

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**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

ZDENĚK POSPÍŠIL

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Zdeněk Pospíšil

ID: 136056

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie kompenzace jalového výkonu
2. Prostředky pro kompenzaci jalového výkonu
3. Příklad návrhu kompenzace
4. Návrh kompenzace průmyslového odběratele

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

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

Konzultanti bakalářské 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 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.

Bibliografická citace práce:

POSPÍŠIL, Z. Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 57 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

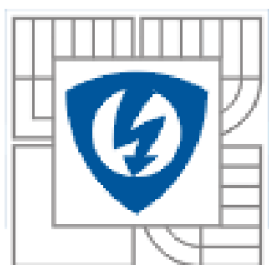
Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D za ochotu a pomoc při tvoření mé bakalářské práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

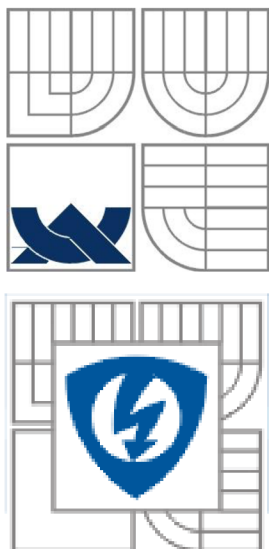
Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

Zdeněk Pospíšil

vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor Thesis

The reactive power compensation of the industrial consumer

by

Zdeněk Pospíšil

Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kompenzací jalového výkonu. Kompenzace jalového výkonu patří mezi významná opatření vedoucí ke snížení proudového zatížení vedení a dalších zařízení, jehož důsledkem je snížení ztrát a zvýšení jejich životnosti. Tato práce je rozdělena do teoretické a praktické části.

V teoretické části je vysvětlena teorie nezbytná pro pochopení kompenzace, vysvětleny sankce a přírážky při nedodržení předepsaného účinníku a shrnuty všechny vlivy kompenzace na elektrickou síť. Dále je v této části ukázáno základní rozdělení kompenzace podle místa jejího připojení, typu kompenzačního zařízení a regulace. Závěr teoretické části je věnován jednoduchému výpočtu kompenzace.

Praktická část se zabývá reálným návrhem kompenzace jalového výkonu pro konkrétního průmyslového odběratele.

KLÍČOVÁ SLOVA: Kompenzace jalového výkonu; jalový výkon; účinník; kompenzace; kondenzátor; hrazená kompenzace; paralelní kompenzace

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the reactive power compensation. The reactive power compensation falls into an important measures reducing current load of electrical grids and other equipments, which increase its lifespan and decrease energy losses. The bachelor thesis is divided into a theoretical and a practical part.

In the theoretical part is explained the theory necessary for good understanding of compensation, explained the sanctions and the additional fees for unsatisfactory power factor and summarized the impacts of compensation on the electrical network. Further is shown the basic classification of compensation by its place of connection, type of compensation device and regulation. The end of theoretical part is dedicated to the simple calculation of compensation.

The practical part deals with the real design of the reactive power compensation for a particular industrial consumer.

KEY WORDS: Reactive power compensation; reactive power; power factor; compensation; capacitor, detuned compensation; parallel compensation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
1 ÚVOD.....	13
2 TEORIE KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU	14
2.1 JALOVÝ VÝKON	14
2.2 KOMPENZACE.....	15
2.2.1 PARALELNÍ KOMPENZACE.....	19
2.2.2 SÉRIOVÁ (PODÉLNÁ) KOMPENZACE.....	21
2.3 SANKCE A PŘIRÁŽKY ZA NEDODRŽENÍ PŘEDEPSANÉHO ÚČINÍKU	22
2.4 SHRNU TÍ VŠECH VLIVŮ KOMPENZACE NA ENERGETICKOU SÍŤ	23
3 PROSTŘEDKY PRO KOMPENZACI JALOVÉHO VÝKONU.....	24
3.1 ROZDĚLENÍ PODLE MÍSTA PŘIPOJENÍ KOMPENZACE	24
3.1.1 INDIVIDUÁLNÍ (JEDNOTLIVÁ) KOMPENZACE	24
3.1.2 SKUPINOVÁ KOMPENZACE.....	25
3.1.3 CENTRÁLNÍ KOMPENZACE	25
3.1.4 KOMBINOVANÁ (SMÍŠENÁ) KOMPENZACE.....	26
3.2 ROZDĚLENÍ PODLE DRUHU KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	26
3.2.1 SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY.....	26
3.2.2 PROSTÉ KONDENZÁTORY	27
3.2.3 CHRÁNĚNÉ KOMPENZAČNÍ SEKCE (HRAZENÁ KOMPENZACE)	29
3.2.4 KOMPENZAČNÍ FILTRY.....	31
3.3 ROZDĚLENÍ PODLE DRUHU REGULACE.....	31
3.3.1 STUPŇOVITÁ REGULACE	31
3.3.2 PLYNULÉ ŘÍZENÍ- PASIVNÍ (S DEKOMPENZAČNÍMI ČLENY).....	32
3.3.3 PLYNULÉ ŘÍZENÍ- AKTIVNÍ.....	33
4 PŘÍKLAD NÁVRHU KOMPENZACE	35
4.1 ZADÁNÍ PŘÍKLADU	35
4.2 ŘEŠENÍ PŘÍKLADU	35
4.3 ZHODNOCENÍ.....	37
5 NÁVRH KOMPENZACE PRO PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE.....	38
5.1 ZADÁNÍ.....	38
5.2 ROZBOR ZADÁNÍ.....	39
5.3 NÁVRH- VARIANTA Č. 1.....	40
5.3.1 NÁVRH HRAZENÉHO KOMPENZAČNÍHO ROZVADĚČE PRO TRANSFORMÁTOR T1, T2	41
5.3.2 NÁVRH DEKOMPENZAČNÍHO ROZVADĚČE PRO TRAFOSTANICI T3	49
5.3.3 ZHODNOCENÍ VARIANTY Č. 1.....	50
5.4 NÁVRH- VARIANTA Č. 2.....	52
5.4.1 ZHODNOCENÍ VARIANTY Č. 2.....	52
5.5 VELIKOSTI ÚČINÍKŮ PŘI RŮZNÝCH SCÉNÁŘÍCH PROVOZU	53

