátorů a proto se nazývá dekompenzační. [11]

2. Kompenzační zařízení

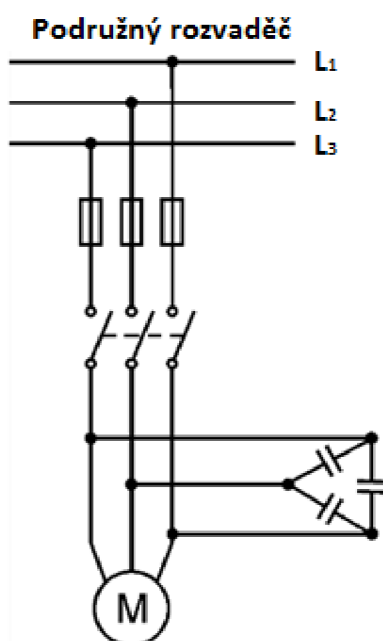
2.1 Základní možnosti umístění kompenzace

V této kapitole je rozebrána paralelní kompenzace podle umístění kompenzační baterie.

2.1.1 Individuální kompenzace

Každý spotřebič má své vlastní kompenzační zařízení, které je připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti, tudíž je vykompenzováno celé vedení od zdroje až po spotřebič. V síti NN (nízkého napětí) nemusí mít kondenzátor vybíjecí zařízení, neboť se vybíjí přes vinutí motoru při odpojení ze sítě. Nehrozí nebezpečí překompenzování, protože kondenzátor se vypíná a zapíná zároveň se spotřebičem, a proto nepotřebuje žádné spínací prvky, takže individuální kompenzace je nejjednodušší a nejspolehlivější. Tato kompenzace se používá například u klasických zářivek s indukčním předradníkem, kdy je v každém svítidle kompenzační kondenzátor.[1][2]

Nevýhodou tohoto zapojení je, že každý spotřebič potřebuje svůj vlastní kondenzátor, který zabírá určité místo. Údržba je obtížnější a je i ekonomicky náročnější. Proto se používá u spotřebičů s velkou soudobostí (časovou využitelností) a u větších motorů nad 5 kW.[1][2]

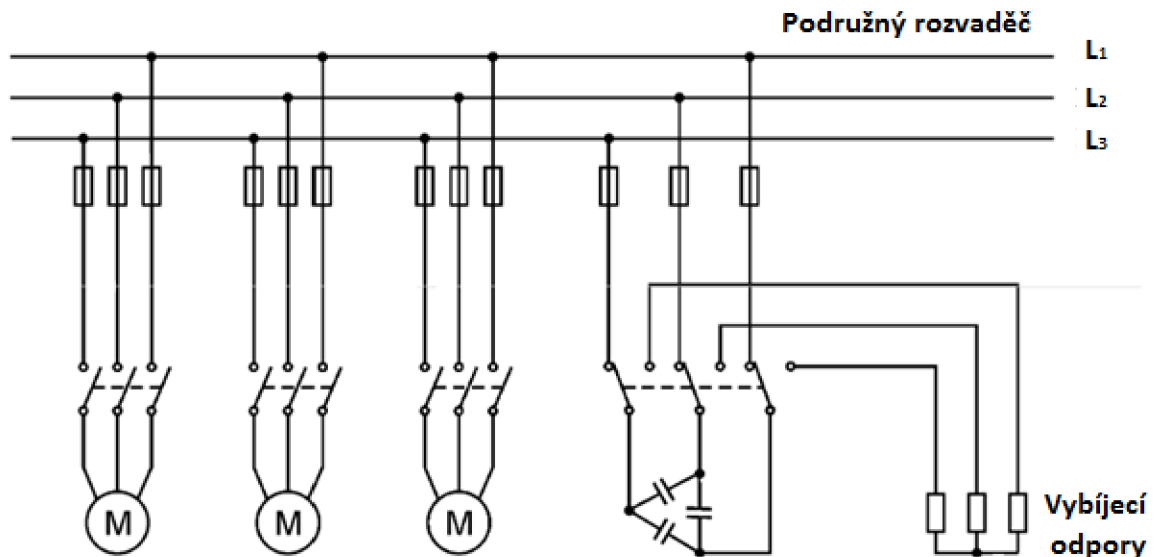


Obr. 14: Individuální zapojení kompenzace

2.1.2 Skupinová kompenzace

Kondenzátory jsou připojené na přípojnících rozváděče pro určitou skupinu rozvaděčů, sloužících pro více spotřebičů indukčního výkonu, které pracují v různou dobu. Tato kompenzace se nejčastěji provádí na rozvaděčích NN (nízkého napětí). Přívodní vedení od zdroje až k podružnému rozvaděči je vykompenzováno. Za ním až k jednotlivým

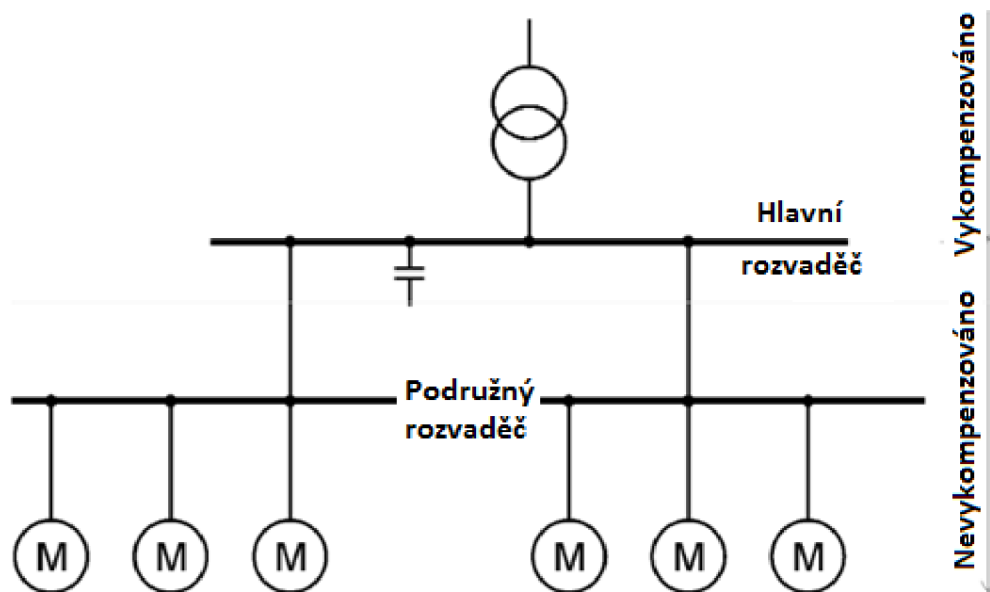
spotřebičům je zatížení jalovou složkou, musí se dimenzovat na plný výkon. Kompenzuje se soudobost odebíraného výkonu, tedy součet výkonu v danou chvíli odebíraného. K regulaci (řízení) je potřeba **přístrojová výzbroj** - spínací prvky, nejčastěji stykače, jištění, regulace, v některých případech ochranné tlumivky a vybíjecí odpory (po odpojení kondenzátoru od napájení zůstává na elektrodách elektrický náboj, který potřebujeme vybit). [1][2]



Obr. 15: Skupinové zapojení kompenzace [1]

2.1.3 Centrální kompenzace

Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnicích hlavního rozvaděče, kompenzuje se tak celý závod najednou. Celková soudobost přístrojů klesá a tím i potřebný jalový výkon. Opět je nutná přístrojová výzbroj, regulátory které spínají jednotlivé kondenzátory podle aktuálního požadavku kompenzačního výkonu. [1][2]



Obr. 16: Centrální zapojení kompenzace [1]