6 ZÁVĚR.....	55
POUŽITÁ LITERATURA	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů</i>	15
<i>Obr. 2-2 Kompenzace – a)žádná, b)úplná, c)částečná</i>	16
<i>Obr. 2-3 Fázový posun-čistě induktivní zátěž</i>	17
<i>Obr. 2-4 Fázový posun-čistě kapacitní zátěž</i>	17
<i>Obr. 2-5 Fázorový diagram čistě induktivní a kapacitní zátěže</i>	18
<i>Obr. 2-6 Složky výkonů před a po kompenzaci</i>	18
<i>Obr. 2-7 Kompenzace motoru</i>	19
<i>Obr. 2-8 Schéma sítě s paralelní kompenzací</i>	19
<i>Obr. 2-9 Fázorový diagram paralelní kompenzace</i>	20
<i>Obr. 2-10 Schéma sítě se sériovou kompenzací</i>	21
<i>Obr. 2-11 Fázorový diagram sériové kompenzace</i>	21
<i>Obr. 3-1 Zapojení individuální kompenzace</i>	24
<i>Obr. 3-2 Zapojení skupinové kompenzace</i>	25
<i>Obr. 3-3 Zapojení centrální kompenzace</i>	26
<i>Obr. 3-4 V-křivky synchronního stroje</i>	27
<i>Obr. 3-5 Ekvivalentní obvod kondenzátoru</i>	28
<i>Obr. 3-6 Chráněná kompenzační sekce</i>	29
<i>Obr. 3-7 Frekvenční charakteristika LC obvodu</i>	29
<i>Obr. 3-8 Obvod s fázovým řízením proudu tlumivkou</i>	32
<i>Obr. 3-9 Obvod plynule řízeného kompenzátoru</i>	33
<i>Obr. 3-10 Paralelní (derivační) filtr [21]</i>	33
<i>Obr. 3-11 Sériový filtr [21]</i>	34
<i>Obr. 3-12 Kombinovaný filtr [21]</i>	34
<i>Obr. 4-1 Schéma zadání</i>	35
<i>Obr. 5-1 Schéma zadání</i>	38
<i>Obr. 5-2 Kompenzační rozvaděč pro transformátor T1, T2</i>	41
<i>Obr. 5-3 Zapojení kompenzačního stupně</i>	41
<i>Obr. 5-4 Výrobce VISHAY: Kondenzátory NN [12]</i>	43
<i>Obr. 5-5 Výrobce BENEDICT Stykač K3-62K [14]</i>	46
<i>Obr. 5-6 Výrobce OEZ: pojistkový odpínač FH000 a pojistková vložka PNA000 [16][15]</i>	47
<i>Obr. 5-7 Výrobce K M B systems, s.r.o: Regulátor NOVAR 1106 [17]</i>	48
<i>Obr. 5-8 Výrobce KBH ENERGY: Dekompenzační tlumivka [19]</i>	50

<i>Obr. 5-9 Schéma varianty č. 1.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5-10 Schéma varianty č. 2.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5-11 Velikosti účiniů při různých scénářích provozu.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Cenové přírážky při nedodržení účinníku podle [11]</i>	23
<i>Tab. 5-1 Generované harmonické</i>	39
<i>Tab. 5-2 Výkonová bilance</i>	40
<i>Tab. 5-3 Katalog výrobce VISHAY: kondenzátory NN [12]</i>	42
<i>Tab. 5-4 Katalog výrobce ELCOM: Ochranné tlumivky [13]</i>	44
<i>Tab. 5-5 Katalog výrobce BENEDICT: stykače [14]</i>	45
<i>Tab. 5-6 Katalog výrobce BENEDICT: stykače (teplota okolí 40°C, vhodné pojistky) [14]</i>	46
<i>Tab. 5-7 Katalog výrobce OEZ: pojistkové vložky [15]</i>	47
<i>Tab. 5-8 Katalog výrobce OEZ: pojistkový odpínač [16]</i>	47
<i>Tab. 5-9 Katalog výrobce SPÁLOVKSÝ: rozvaděč STA-N 200606 [18]</i>	49
<i>Tab. 5-10 Katalog výrobce KBH ENERGY: Dekompenzační tlumivky [19]</i>	50
<i>Tab. 5-11 Finanční náklady varianty č. 1</i>	51
<i>Tab. 5-12 Finanční náklady varianty č. 2</i>	52

1 ÚVOD

V dnešní době je využití elektřiny již neodmyslitelnou součástí našeho každodenního života. Díky elektrické energii je možné provozovat domácnosti, kulturní a sportovní centra, ale především národní hospodářství. Jako každá jiná činnost, tak i provoz energetických sítí se musí řídit jistými pravidly. Tato pravidla jsou nutná k dosažení co nejhospodárnějším provozu těchto sítí, snížení ztrát na minimum a tudíž šetření primárních zdrojů užívaných při výrobě elektrické energie, které nejsou nekonečné. Jedním z hlavních problémů při provozu elektrických sítí je přenos tzv. jalového výkonu. Nástroj, kterým se řeší problémy spojené s existencí jalového výkonu, se nazývá kompenzace. Kompenzace jalového výkonu se provádí za pomoci tzv. paralelní kompenzace a právě touto problematikou, se bude práce zabývat. Existuje také ještě sériová kompenzace, která ovšem nesouvisí přímo s kompenzací jalového výkonu a proto bude v další části textu jen krátce zmíněna.

Tato práce je rozdělena do 4 hlavních celků. V kapitole druhé, bude řeč o základech z teorie kompenzace jalového výkonu. A to především o jalovém výkonu, o kompenzaci (bude vysvětlen princip funkce paralelní a sériové kompenzace), o udělování sankcí a přírážek při nedodržení závazných předpisů týkajících se jalového výkonu a na závěr shrnuty všechny důvody a výhody kompenzace.

Třetí kapitola se bude věnovat technickým prostředkům, které jsou pro kompenzaci jalového výkonu používány. Budou zde uvedeny různé druhy kompenzačních zařízení, způsoby jejich možných připojení a možnosti regulace.

Kapitola čtvrtá bude věnována příkladu návrhu kompenzace, kde si názorně ukážeme, jakým způsobem se kompenzace projeví v síti.

Poslední, pátá kapitola je věnována praktickému návrhu kompenzace pro konkrétního průmyslového odběratele za spolupráce firmy ELCOM.

Cílem práce je objasnění problematiky spojené s kompenzací jalového výkonu. Má snaha bude především vynaložena na odbornou správnost a v nemalé míře také na co nejsrozumitelnější podání. Neboť by tato práce měla také posloužit jako pomůcka těm, které toto téma zajímá a kteří si chtějí rozšířit své znalosti, případně podle jednoduchého návodu rozhodnout o technických opatření vedoucích k vyřešení problému kompenzace jalového výkonu v konkrétní technické aplikaci.

2 TEORIE KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

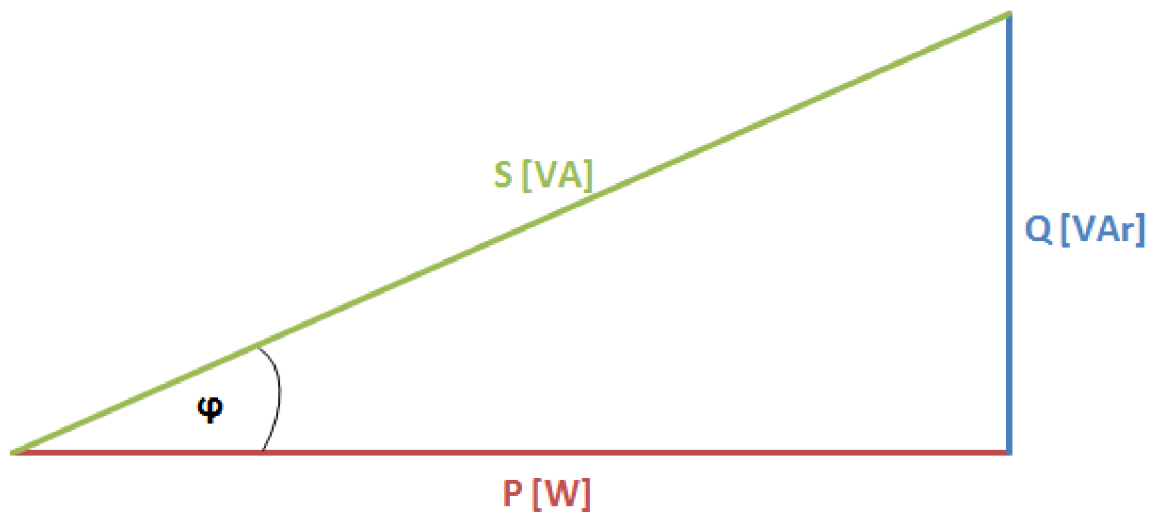
V této části budou vysvětleny všechny základní pojmy spojené s tématem kompenzace jalového výkonu, které jsou nutné pro dobré pochopení celé problematiky. Po přečtení této kapitoly, by čtenář měl být schopen vysvětlit základní pojmy jako jalový výkon, trojúhelník výkonů, účinník, paralelní a sériová kompenzace. Také by si měl být vědom všech důvodů a výhod kompenzace a mít představu, jak se stanovují sankce a cenové přírážky za jalovou energii.

2.1 Jalový výkon

Využití elektřiny hraje v našem životě zásadní roli. My všichni (neboť každý z nás je spotřebitel) využíváme tuto energii v našich spotřebičích především za účelem získání jiného druhu energie, jako je například teplo, světlo anebo mechanická energie. Dochází k přeměně energie. Energie, která se spotřebuje na přeměnu v jiný druh energie je charakterizována činným výkonem P . Činný výkon, je ten výkon, který koná nějakou práci, je užitečný.

Některé spotřebiče si ale potřebují ke své činnosti vytvořit magnetické pole (spotřebiče s induktivním charakterem jako např. motory, transformátory, elektromagnety a zářivková svítidla) anebo pole elektrické (spotřebiče s kapacitním charakterem jako např. kondenzátory). Tyto spotřebiče potřebují ke své činnosti nejen činný výkon, ale také výkon jalový Q , který nekoná žádnou práci, ale přesto je nezbytný pro činnost spotřebičů a tudíž jeho existence v síti je nutná. Elektrické a magnetické pole spotřebičů se periodicky neustále vytvářejí a zanikají. Při vytváření si berou ze sítě jalový výkon, ale při zániku zase jalový výkon dodávají do sítě. Je vidět, že jalový výkon se nespotřebovává, pouze se neustále přelévá z místa spotřeby do místa výroby a naopak a tím zatěžuje naši napájecí síť. Neboť celkový přenášený výkon se skládá z činného a jalového výkonu. Nazývá se zdánlivý výkon S a je roven vektorovému součtu činného a jalového výkonu. Celá energetická soustava musí být tím pádem dimenzovaná na přenos zdánlivého výkonu. Z tohoto důvodu je snaha snížit toky jalového výkonu v napájecí síti na minimum a pokud možno, veškerý jalový výkon dodávat spotřebičům za pomoci kompenzačních zařízení umístěných v elektrické blízkosti spotřebiče. Je tak možné odlehčit energetické síti. Tento proces se nazývá kompenzace.

Ve spojení s jalovým výkonem by měla být zmíněna ještě jedna velmi důležitá veličina a tou je účinník $\cos\varphi$. Účinník je podíl velikosti činného výkonu k velikosti výkonu zdánlivého. Říká nám, jak velká část činného výkonu je obsažena ve výkonu zdánlivém. Hodnoty účinníku se pohybují v rozmezí od 0 do 1. Jedna je ideální stav a říká nám, že všechna energie v síti se spotřebuje jako činný výkon (případ ideální, čistě odporové zátěže anebo také ideálně vykompenzovaného odběru). Nula je naopak stav nejhorší, znamená to, že v síti je pouze jalový výkon (případ čistě induktivní nebo čistě kapacitní zátěže bez žádné kompenzace), který nekoná žádnou práci, ale zatěžuje vedení a způsobuje ztráty. Účinník také souvisí s fázovým posunem mezi napětím a proudem. O tomto ale více v části o kompenzaci. Vztah mezi všemi třemi výkony a účinníkem udává tzv. trojúhelník výkonů, viz Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA}; W, \text{VAr}) \quad (2.1)$$

$$S = U_f \cdot I \quad (\text{VA}; V, I) \quad (2.2)$$

$$P = S \cdot \cos\varphi \quad (W; \text{VA}, -) \quad (2.3)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi \quad (\text{VAr}; \text{VA}, -) \quad (2.4)$$