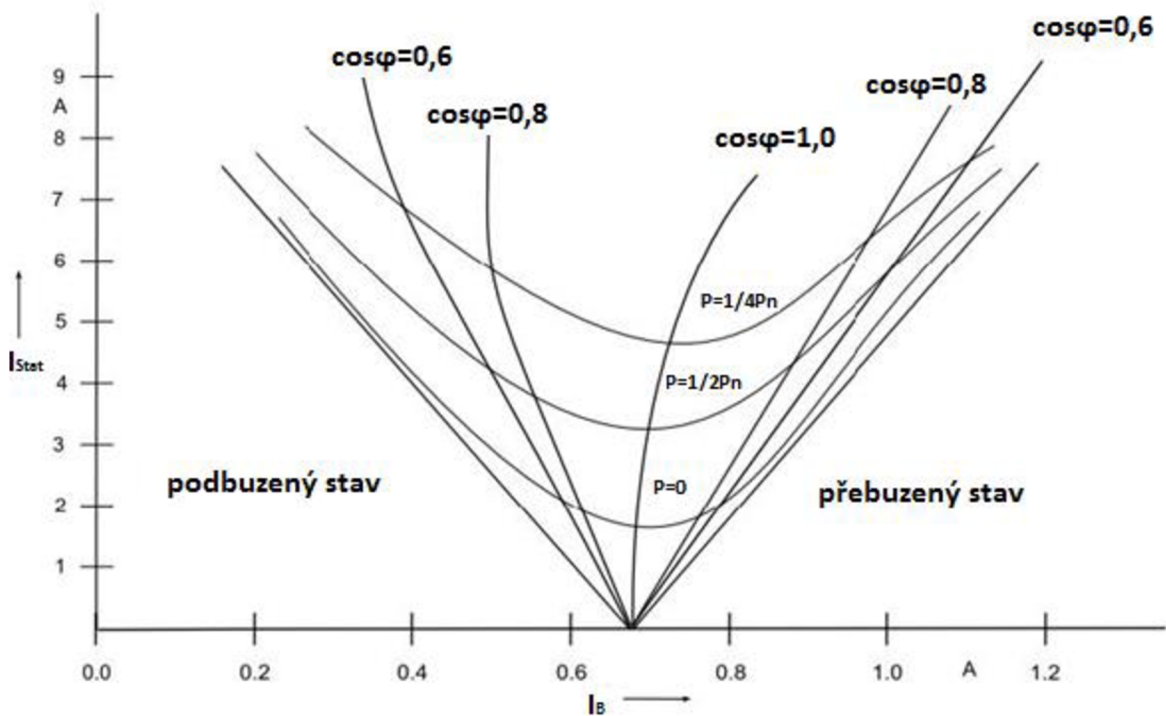
2.1.4 Kombinovaná kompenzace

Jinými slovy smíšená kompenzace. Jedná se o kombinaci dvou nebo tří předchozích kompenzací. Bývá používána především v rozsáhlejších průmyslových sítích, např. k velkým motorům, které pracují nepřetržitě, se použije individuální kompenzace a ke skupině menších motorů pracujících v různou dobu se použije skupinová kompenzace.

2.2 Rotační kompenzační zařízení

Do této skupiny se řadí synchronní stroje. Synchronní elektrický stroj je charakterizován tím, že se mu magnetizační energie dodává samostatným budícím vinutím napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu. Synchronní stroje se používají tam, kde lze předpovídat stabilní zátěžový moment, například pro pohony čerpadel, ventilátoru a kompresoru. Měníme-li velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí a kmitočtu, je za předpokladu konstantního zátěžového momentu stálý i činný výkon. Změnou velikosti budícího proudu lze měnit účinnost a to v oblasti jak induktivní, tak i v oblasti kapacitní.

Závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu Obr. 16 tzv. V-křivky.[4]



Obr. 17: V-křivky synchronního stroje[4]

K dosažení stálého účinníku při různém zatížení je potřeba vhodně řídit budící proud. Regulátory, kterými se osazují synchronní stroje, mohou zajistit chod motoru i při změnách činného zatížení buď s konstantním účinníkem, nebo s konstantním jalovým výkonem. Těchto vlastností lze využít ke kompenzaci jalového výkonu paralelně připojených spotřebičů. Tyto synchronní motory pracují naprázdno s minimálním činným výkonem a s poměrně velkým rozsahem regulace jalového výkonu. Synchronní stroje jsou nejčastěji konstruovány na vysoké napětí 6 kV s výkonem, který se pohybuje v rozmezí od 1 MVA_r do 15 MVA_r., a využívají se nejčastěji jako centrální kompenzace v rozsáhlých průmyslových podnicích. [4]

2.3 Kompenzační výkonové kondenzátory

Výkonové kondenzátory se využívají pro kompenzaci jalového výkonu induktivního charakteru. Kondenzátorové jednotky se vyrábějí jako jednofázové nebo třífázové. U třífázových potom s vnitřním zapojením do trojúhelníku nebo do hvězdy. Nevýhodou zapojení do trojúhelníku je sdružené napětí na jednotlivých kondenzátorech. Proto se zapojení do trojúhelníku většinou používá na hladině nízkého napětí (do 1 kV) nebo u trojfázových VN kondenzátorů pro individuální kompenzaci 6 kV elektromotorů. Zapojením kondenzátorů do hvězdy se naopak napěťové zatížení svitků nebo jednofázových kondenzátorových jednotek sníží oproti zapojení do trojúhelníku. Toto zapojení se používá převážně na hladině vysokého napětí. U kondenzátoru je kladen důraz

na tři základní vlastnosti, aby byl **odolný vůči přepětí**, měl dobrou **tepelnou stabilitu při vysokém jalovém výkonu** a v poslední řadě musí být **spolehlivý a bezpečný provoz**. [3]

Celkový kapacitní výkon kondenzátoru je dán podle vztahu č. 8.

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C [\text{VAR}; V, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{Hz}, F], \quad (8)$$

kde:

ω ... úhlová rychlost

C ... kapacita kondenzátoru

U ... napětí sítě

f ... kmitočet sítě

Další důležitou vlastností je kmitočtová závislost impedance. Kapacitní reaktance je jalovou složkou impedance a lze ji vypočítat podle vztahu č. 9.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} [\Omega; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{Hz}, F]. \quad (9)$$

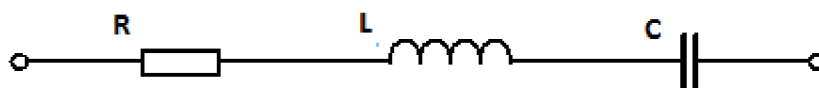
Ze vztahu je možné vyčíst, že při zvyšujícím se kmitočtu se snižuje kapacitní reaktance a tím i celková impedance kondenzátoru. Jakmile připojíme kondenzátor do sítě s vyšším obsahem harmonických, bude tento kondenzátor představovat velmi nízkou impedanci. Vlivem harmonických vzroste celková efektivní hodnota proudu a ten bude přetěžovat jak kondenzátor, tak i určitou část instalace mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem. Při zvýšeném proudu kondenzátorem dochází ke zvýšení provozní teploty a urychluje se tak degradace dielektrika i impregnantu. V těchto případech je třeba zajistit vhodný způsob jištění kompenzačních zařízení, spočívající v použití speciálních pojistek, nadproudových ochranných, nebo zvážít zahrazení kondenzátorů ochrannými tlumivkami – viz následující kapitola.



Obr. 18: Výkonové kondenzátory [5]

2.4 Chráněné kompenzační sekce

Tato kompenzace se využívá v sítích, které jsou charakterizovány harmonickým zkreslením základní křivky napětí (větší množství nelineárních zátěží) a v prostředí kde je větší nebezpečí vzniku rezonance. K této rezonanci může docházet díky velikosti kompenzační kapacity a indukčnosti některých prvků napájecí sítě nebo spotřebičů. Je to zapojení tlumící tlumivky a kondenzátoru do série jak lze vidět na Obr. 19 RLC článek.[6][7]



Obr. 19: RLC článek

Obvod pracuje jako sériový rezonanční obvod, kdy je pro kmitočty nad vlastním rezonančním kmitočtem, má induktivní charakter a tudíž nebezpečné rezonanční jevy vybuzené nelineární zátěží eliminuje. Resonanční kmitočet je dán vztahem č. 10.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\cdot C}} \text{ [Hz; F, C]} \quad (10)$$

Takto zabráňuje vzniku rezonančních jevů, které by snížily životnost kondenzátorů, vypínacích jističů či jiných ochran. Tlumivka omezuje jednak proudy od harmonických, ale také proudy vzniklé přechodnými jevy, zejména při spínání nenabitých kondenzátorů paralelně k nabitým.

Volba rezonančního kmitočtu by měla být v dostatečné vzdálenosti pod kmitočtem nejnižšího řádu harmonické, která je v síti dominantní. Resonanční kmitočet v rozmezí od 100 Hz – 150 Hz (pod 3. harmonickou), nebo v rozmezí 150 Hz – 250 Hz (pod 5. harmonickou). V praxi se obvykle volí 134 Hz, 189 Hz, nebo 210 Hz.

Pro vhodnou volbu kompenzačního článku se využívá takzvaný činitel ztlumení, který je dán vztahem č. 11.

$$p = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \cdot 100 \text{ [%; Hz, Hz]}, \quad (11)$$

kde:

f_1 ... kmitočet základní harmonické 50 Hz

f_r ... rezonanční kmitočet RLC obvodu

Přehled standardních činitelů ztlumení a rezonančních kmitočtů o jmenovitém kmitočtu 50 Hz:

- 5,67%, 210 Hz

- 7 %, 189 Hz

- 14 % 134 Hz

S připojením tlumivky do série s kondenzátorem vzroste napětí na kondenzátoru, které lze vypočítat podle vzorce č. 11. Proto je nutné volit kondenzátor s vyšším jmenovitým napětím než je napájecí napětí.[6][7]

$$U_c = \frac{U_n}{1 - \frac{P}{100}} [V; V, \%], \quad (12)$$

kde:

U_n ... jmenovité napětí sítě

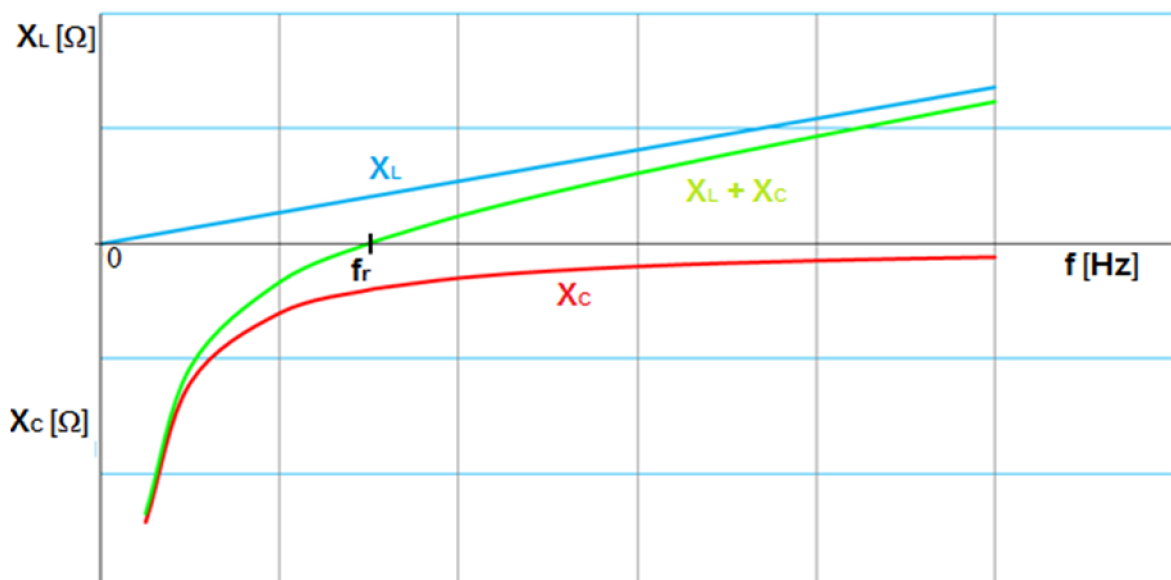
P ... činitel ztlumení

2.5 Dekompenzační tlumivky

Tyto tlumivky mají přesně opačný význam než kompenzační kondenzátory. Jsou určeny pro eliminaci (kompenzaci) nežádoucího jalového výkonu kapacitního charakteru, který vzniká na parazitních prvcích rozvodné soustavy, například dlouhá kabelová vedení, nebo dlouhá nezátížená vedení. Dekompenzační člen se skládá z jednotlivých stupňů o určitých výkonech, který je řízen regulátorem účinníku podobně jako u kompenzačních členů. Zapojení se provádí paralelně k síti. Tlumivky se vyrábějí se železným jádrem.

2.6 Kompenzační filtry

Je to opět stejné zapojení jako u hrazené kompenzace s tím rozdílem, že rezonanční kmitočet je laděn na kmitočet konkrétní harmonické, a tím dochází k poklesu impedance této sériové LC kombinace. Pro harmonické nižší než je rezonanční kmitočet se však chová jako kompenzační obvod a tedy pouze kompenzuje jalový výkon. [7]



Obr. 20: Závislost impedance RLC odvodu na kmitočtu

Vzhledem k tomu, že vhodnou volbou parametrů kapacity a indukčnosti dochází k požadovanému snížení impedance tohoto obvodu na daném kmitočtu a tedy kromě průchodu kapacitního proudu na první harmonické i „odsávání“ proudu konkrétní harmonické, je nutné kompenzační kondenzátory i filtrační tlumivky proudově dimenzovat i na toto přetěžování. Z tohoto důvodu se pro filtraci harmonických používají kondenzátory s dovoleným proudovým přetížením minimálně 30 %. U filtračních tlumivek, které jsou konstruovány pro napěťové hladiny do 10 kV zpravidla se železným jádrem, musí být zaručena jejich linearita i pro vyšší proudy, aby nedocházelo k rozladování kompenzačního filtru. Ze stejného důvodu musí být vhodným zařízením neustále kontrolována velikost kapacity použité kondenzátorové baterie. [14]

3. Regulace kompenzačních zařízení

K regulaci slouží regulátor, který monitoruje stav v rozvodné síti a na základě rychlých a přesných výpočtů připojuje nebo odpojuje jednotlivé kompenzační baterie pro dosažení požadovaného účinníku. Současné regulátory bývají vybaveny přesnými proudovými, napěťovými obvody a digitálním zpracováním naměřených hodnot, které dosahují vysoké přesnosti vyhodnocování jak skutečné efektivní hodnoty proudu, tak fázového posuvu. Technicky náročnější regulátory vyhodnocují při měření proudu úroveň harmonických až do 19. řádu a měří i velikost napětí a tedy jsou schopny spočítat skutečný jalový výkon. Regulátory jsou doplněny o komunikační linku, lze pak sledovat na vzdálených počítačích jejich měřené hodnoty a lze také provádět parametrizaci daného regulátoru. Jsou také schopny provádět průběžnou kontrolu jednotlivých kompenzačních stupňů a v případě poruchy vyřadit poškozený stupeň z regulačního procesu. [10]

3.1 Stupňovitá regulace

Stupňovitá regulace není vhodná pro síť s velkými a rychlými změnami zatížení, protože se kompenzační výkon mění skokově, to může vést k překompenzování nebo nedokompenzování sítě. Proto je důležité zvolit vhodnou jemnost regulace, která závisí na počtu a velikosti jednotlivých kompenzačních stupňů. Volba počtu závisí na velikosti jednoho stupně, potřebném kompenzačním výkonu, a zadané hodnotě vykompenzování. Stykač pro nejmenší stupeň má největší četnost spínání a tím je zkrácena jeho životnost. [7][11]