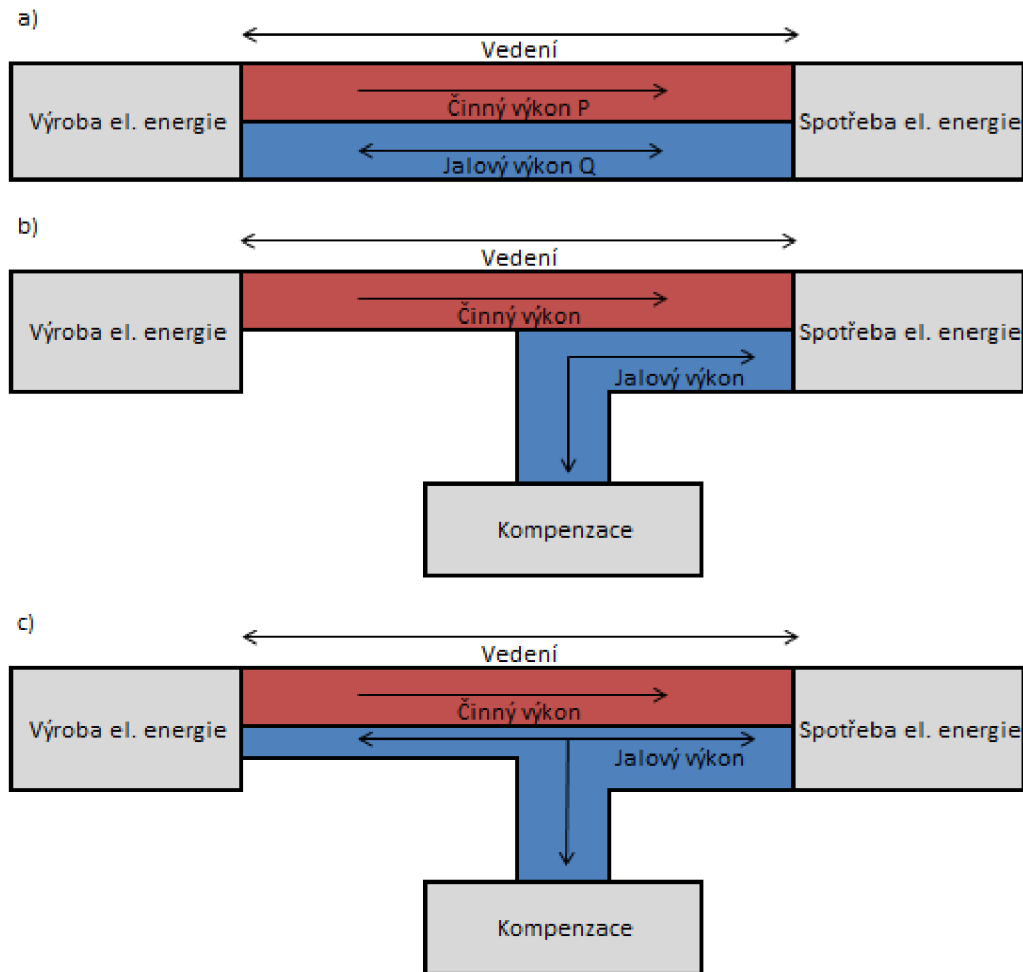
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (-; W, \text{VA}) \quad (2.5)$$

Rovnice jsou uvedeny pro jednofázovou síť, kde I je proud ve fázi a U_f je fázové napětí. V případě trojfázové soustavy se všechny výkony zvětší na trojnásobek.

2.2 Kompenzace

Kompenzace, je téma, které je v naší technické veřejnosti diskutováno zhruba od 70. let, kdy se začal zohledňovat účinnost odběru elektřiny. Základní myšlenka kompenzace je snížit proudové zatížení co nejrozsáhlejší části energetických sítí viz Obr. 2-2. Z předchozí části o jalovém výkonu by mělo být jasné proč.

Na Obr. 2-2 je vidět situaci bez kompenzace, s úplnou kompenzací a s kompenzací částečnou. Při stavu bez kompenzace, se veškerý jalový výkon potřebný pro spotřebič přenáší po celé síti a tuto síť zatěžuje. V tomto případě je síť, za předpokladu stejného činného výkonu P pro všechny tři příklady, nejvíc zatížena. Všechny části vedení jsou v tomto případě zatěžovány nejvíc. Dochází k největším ztrátám, je zde nejvyšší riziko poruchy způsobené vyšším proudovým zatížením a jednotlivým částem vedení, stejně jako dalším zařízením, která jsou součástí elektrických napájecích sítí, se zkracuje jejich životnost nejrychleji

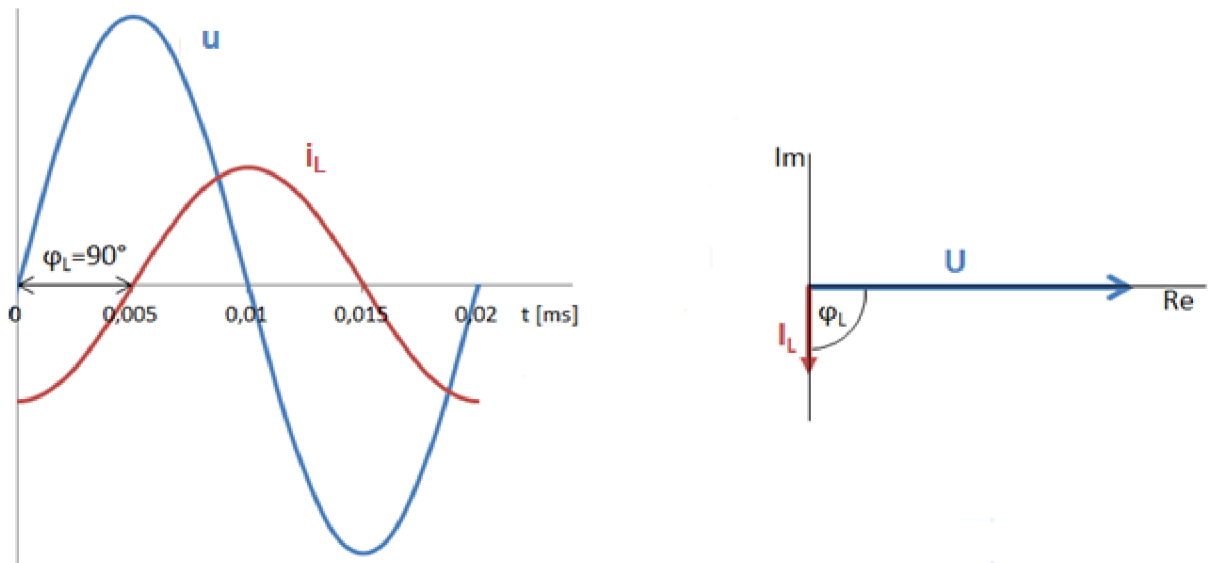


Obr. 2-2 Kompenzace – a)žádná, b)úplná, c)částečná

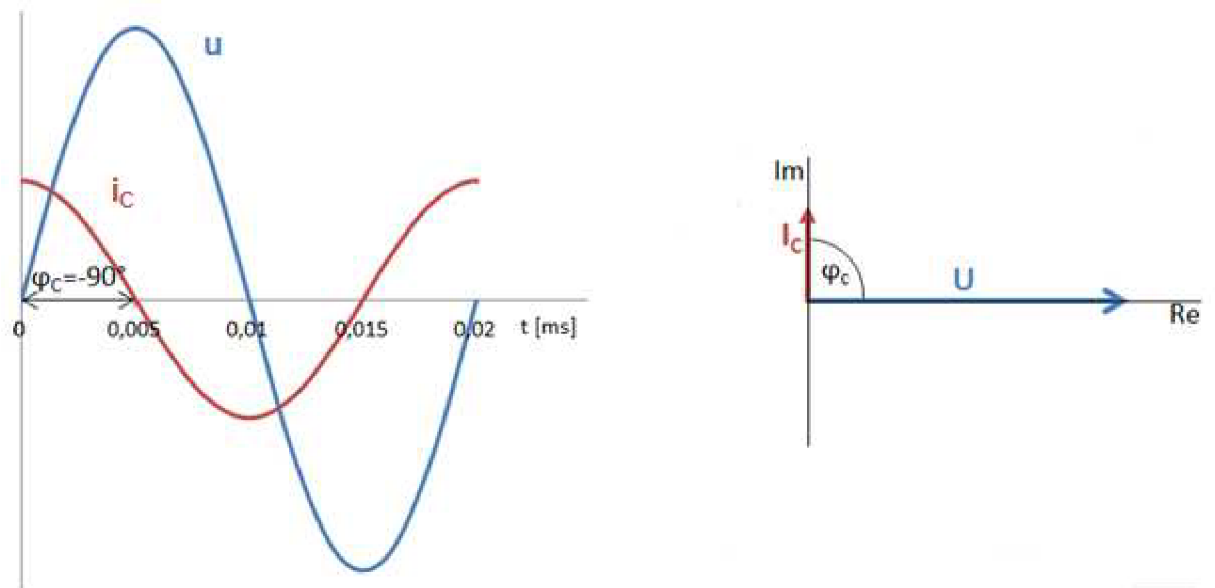
V případě úplné a částečné kompenzace lze vidět, že již velká část sítě je kompenzována (je sníženo její zatížení). A to proto, že část potřebného jalového výkonu je dodávána kompenzačním zařízením v místě spotřeby a zbylá část jalového výkonu je braná ze sítě (pouze v případě částečné kompenzace). V případě úplné kompenzace není odebírán ze sítě žádný jalový výkon, tzn. spotřebič je vykompenzován na účinník $\cos\varphi=1$. Tento případ je ale idealizován a v praxi se často nevyskytuje. V praxi se kompenzuje většinou na účinník $\cos\varphi=0,97$, protože při $\cos\varphi=1$ hrozí překompenzování spojené s nevyžádanou dodávkou jalového výkonu a tudíž opět přetěžování sítě. Existuje tedy stále jakýsi jalový výkon, který je přenášen přes celou energetickou síť. Jeho velikost je, ale mnohonásobně menší a tudíž je značně sníženo zatížení převážné části vedení. Tato část je tzv. vykompenzovaná. Je nutné, si také uvědomit, že část vedení za kompenzací už vykompenzovaná není, proto je snaha kompenzační zařízení umístit co nejbližší místu spotřeby.

Je známo, že kapacitní a induktivní zátěž potřebuje pro svou práci také jalový výkon. Na těchto zařízeních dochází k fázovému posunu mezi napětím a proudem. Míru fázového posunutí nám říká velice důležitá veličina účinník $\cos\varphi$. Čím větší fázový posun, tím horší (menší) $\cos\varphi$ a tím vzrůstá jalový výkon. Pokud jsou uvažovány ideální prvky, bude se na induktivní zátěži zpožďovat proud cívky I_L za napětím U o úhel $\varphi_L=90^\circ$ a v případě kapacitní zátěže se bude zpožďovat napětí U za proudem kondenzátoru I_C o $\varphi_C=-90^\circ$. U čistě ohmické zátěže nedochází k fázovému posunu mezi napětím a proudem a tudíž $\varphi_R=0^\circ$. To pro vysvětlení principu kompenzace, ale není důležité a proto jsou níže znázorněny průběhy napětí a proudu pouze u

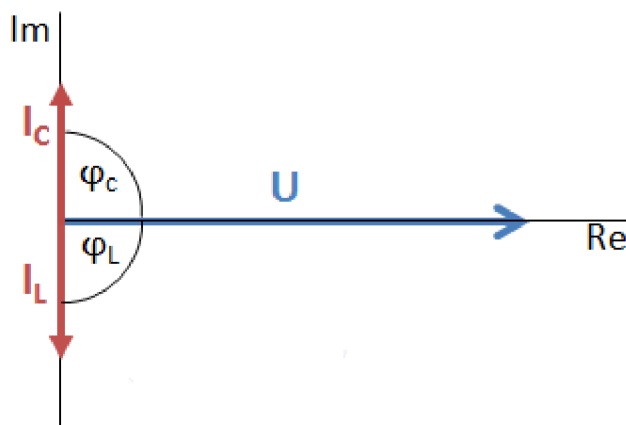
kapacitní a induktivní zátěže viz Obr. 2-3 a Obr. 2-4. Dále je zde ještě jeden společný obrázek Obr. 2-5 pro oba typy zátěže.