Velikost jednoho kompenzačního stupně určíme z minimálního odebíraného činného výkonu podle vztahu č. 12

$$Q_{C1} = P_{min} \cdot \operatorname{tg} \varphi [VAr; W], \quad (13)$$

kde:

Q_{C1} ... jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

P_{min} ... minimální činný výkon

V praxi nebývají jednotlivé stupně stejně velké ale násobky předchozích. Počet stupňů vypočítáme podle vzorce č. 13. [7]

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \operatorname{tg} \varphi}{Q_{C1}} [-; VAr, W, VAr], \quad (14)$$

kde:

N ... počet stupňů

Q_L ... jalový výkon zátěže

P ... činný výkon

Q_{C1} ... jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

Pro stupňovitou regulaci na nízké hladině napětí se používají stykače, jejichž hlavní kontakty jsou dimenzovány na spínání kapacitních proudů. Většinou se jedná o vzduchové nebo vakuové stykače. Na hladině VN se používají vypínače. [11][12]

3.2 Plynulá regulace

Plynulá regulace se používá v sítích, kde dochází k častým změnám zatížení. Jde o klasickou kompenzaci, ke které je paralelně připojena dekompenzační tlumivka, která je spínána tyristorovým spínacím prvkem. V případě, že je potřeba kompenzovaný výkon kapacitního charakteru snížit, aby nedošlo k překompenzování, zapůsobí dekompenzační tlumivka. Tato tlumivka je regulována fázově řízeným spínacím napětím. [13]

4. Spínání kompenzačních zařízení

4.1 Kontaktní spínání

Kontaktní spínané kompenzátory pracují na principu přímého připínání kompenzačních stupňů na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu. Používají se tam, kde nejsou kladeny nároky na rychlost kompenzace. Při použití klasických stykačů je velkým nedostatkem vznik přechodových dějů při připnutí kondenzátorů na síť. Při připínání nenabitého kondenzátoru k síti je nabíjející proud omezován poměrně velkou impedancí sítě, ovšem tento případ není častý. Jde o připínání prvního kompenzačního stupně. Při připínání nenabitého kondenzátoru k nabitým, je impedance omezující amplitudu nabíjejícího proudu nízká. Proudů mohou dosahovat až třicetinásobku jmenovitého proudu. Často mohou způsobit i vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv a napájecí síť. Tyto nevýhody lze snížit předřazením ochranných (tlumících) tlumivek a zejména použitím stykačů s odporovým spínáním. Stykače s odporovým spínáním jsou speciální variantou klasických stykačů. Jsou to stykače se dvěma sadami kontaktů, z nichž jedna spínaná v předstihu a má v sérii spínací rezistory, zatímco druhá sada hlavních kontaktů tyto rezistory vzápětí překlene a připne kondenzátor k plnému napětí. [9] [14]

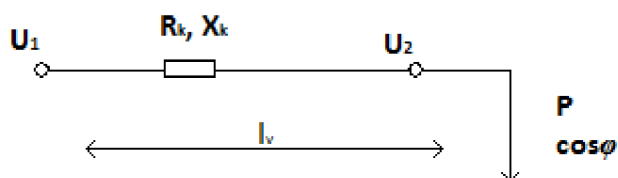
4.2 Bezkontaktní

Bezkontaktní spínání se používá v aplikacích, kde jsou kladeny nároky na rychlost změny jalového výkonu. Současně je nutno použití rychlého regulátoru jalového výkonu. U bezkontaktních kompenzačních sekcí je nahrazen stykač bezkontaktním spínačem. Kondenzátorům se zde předřazují ochranné tlumivky, aby se zabránilo přechodovým jevům a proudovým rázům při připnutí kondenzátoru na síť. Použití tlumivek účinně omezují i harmonické. V praxi je tento bezkontaktní spínač tvořen dvojicí antiparalelních tyristorů. Požadavky na toto spojení tyristorů vyžadují nutnost spínání tyristorů při průchodu nulou, tedy synchronně se sítí. Tento požadavek spolu s požadavky na rychlost spínání a opakování sepnutí kondenzátorů i částečně nebo plně nabitých komplikuje provedení řídicích obvodů.[9]

5. Příklad výpočtu kompenzace jalového výkonu

5.1 Zadání

Průmyslový odběratel odebírá výkon $P = 500 \text{ kW}$ s účinníkem $\cos\varphi = 0,65$. Podnik je připojen k rozvodně třífázovým symetrickým vedením délky $l_v = 25 \text{ km}$. Napětí na začátku vedení je $U_1 = 6 \text{ kV}$. Vypočtěte stav před a po kompenzaci, úbytek napětí na konci vedení a ztráty činného výkonu. Počítejte s parametry vedení: reaktance $X_k = 0,34 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ a rezistence $R_k = 0,15 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Účinník po kompenzaci má být dle zadání $\cos\varphi = 0,97$.



Obr. 21: Schéma zapojení paralelní kompenzace

Výpočet reaktance a rezistence vedení o délce $l_v = 25 \text{ km}$

$$X = X_k \cdot l_v = 0,34 \cdot 25 = 8,5 \Omega$$

$$R = R_k \cdot l_v = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \Omega$$

Výpočet $\sin\varphi$ a $\text{tg}\varphi$, které budeme později ve výpočtech potřebovat.

$$\sin\varphi = \cos^{-1}(\cos\varphi) = \cos^{-1}(0,65) = 0,76$$

$$\text{tg}\varphi = \cos^{-1}(\cos\varphi) = \cos^{-1}(0,65) = 1,17$$

$$\text{tg}\varphi_k = \cos^{-1}(\cos\varphi_k) = \cos^{-1}(0,97) = 0,251$$

Pro úbytek napětí na vedení platí

$$\overline{\Delta U} = \bar{I} \cdot \bar{Z} = (I_{\checkmark} + j \cdot I_j) \cdot (R + j \cdot X) = (I_{\checkmark} \cdot R + I_j \cdot X) + j(I_{\checkmark} \cdot X + I_j \cdot R) \quad (15)$$

Při zanedbání imaginární složky dostaneme zjednodušení ve tvaru

$$\Delta U = I_{\checkmark} \cdot R + I_j \cdot X, \quad (16)$$

5.2 Stav před kompenzací

Výpočet velikosti jalového výkonu

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = 500 \cdot 10^3 \cdot 1,17 = 585 \cdot 10^3 \text{Var}$$

Pro činný a jalový proud platí

$$I_c = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (17)$$

$$I_j = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (18)$$

Teď si můžeme dosadit jednotlivé proudy a rozdíl napětí do rovnice č. 16 a vyjádřit napětí na konci vedení U_2 .

$$\begin{aligned} \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} &= R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_2} \\ U_1 \cdot U_2 - U_2^2 &= R \cdot P + X \cdot Q \\ -U_2^2 + U_1 \cdot U_2 - R \cdot P - X \cdot Q &= 0 \\ -U_2^2 + 6000U_2 - 3,75 \cdot 500 \cdot 10^3 - 8,5 \cdot 585 \cdot 10^3 &= 0 \\ -U_2^2 + 6000U_2 - 6847500 &= 0 \end{aligned}$$

Řešením této kvadratické rovnice dostáváme jeden reálný kořen.

$$U_2 = 4467 \text{V}$$

Výpočet odběrového proudu

$$|I| = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4467 \cdot 0,65} = 99,4 \text{A}$$

Ztráty

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot |I|^2 = 3 \cdot 3,75 \cdot 99,4^2 = 111,15 \text{kW}$$

Úbytek napětí na vedení

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = \frac{6000 - 4467}{\sqrt{3}} = 885 \text{V}$$

5.3 Stav po kompenzací

Kompenzační výkon kondenzátoru

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) = 500 \cdot 10^3 \cdot (1,17 - 0,251) = 459,5 \cdot 10^3 \text{Var}$$