Obr. 2-3 Fázový posun-čistě induktivní zátěž

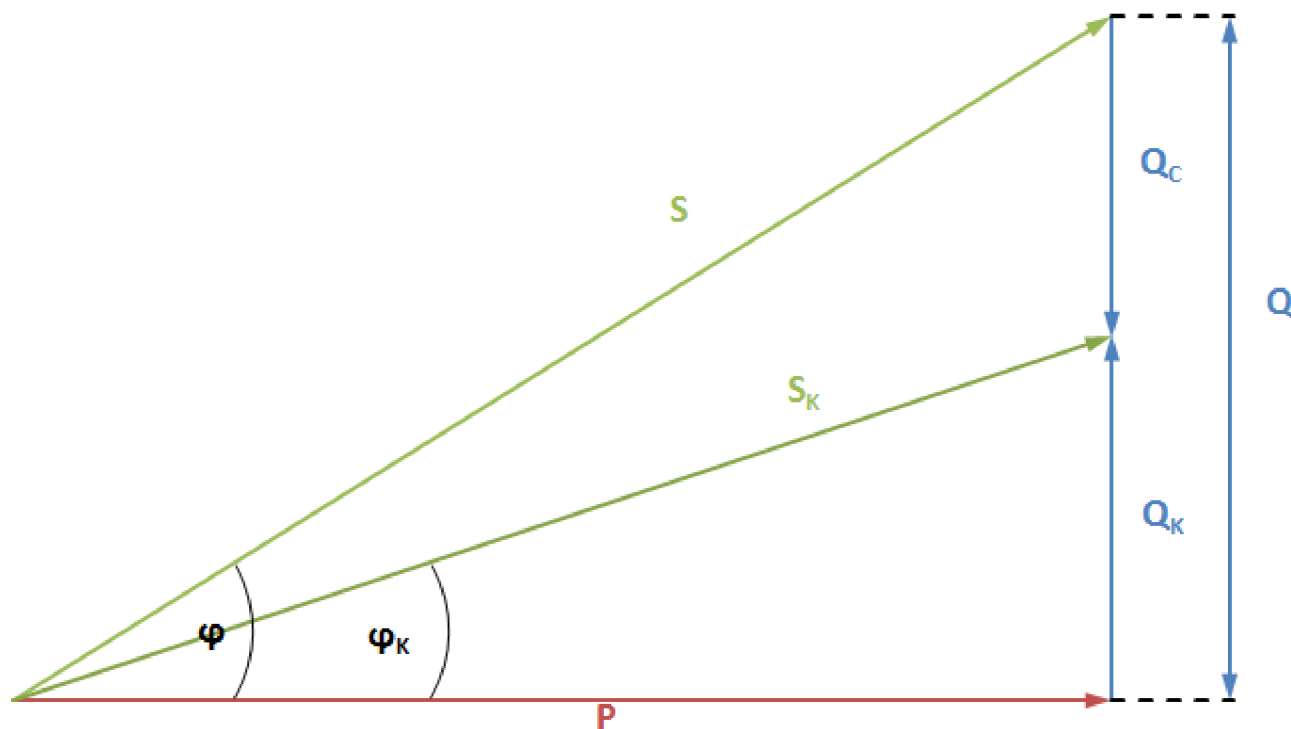


Obr. 2-4 Fázový posun-čistě kapacitní zátěž



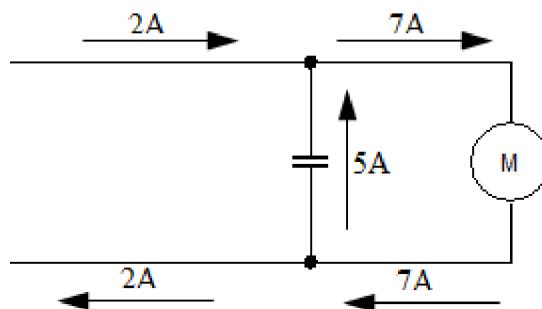
Obr. 2-5 Fázorový diagram čistě induktivní a kapacitní zátěže

Z posledního obrázku Obr. 2-5 je vidět, že kapacitní a induktivní proud jsou v každém okamžiku opačného směru. Výsledný proud je dán jejich rozdílem a proto i výsledný jalový výkon je dán rozdílem jalových výkonů těchto dvou složek viz Obr. 2-6. Toto je základ, ze kterého se u kompenzace vychází. V praxi téměř vždy převládá zařízení povahy induktivní, a proto se pro kompenzaci využívají kondenzátory, které jsou paralelně připojené k takovýmto spotřebičům. Toto je ukázáno na malém příkladu (Obr. 2-7).



Obr. 2-6 Složky výkonů před a po kompenzaci

Na obrázku Obr. 2-6 je stav před a po kompenzaci. Je vidět, že kompenzací se snižuje velikost jalového výkonu a tím i celkový zdánlivý výkon. Činný výkon se nemění. Výkon Q je celkový jalový výkon, který spotřebič potřebuje a který by v případě žádné kompenzace zatěžoval celé vedení. Výkon S , je zdánlivý výkon před kompenzací a výkon S_K , je zdánlivý výkon po kompenzaci. Také je vidět, jak se kompenzací snižuje úhel φ na úhel φ_K , čímž se zvyšuje účinnost odběru.

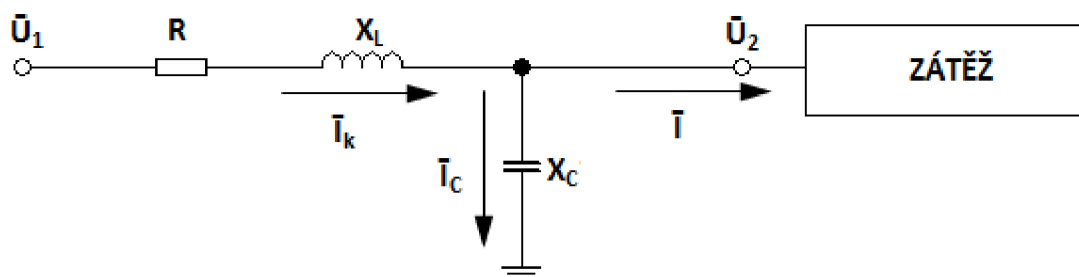


Obr. 2-7 Kompenzace motoru

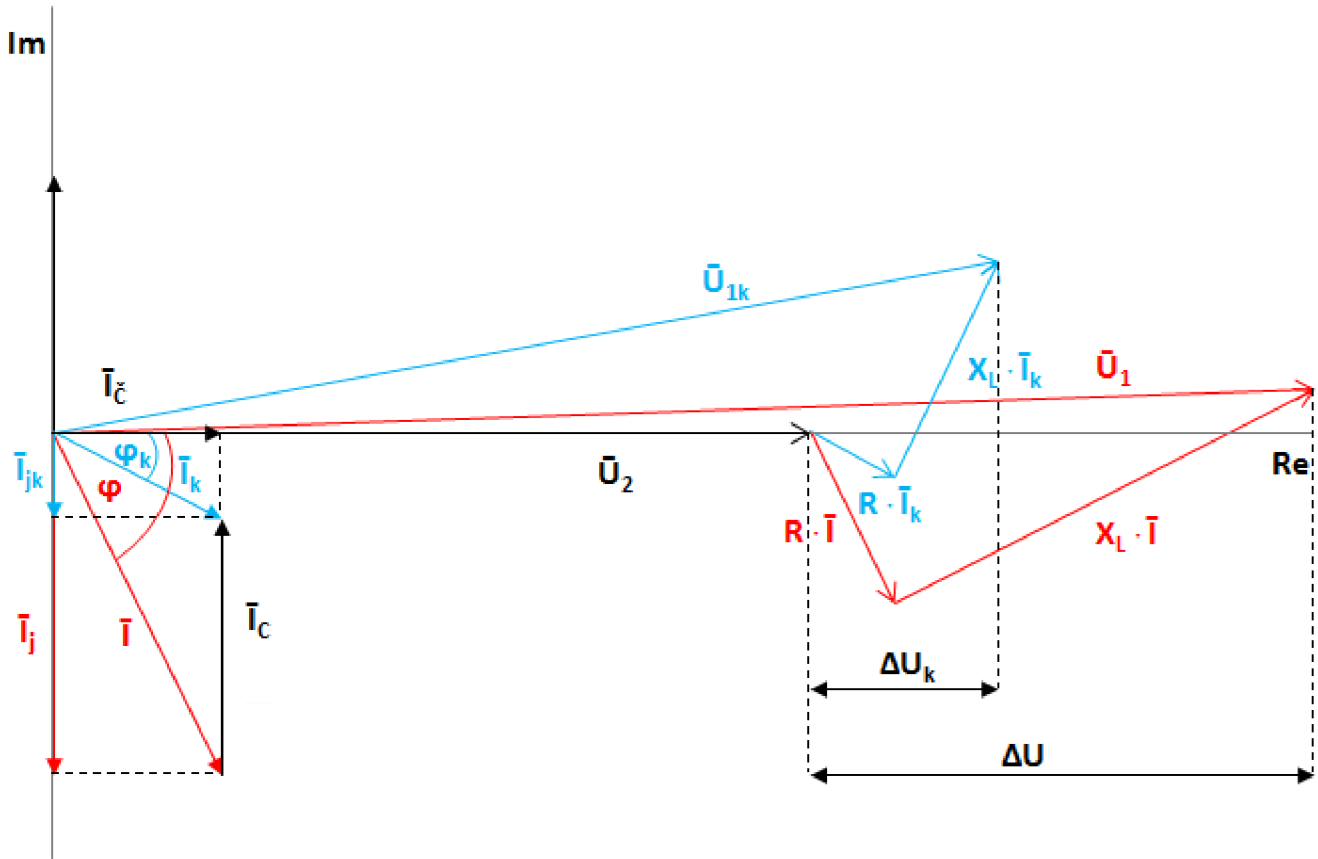
Na Obr. 2-7 je názorný příklad, ze kterého by již mělo být opravdu zřejmé, jak kompenzace funguje. V tomto malém příkladě je indukční zátěž (motor), která je kompenzována kondenzátorem. Proud nutný pro vytvoření magnetického pole motoru tzv. magnetizační proud je 7A, proud kondenzátoru 5A. Zbylé 2A jsou brány ze sítě, tzn., jedná se o částečnou kompenzaci. Tento případ je velmi zjednodušený. Jedná se pouze o jalové složky proudu. V reálu samozřejmě motor spotřebovává také činný proud.

2.2.1 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace je připojena paralelně ke kompenzovanému zařízení (Obr. 2-8). Slouží ke kompenzaci jalového výkonu procházejícího energetickou sítí. Ve všech částech této práce, kde byla řeč o snižování jalového výkonu v síti, souvisí právě s tímto druhem kompenzace. Kompenzace by měla být připojena co nejbližší místu spotřeby. Tak se sníží proudové zatížení co největší části sítě a dosáhne co nejehospodárnějšího provozu. V praxi to ovšem není vždy možné, neboť se musí také zohledňovat pořizovací cena a ta je v některých případech příliš vysoká a tak se volí různé kompromisy (více v kapitole 3 o prostředcích kompenzace). Princip paralelní kompenzace je na Obr. 2-9, na kterém také tento princip bude vysvětlen. Veličiny ve fázorovém diagramu označené červenou barvou odpovídají stavu bez kompenzace a veličiny označené barvou modrou stavu po kompenzaci. Je vidět, že díky kompenzaci (vlivem proudu kondenzátoru \bar{I}_c) dojde ke snížení velikosti odebíraného jalového proudu z hodnoty \bar{I}_j na hodnotu \bar{I}_{jk} . Tím dojde ke snížení celkového odebíraného zdánlivého proudu z hodnoty \bar{I} na \bar{I}_k tzn. ke snížení odebíraného jalového výkonu a díky tomu se zmenší zatížení sítě. Z fázorového diagramu lze také vyčíst, že se zmenší celkový úbytek na vedení z hodnoty ΔU na ΔU_k . Co už nelze vyčíst přímo je, že se zmenší také celkové ztráty. Všechny vylepšení v síti, jak už v podobě nižšího úbytku napětí anebo v podobě nižších ztrát, jsou způsobeny menším proudem v síti.



Obr. 2-8 Schéma sítě s paralelní kompenzací



Obr. 2-9 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Celkový proud procházející vedením po kompenzaci:

$$\bar{I}_k = \bar{I} + \bar{I}_C \quad (\text{A}; \text{A}, \text{A}) \quad (2.6)$$

Za předpokladu, že činný výkon a napětí (fázová hodnota) jsou stejné i po kompenzaci, klesne proud v síti na hodnotu:

$$I_k = I \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} \quad (\text{A}; \text{A}, -) \quad (2.7)$$

Podíl jalového proudu po kompenzaci a jalového proudu před kompenzací je tzv. stupeň kompenzace k_p :

$$k_p = \frac{I_{jk}}{I_j} = 1 - \frac{I_C}{I_j} \quad (-; \text{A}, \text{A}) \quad (2.8)$$

Zmenšení ztrát po kompenzaci Δp :

$$\Delta p = \Delta P - \Delta P_k = R \cdot I^2 - R \cdot I^2 \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k} = R \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k} \right) \quad (\text{W}; \text{V}, \text{A}, -) \quad (2.9)$$

Zmenšení úbytku napětí díky kompenzaci:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \Delta U - \Delta U_k = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X_L \cdot I \cdot \sin \varphi - R \cdot I \cdot \cos \varphi - X_L \cdot (I \cdot \sin \varphi - I_C) \\ &= X_L \cdot I_C \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

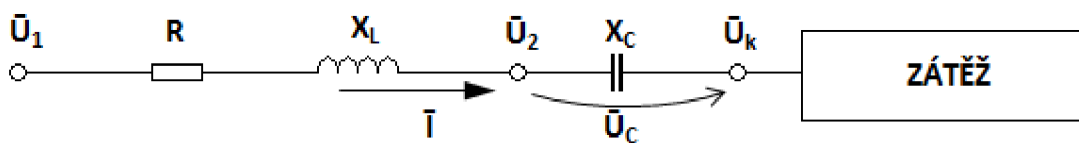
Potřebný výkon kondenzátoru Q_C ke změně fázového posuvu z hodnoty φ na φ_k :

$$Q_C = P \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k}}{\cos \varphi_k} \right) \quad (\text{VAR; W, -}) \quad (2.11)$$