Odběratel bude odebírat ze sítě jalový výkon Q_k

$$Q_k = Q - Q_c = 585 \cdot 10^3 - 459,5 \cdot 10^3 = 125,5 \cdot 10^3 \text{Var}$$

Nyní zle vypočítat napětí na konci vedení po kompenzaci kde opět využijeme vzorec č.16

$$\begin{aligned}U_1 \cdot U_{2k} - U_{2k}^2 &= R \cdot P + X \cdot Q_k \\-U_{2k}^2 + U_1 \cdot U_{2k} - R \cdot P - X \cdot Q_k &= 0 \\-U_{2k}^2 + 6000U_{2k} - 3,75 \cdot 500 \cdot 10^3 - 8,5 \cdot 125,5 \cdot 10^3 & \\-U_{2k}^2 + 6000U_{2k} - 2941750 &= 0\end{aligned}$$

Řešením této kvadratické rovnice dostáváme jeden reálný kořen.

$$U_{2k} = 5461,7V$$

Výpočet odběrového proudu

$$|I| = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{2k} \cdot \cos\varphi} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5461,7 \cdot 0,97} = 54,5A$$

Ztráty

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot |I|^2 = 3 \cdot 3,75 \cdot 54,5^2 = 33,42kW$$

Úbytek napětí na vedení

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = \frac{6000 - 5461,7}{\sqrt{3}} = 310,8V$$

6. Praktický návrh kompenzace jalového výkonu pro průmyslového odběratele

6.1 Zadání

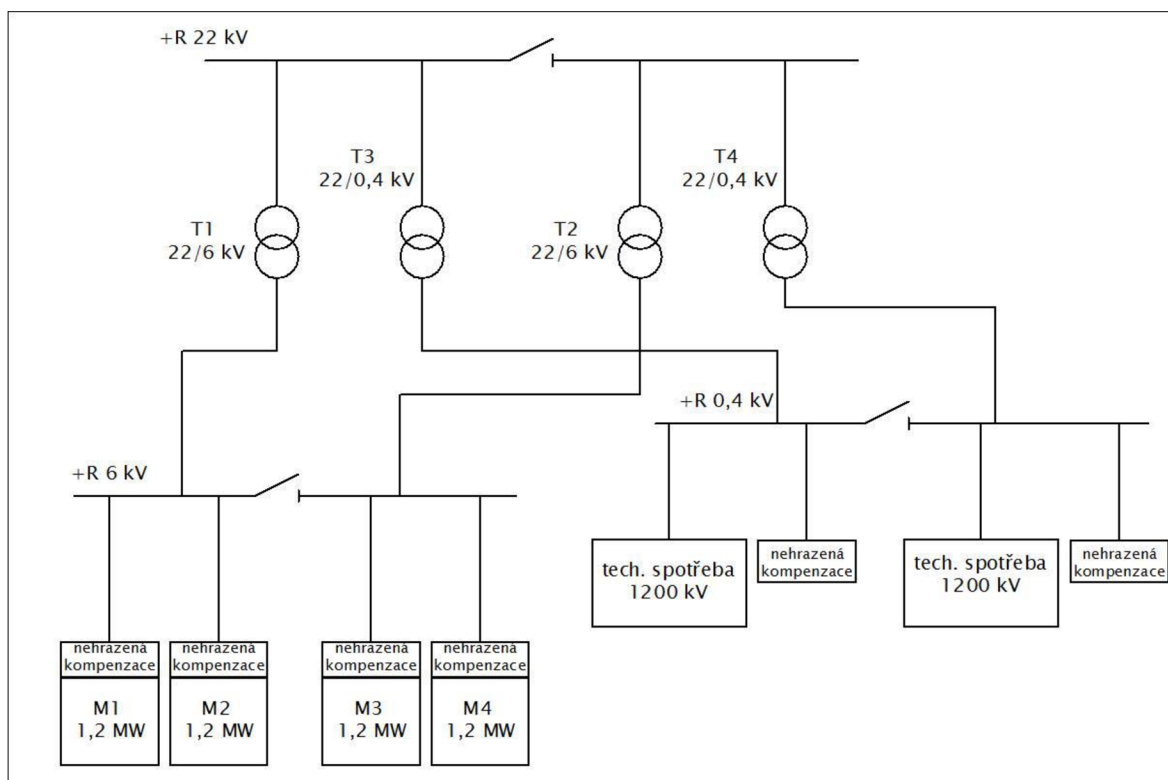
Původní stav:

Čerpací stanice surové vody má hlavní kobkovou rozvodnu 22 kV (+ R22), napájenou dvěma venkovními linkami 22 kV. V rozvodně + R22 jsou celkem 4 transformátory:

- T1 a T2 s převodem 22/6 kV o výkonu 2,5 MW
- T3 a T4 s převodem 22/0,4 kV o výkonu 1000 kVA

Vývody z transformátorů T1 a T2 jsou přivedeny na skříňovou rozvodnu 6 kV (+ R6), která napájí 4 čerpadla o výkonů 1,2 MW. U těchto čerpadel je kompenzace řešena klasicky individuálně přímo na svorkách motoru. V provozu jsou vždy maximálně 2 čerpadla.

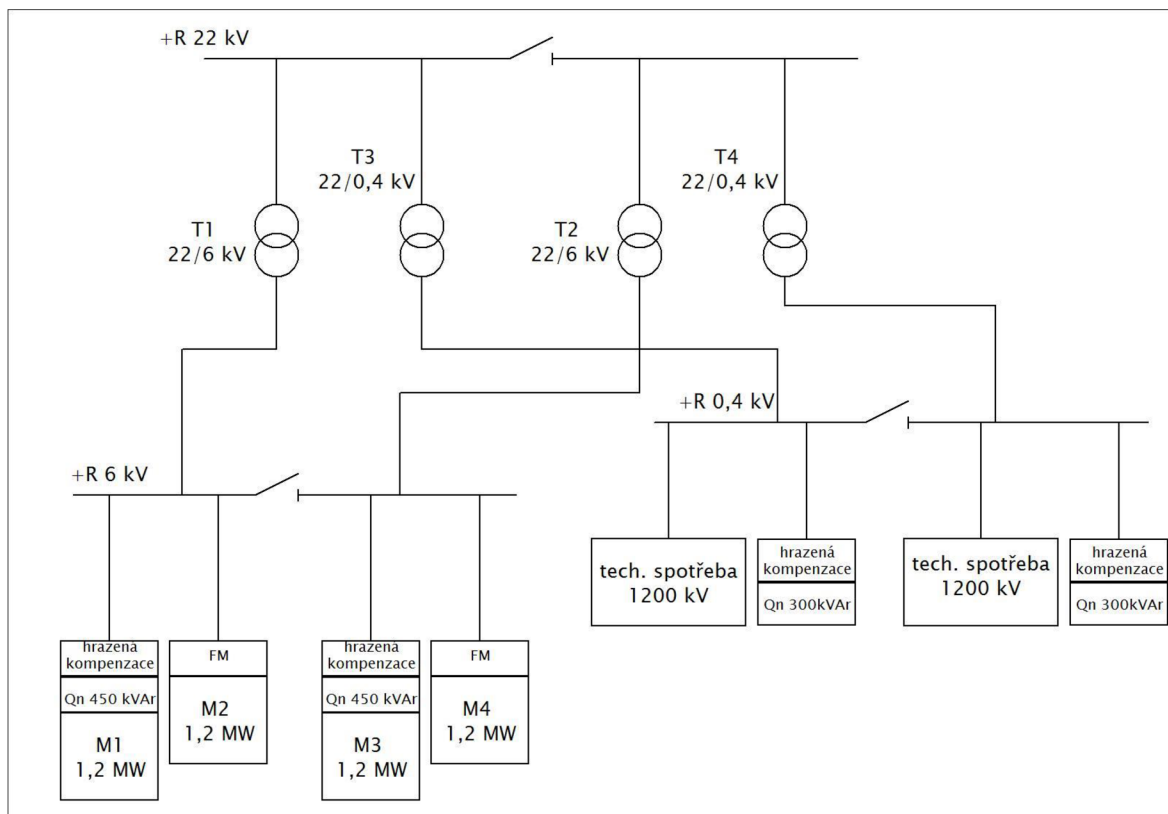
Transformátory T3 a T4 napájí skříňovou rozvodnu 0,4 kV (+ R0,4). V provozu bývá jen jeden transformátor, paralelní chod jen výjimečně při přejíždění z T3 na T4 a opačně. Tato rozvodna + R0,4 napájí 2x technologickou spotřebu, každou o instalovaném výkonu 1200 kV se soudobostí $\beta = 0,65$. Technologická spotřeba je plně vykompenzovaná stávající kompenzací stupňovitě spínanou, nehrazenou 440 kVAr (1x40 + 5x80 kVAr).



Obr. 22: Přehledové schéma původního stavu

Navrhovaný stav:

Dvě čerpadla z napěťové hladiny 6 kV budou doplněna o statický měnič kmitočtu s napěťovým mezi obvodem. Na napěťové hladině 0,4 kV jsou v rámci technologie vyměněna menší čerpadla za otáčkově regulovaná, opět pomocí statického měniče kmitočtu. Instalovaný výkon této technologické spotřeby je 1200 kW se soudobostí $\beta = 0,52$. Účíník se má kompenzovat na $\cos\varphi_k = 0,95$.



Obr. 23: Přehledové schéma navrhovaného stavu

Rozbor:

Jelikož jsou 2 motory na napěťové hladině 6 kV doplněné o měnič kmitočtu s napěťovým mezi obvodem, který generuje harmonické a to hlavně 5. a 7. Tyto harmonické jsou, společně s 11., 13. a dalšími jsou tzv. charakteristické pro zapojení vstupního usměřovače měniče kmitočtu se šestipulzním vstupním usměřovačem. Je třeba navrhnout novou kompenzaci stupňovitě spínanou hrazenou, která bude eliminovat vznik rezonančních jevů ohrožujících jednak vlastní spotřebič a kompenzační zařízení, ale i další prvky elektrické sítě.

6.1 Návrh kompenzace pro čerpadla na napěťové hladině 6 kV

Čerpadla M2 a M4 jsou doplněna o statický měnič kmitočtu a pracují s účíníkem 0,98-0,99 proto není třeba řešit jejich kompenzaci. Čerpadla M1 a M3 s výkonem 1,2 MW mají deficit jalového výkonu 400 kVAr.

Typ kondenzátoru

Neboť se jedná o hrazenou kompenzaci, tedy o sériové spojení tlumivky a kondenzátoru, vzroste napětí na kondenzátoru.

$$U_c = \frac{U_{ns}}{1-p} = \frac{6000}{1-0,07} = 6,45 \text{ kV}$$

Jmenovité napětí na kondenzátorech musí být větší než 6,45 kV. Pro tento návrh použijí 3 fázové VN kondenzátory od české firmy ZEZ SILKO. V katalogu této firmy jsou kondenzátory se jmenovitým napětím $U_{nc} = 6,6 \text{ kV}$.

Fázový proud kondenzátoru:

$$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 38,49 \text{ A}$$

Potřebná kapacita jednoho kondenzátoru jedné fáze

$$C = \frac{I}{\frac{U_c}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{38,49}{\frac{6,45 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 32,9 \mu\text{F}$$

Podle vypočtených ($I = 38,49 \text{ A}$, $C = 32,9 \mu\text{F}$) a zvolených parametrů ($U_{nc} = 6,6 \text{ kV}$) byly vybrány vhodné kondenzátory zapojené do trojúhelníku z katalogu ZEZ SILKO, označené jako **CPEFS 23-6,6/450/WF**. Jmenovitý výkon $Q_n = 450 \text{ kVAr}$, jmenovitá kapacita $C_n = 3 \times 32,9 \mu\text{F}$ a jmenovitý proud $I_n = 39,4 \text{ A}$, WF = kondenzátor s vnitřními tavnými pojistkami. [15]

Při tomto návrhu je potřeba ještě spočítat skutečný výkon kondenzátoru, který bude ve skutečnosti menší vlivem předřazené tlumivky.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{\left(\frac{U_{nc}^2}{Q_n}\right) \cdot (1-p)} = \frac{6000^2}{\left(\frac{6600^2}{450 \cdot 10^3}\right) \cdot (1-p)} = 399,9 \text{ kVAr}$$

Z výpočtu jde vidět, že skutečný výkon kondenzátorové baterie je jen nepatrně menší, než je požadováno, ale pro náš návrh je to zanedbatelný rozdíl.

Návrh hradicí tlumivky

Nejprve je třeba spočítat reaktanci X_c daného kondenzátoru.

$$X_c = \frac{U_{nc}^2}{Q_n} = \frac{6600^2}{450 \cdot 10^3} = 96,8 \Omega$$

Dále vypočítáme reaktanci tlumivky X_L pomocí činitele ztlumení p .

$$X_L = p \cdot X_c = 0,07 \cdot 96,8 = 6,78 \Omega$$

Poté vypočteme indukčnost této tlumivky L

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{6,78}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 21,58 \text{ mH}$$

A nakonec vypočteme proud I_{LC} tekoucí kompenzačním článkem, pomocí skutečného výkonu kondenzátoru.

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{399,9 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 38,48 \text{ A}$$

Poněvadž v katalogu sériově vyráběných tlumivek VN není příliš velký výběr, budou se muset nechat vyrobit na zakázku.

Schéma navrhovaného zapojení s parametry jednotlivých prvků je v příloze B.



Obr. 24: Tlumivky VN [17]

6.2 Návrh kompenzace pro technologickou spotřebu na napěťové hladině 0,4 kV

Při tomto návrhu musíme brát v úvahu, že menší čerpadla jsou doplněná o frekvenční měnič kmitočtu a pracují s účíníkem 0,98 a jsou opět zdrojem harmonických a to zejména 5. a 7. harmonické. V tab. 1 je přehled zařízení technologické spotřeby.

Tab.1: Zařízení technologické spotřeby na nn

č.	Zařízení	počet	P [kW]	celk. výkon [kW]	tgφ	cosφ	Q [kVAr]	Q _{komp} [kVAr]	Q _c [kVAr]
1	ventilátor	2	100	200	0,54	0,88	107,95	65,74	42,21
2	čerpadla I. s FM	4	62,5	250	-	0,98	-	-	-
3	čerpadla II. s FM	4	25	100	-	0,98	-	-	-
4	stávající zařízení	1	450	450	0,62	0,85	278,89	147,91	130,98
5	ohřev vzduchu (odporový)	2	50	100	-	1	-	-	-
6	Cirkulace vzduchu	4	25	100	1,02	0,7	102,02	32,87	69,15

(P = činný výkon, Q = jalový výkon před kompenzací, Q_{komp} = jalový výkon po kompenzací, Q_c = jalový výkon kompenzační baterie)

Q... jalový výkon před kompenzací

$$Q_1 = P_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 = 200 \cdot 10^3 \cdot 0,54 = 107,95 \text{ kVAr}$$

$$Q_2 = P_2 \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 = 450 \cdot 10^3 \cdot 0,62 = 278,89 \text{ kVAr}$$

$$Q_3 = P_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi_3 = 100 \cdot 10^3 \cdot 1,02 = 102,02 \text{ kVAr}$$

Q_k ...jalový výkon po kompenzací, kde kompenzujeme na účinník cosφ_k = 0,95 => tgφ_k = 0,33

$$Q_{k1} = P_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_k = 200 \cdot 10^3 \cdot 0,33 = 65,74 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k2} = P_2 \cdot \operatorname{tg}\varphi_k = 450 \cdot 10^3 \cdot 0,33 = 147,91 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k3} = P_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi_k = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,33 = 32,87 \text{ kVAr}$$

Q_c ... jalový výkon kompenzační baterie

$$Q_{c1} = Q_1 - Q_{k1} = 107,95 - 65,74 = 42,21 \text{ kVAr}$$

$$Q_{c2} = Q_2 - Q_{k2} = 278,89 - 147,91 = 130,98 \text{ kVAr}$$

$$Q_{c3} = Q_3 - Q_{k3} = 102,02 - 32,87 = 69,15 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon, který potřebujeme pro skupinovou kompenzací

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} = 42,21 + 130,98 + 69,15 = 242,34 \text{ kVAr}$$

Navrhovaný jmenovitý kompenzační výkon Q_{nc} = 320 kVAr, rozložený v šesti stupních po 4 x 40 kVAr + 2 x 80 kVAr.

Parametry pro malý stupeň kompenzace (Q_c = 40kVAr)

Sdružená hodnota napětí na kondenzátor se zvýší díky předřazené tlumivce.

$$U_c = \frac{U_{ns}}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430,11 \text{ V}$$

V katalogu je nejbližší vyšší jmenovitá hodnota kondenzátor U_{cn} = 440 V

Reaktanci kondenzátor lze spočítat i bez znalosti kapacity pomocí jmenovitého výkonu a napětí.

$$X_c = \frac{U_{nc}^2}{Q_{cm}} = \frac{440^2}{40 \cdot 10^3} = 4,84 \Omega$$

Celková kapacita kondenzátorů

$$C = \frac{1}{X_c \cdot \omega} = \frac{1}{4,86 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 657,7 \mu F$$

Reaktance tlumivky

$$X_L = p \cdot X_c = 0,07 \cdot 4,84 = 0,339 \Omega$$

Indukčnost tlumivky

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,339}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,08 \text{ mH}$$

Celková reaktance malého kompenzačního stupně

$$X_{LC} = X_c - X_L = 4,84 - 0,339 = 4,50 \Omega$$

Skutečný výkon kondenzátorů bude menší díky předřazené tlumivce.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{X_{LC}} = \frac{400^2}{4,50} = 35,56 \text{ kVAr}$$

Skutečný proud tekoucí malým stupněm kompenzace.

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{35,56 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 51,32 \text{ A}$$

Na základě těchto vypočtených hodnot vybereme vhodné kondenzátory opět od firmy ZEZ SILKO. Kondenzátory budou stejně jako na VN síti zapojeny do trojúhelníku. Z katalogu byly vybrány kondenzátory označené jako **CSADG 3-0,44/40**. Jmenovitý výkon $Q_n = 40 \text{ kVAr}$, jmenovitý proud $I_n = 52,5 \text{ A}$, jmenovitá kapacita $C_n = 3 \times 219,2 \mu F$. [16]

Firma ZEZ SILKO se zabývá i výrobou hradících tlumivek a v jejich katalogu jsem našel vhodné tlumivky s potřebnými parametry. *“Tlumivky ZEZ SILKO jsou vyráběny z vysokojakostních transformátorových plechů, hliníkových pásů a měděných drátů. Díky tomu se vyznačují vysokou linearitou a nízkými ztrátami. Vakuová impregnace speciální pryskyřicí zajišťuje vysoké napěťové namáhání, minimální hlučnost a dlouhou životnost. Tlumivky jsou vybaveny tepelnou ochranou zabráňující přehřátí.”* [17] Z katalogu jsem tedy vybral tlumivky s označením **TKA1-40-189/400/440**. Jmenovitá indukčnost $L_n = 1,08 \text{ mH}$, jmenovitý proud $I_n = 51,3 \text{ A}$. [17]



Obr. 25: Tlumivky NN [16]

Parametry pro velký stupeň kompenzace ($Q_c = 80 \text{ kVAr}$)

Výpočty jsou obdobné jako u malého stupně. Tento velký stupeň se bude skládat ze dvou malých 40 kVAr stupňů

Sdružená hodnota napětí na kondenzátor.

$$U_c = \frac{U_{ns}}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430,11 \text{ V}$$

V katalogu je nejbližší vyšší jmenovitá hodnota kondenzátor $U_{cn} = 440 \text{ V}$

Reaktanci kondenzátoru

$$X_c = \frac{U_{nc}^2}{Q_{cm}} = \frac{440^2}{40 \cdot 10^3} = 2,42 \Omega$$

Celková kapacita kondenzátorů

$$C = \frac{1}{X_c \cdot \omega} = \frac{1}{2,42 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 1315 \mu\text{F}$$

Reaktance tlumivky

$$X_L = p \cdot X_c = 0,07 \cdot 2,42 = 0,17 \Omega$$

Indukčnost tlumivky

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,17}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,54 \text{ mH}$$

Celková reaktance malého kompenzačního stupně

$$X_{LC} = X_c - X_L = 2,42 - 0,17 = 2,25 \Omega$$

Skutečný výkon kondenzátorů.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{X_{LC}} = \frac{400^2}{2,25} = 71,11 \text{ kVAr}$$

Skutečný proud tekoucí malým stupněm kompenzace.

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{71,11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 102,64 \text{ A}$$

Pro jištění jednotlivých hrazených stupňů kompenzace se doporučuje volit výkonové pojistky s charakteristikou gG a jmenovitým proudem 1,6 až 1,8 násobku proudu daného stupně.

Jištění pro malý stupeň kompenzace.

$$I_n = 1,8 \cdot I_{LC} = 1,8 \cdot 51,32 = 92,38 \text{ A}$$

Z tabulek se vezme nejbližší vyšší jmenovitá hodnota pojistky a přiřadí se. Jmenovitý proud pojistky $I_N = 100 \text{ A}$.

Jištění pro velký stupeň kompenzace.

$$I_n = 1,8 \cdot I_{LC} = 1,8 \cdot 102,54 = 184,75 \text{ A}$$

Z tabulek se vezme nejbližší vyšší jmenovitá hodnota pojistky a přiřadí se. Jmenovitý proud pojistky $I_N = 200 \text{ A}$.

Schéma navrhovaného zapojení s parametry jednotlivých prvků je v příloze B.

Možné využití jednotlivých kompenzačních stupňů při různém chodu strojů lze vidět v tab. 2.

Tab. 2: Možné využití jednotlivých kompenzačních stupňů při různém chodu strojů

	50 kVAr	100 kVAr	150 kVAr	200 kVAr	242,3 kVAr
I. 40 kVAr (35,55)	I	I	O	I	I
II. 40 kVAr (35,55)	O	I	O	O	I
III. 40 kVAr (35,55)	O	I	O	O	I
IV. 40 kVAr (35,55)	O	O	O	O	O
V. 80 kVAr (71,09)	O	O	I	I	I
VI. 80 kVAr (71,09)	O	O	I	I	I
skutečnost	14,45 kVAr ind.	6,65kVAr kap.	7,32 kVAr ind.	22,27 kVAr ind.	6,53kVAr kap.

Protože při použití takovéto velikosti stupňů dochází ve dvou případech k překompenzování, tedy nevyžádané dodávce jalového výkonu, která je zpoplatňovaná částkou 400,- Kč za 1 MVarh, bude nutné změnit velikost prvního spínaného stupně na 20 kvar. Z toho vyplývá nový výpočet další varianty a nová následná kontrola vykompenzování při různých provozních stavech.

Výpočet nové varianty kompenzace, kdy jeden stupeň 40 kVAr vyměníme za stupeň o polovinu menší.

Parametry pro 20 kVAr stupeň kompenzace

Sdružená hodnota napětí na kondenzátor $U_C = 430,11 \text{ V}$

V katalogu je nejbližší vyšší jmenovitá hodnota kondenzátor $U_{cn} = 440 \text{ V}$

Reaktance kondenzátoru

$$X_c = \frac{U_{nc}^2}{Q_{cm}} = \frac{440^2}{20 \cdot 10^3} = 9,68 \Omega$$

Celková kapacita kondenzátorů

$$C = \frac{1}{X_c \cdot \omega} = \frac{1}{9,68 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 329 \mu\text{F}$$

Reaktance tlumivky

$$X_L = p \cdot X_c = 0,07 \cdot 9,68 = 0,68 \Omega$$

Indukčnost tlumivky

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,678}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,16 \text{ mH}$$

Celková reaktance malého kompenzačního stupně

$$X_{LC} = X_C - X_L = 9,68 - 0,68 = 9 \Omega$$

Skutečný výkon kondenzátorů bude menší díky předřazené tlumivce.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{X_{LC}} = \frac{400^2}{9} = 17,78 \text{ kVAr}$$

Skutečný proud tekoucí malým stupněm kompenzace.

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{17,78 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 25,66 \text{ A}$$

Z katalogu ZEZ-SILKO byl vybrán kondenzátor označený **CSADG 1-0,44/20**. Jmenovitý výkon $Q_n = 20 \text{ kVAr}$, jmenovitý proud $I_n = 26,2 \text{ A}$, a jmenovitá kapacita $C_n = 3 \times 111 \mu\text{F}$. [16]

Z katalogu ZEZ-SILKO byla vybrána i hradicí tlumivka označená jako **TKC1-20-189/400/440**. Jmenovitá indukčnost $L_n = 3 \times 109,6 \text{ mH}$ a jmenovitý proud $I_n = 25,7 \text{ A}$. [17]

Jištění pro 20 kVAr stupeň kompenzace.

$$I_n = 1,8 \cdot I_{LC} = 1,8 \cdot 25,66 = 46,2 \text{ A}$$

Z tabulek se vezme nejbližší vyšší jmenovitá hodnota pojistky a přiřadí se. Jmenovitý proud pojistky $I_N = 50 \text{ A}$.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s teorií kompenzace jalového výkonu, a také ji pochopit. Začal jsem s popisem základních pojmů pro kompenzaci přes rozdělení jednotlivých paralelních způsobů kompenzace jalového výkonu až po vzorový příklad výpočtů.

V příkladu jsem si zadal, že budu kompenzovat na účinník $\cos\varphi_k = 0,97$ když původní účinník byl $\cos\varphi = 0,65$. Rozdíl v odebíraném jalovém výkonu před kompenzací a po kompenzací byl skoro pětinasobný, cca 460kVAr. Úbytek napětí na vedení byl téměř trojnásobný a ztráty činného výkonu se změnilo více než o trojnásobek původních ztrát, tedy přesně o 77,73 kW. Jde tudíž o to vidět, že kompenzace je efektivním prostředkem pro snížení jalového výkonu a také provozních nákladů. V příkladu jsou hodnoty voleny pro názornost, v praxi bychom pravděpodobně s takovými hodnotami nepočítali, neboť úbytky napětí by se měly pohybovat okolo 5% a v mém případě, je úbytek napětí určitě větší.

V poslední kapitole jsem se zabýval praktickým návrhem kompenzace jalové energie pro čerpací stanici surové vody. Kdy stávající řešení kompenzace již nevyhovovala a bylo zapotřebí navrhnout hrazenou kompenzaci, protože byly do sítě přidány statické měniče kmitočtů, které generují harmonické kmitočty.

V první části jsem se zabýval kompenzací na hladině 6 kV. Šlo o 4 motory s výkonem 1,2 MW, z toho byly dva doplněny o statický měnič kmitočtu. Pro dva zbylé bylo nutné navrhnout kompenzaci, kdy deficit jalového výkonu každého motoru byl 400 kVAr. Kompenzace, která je připojena přímo na svorky motoru se sestává z kondenzátoru o výkonu 450 kVAr, neboť předřazením tlumivky klesne jeho skutečný výkon na 399,9 kVAr, a tlumivky s vypočtenými parametry $L = 21,58$ mH a $I = 38,48$ A. Jelikož v katalogu sériově vyráběných tlumivek VN není velký výběr, musí se tlumivka nechat vyrobit na zakázku.

V druhé části jsem se zabýval kompenzací na hladině 0,4 kV, kde se jednalo o hrazenou kompenzaci stupňovitě spínanou. Celkový deficit jalového výkonu byl 242 kVAr. Původní navrhovaný kompenzační výkon byl s rezervou 320 kVAr rozložený do šesti stupňů po 4 x 40 kVAr a 2 x 80 kVAr. V průběhu výpočtu bylo zjištěno, že rozložení těchto stupňů nevyhovuje (dochází k překompenzování) a bylo zapotřebí změnit velikost prvního stupně na 20 kVAr.

Použitá literatura

- [1] Stránky pro studenty oboru elektrotechnika. SPŠ Ústí nad Labem [online]. 2006 [cit. 2013-11-29]. Dostupné z: <http://web.telecom.cz/tyrbach/index.htm>
- [2] POSPÍŠIL, Zdeněk. *Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D .
- [3] HÁLA, Pavel a Břetislav LACINA. *Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů*. 1. vyd. Brno: Elektromanagement, 1994, 90 s.
- [4] Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu. *Pilsfree.net* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/10_Pred10MR.pdf
- [5] Kompenzace jalového výkonu – část 2. *Česká energetika* [online]. 2009 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.ceskaenergetika.cz/kompenzace_jaloveho_vykonu_ucinik_dekompenzace/kompenzace_jaloveho_vykonu_cast_2.html
- [6] Chráněná kompenzace. *KBH energy* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://kbh.cz/kompenzace/chranena-kompenzace>
- [7] Hrazené (chráněné) kompenzační rozváděče. *EMG Zlín, s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-hrazene.html>
- [8] Dynamická kompenzace jalového výkonu SBS. *Pronix* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.pronix.cz/web2/produkty/upload/Rychla%20kompenzace.pdf>
- [9] Kompenzace jalové energie. *EMG Zlín, s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzacni.html
- [10] NOVAR 1106/1114. 2015. *ZEZ SILKO* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/novar-11061114>
- [11] MOLNÁR, Miloš. 2001. ZLEPŠENÍ ÚČINÍKU V ENERGETICE A NÁVRH VHODNÝCH KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ. *EMCOS s.r.o* [online]. (4) [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.emcos.cz/pdf/zlepseni_uciniku_MM-2001.pdf
- [12] HOLOUBEK, Jiří a Jaroslav PAWLAS. 2015. Stupňovitě spínaná kompenzační zařízení vn. *Elektro časopis pro elektrotechniku* [online]. (1) [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/stupnovite-spinana-kompenzacni-zarizeni-vn--14090>
- [13] ČVUT. 2010. Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; *Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice* [online]. Katedra elektromagnetického pole ČVUT v Praze [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CFEQFjAJ&url=http%3A%2F%2Felektrorevue.cz%2Fcz%2Fdownload%2Fcasto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice%2F&ei=dBxKVZ33IcSisgGBp4EI&usg=AFQjCNHss_I_zurn49PE

AH0XSbDmsTFdjA&sig2=1LVoTye_5MuJcny3g5Hu9w&bvm=bv.92291466,d.bGg&cad=rja. článek. ČVUT.

- [14] HOLOUBEK, Jiří. 1997. *Kompenzace jalového výkonu: sborník přednášek*. Trutnov: H.V.K.L. PROPAG TEAM.
- [15] ZEZ SILKO. 2015. *Kompenzační kondenzátory VN* [online]. Žamberk [cit. 2015]. Dostupné také z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/kondenzatory-typu-cpefs-23-tri-fazove>
- [16] ZEZ SILKO. 2015. *Kompenzační kondenzátory NN* [online]. Žamberk [cit. 2015]. Dostupné také z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/al-valcova-nadoba-mkp-ip20>
- [17] ZEZ SILKO. 2015. *Hradicí tlumivky NN* [online]. Žamberk [cit. 2015]. Dostupné také z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/hradici-tlumivky-nn>

Přílohy

Příloha A. Původní schéma zapojení

Příloha B. Navrhované schéma zapojení