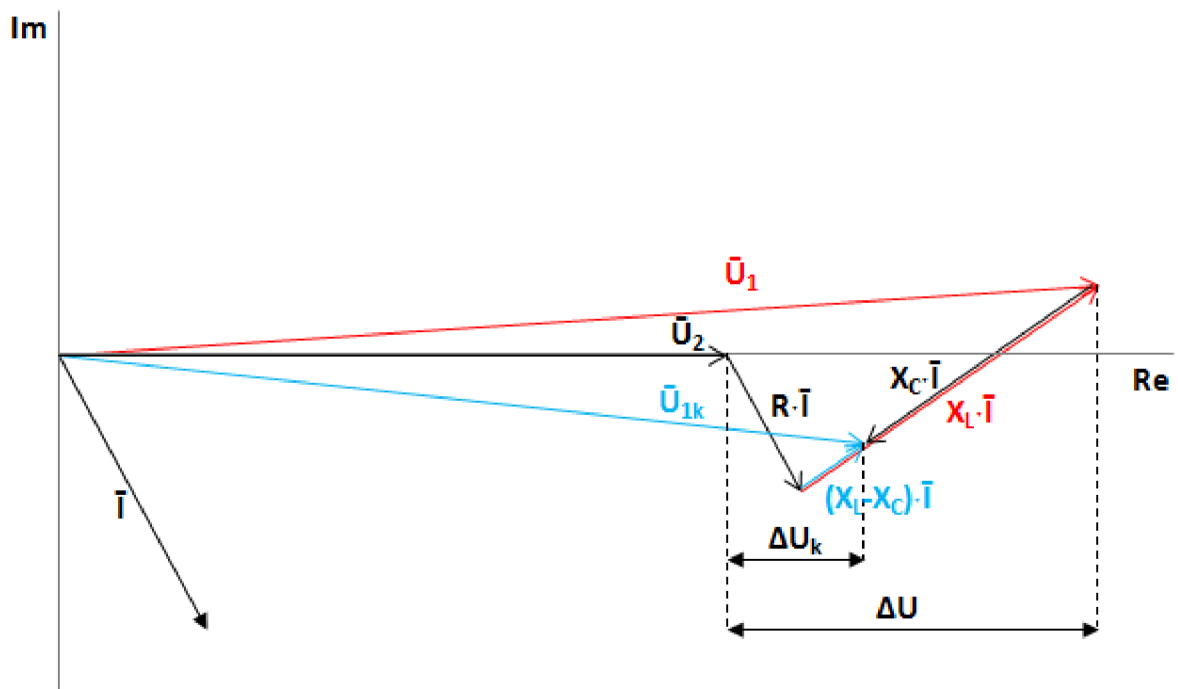
Vzorce jsou platné pro jednofázový obvod. V případě trojfázové sítě se ztráty a jednotlivé výkony zvětší na trojnásobek.

2.2.2 Sériová (podélná) kompenzace

Sériová kompenzace je umístěna v obvodu do série (Obr. 2-10). Tento druh kompenzace neslouží ke kompenzaci jalového výkonu (nesnižuje zatížení sítě, přenášený výkon je pořád stejný), ale ke zlepšování napěťových poměrů v síti. Proto tomuto tématu v dalších částech této práce již nebude věnována pozornost. Princip sériové kompenzace je vysvětlen na Obr. 2-11 Veličiny ve fázorovém diagramu označené červenou barvou odpovídají stavu bez kompenzace a veličiny označené barvou modrou stavu po kompenzaci. Je vidět, že vřazením kondenzátoru do série se sítí, se celková impedance vedení sníží (sít' je induktivní povahy a tudíž je výsledná impedance s kondenzátorem dána jejich rozdílem) a tím se sníží úbytek napětí. Kondenzátor v sérii tudíž působí jako takový regulátor napětí. Tento druh kompenzace není z ekonomického hlediska výhodný, a proto se nevyužívá. Používá se pouze na velmi dlouhá vedení, kde je velmi vysoký poměr X_L/R .



Obr. 2-10 Schéma sítě se sériovou kompenzací



Obr. 2-11 Fázorový diagram sériové kompenzace

Zmenšení úbytku napětí díky kompenzaci:

$$\begin{aligned}\Delta u &= \Delta U - \Delta U_k = R \cdot I \cdot \cos\varphi + X_L \cdot I \cdot \sin\varphi - R \cdot I \cdot \cos\varphi - I \cdot \sin\varphi (X_L - X_C) \\ &= I \cdot \sin\varphi \cdot X_C \quad (\text{V; A, } -, \Omega)\end{aligned}\quad (2.12)$$

Podíl reaktance kompenzovaného vedení a podíl reaktance nekompenzovaného vedení udává tzv. stupeň kompenzace k_s :

$$k_s = \frac{X_L - X_C}{X_L} = 1 - \frac{X_C}{X_L} \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (2.13)$$

Výkon kondenzátoru Q_C :

$$Q_C = U_C \cdot I = \frac{I^2}{\omega C} = \frac{I^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\text{VAR; A, Hz, F}) \quad (2.14)$$

Ze vzorce pro výkon kondenzátoru je vidět, že výkon kompenzační baterie se mění v závislosti na velikosti zatížení. Se zatížením se také mění napětí na baterii.

Vzorce jsou platné pro jednofázový obvod, počítáme s fázovou hodnotou napětí. V trojfázové síti by se výkony zvětšily na trojnásobek.

2.3 Sankce a přírážky za nedodržení předepsaného účinníku

Odběratelé elektřiny mají ze zákona (Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o Státní energetické inspekci) povinnost odebírat elektřinu v rozmezí účinníku 0,95 – 1, pokud se odběratel s dodavatelem nedohodnou jinak. Povinnost se týká odběratelů:

- kategorie A: odběr je připojen na soustavu s napětím mezi fázemi vyšším než 52kV (VVN- velmi vysoké napětí)
- kategorie B: odběr je připojen na soustavu s napětím mezi fázemi v rozmezí od 1kV do 52kV (VN- vysoké napětí)
- kategorie C: odběr je připojen na soustavu s napětím mezi fázemi nižším než 1kV (NN - nízké napětí) s výjimkou domácností

Měření účinníku se provádí buď přístrojem, který přímo zobrazuje hodnotu účinníku, anebo výpočtem z naměřených hodnot na elektroměrech pro činný a jalový výkon. U tohoto typu měření účinníku se nejprve stanoví $tg\varphi$ z naměřených hodnot, poté z tabulky (Tab. 2-1) vyčte příslušný účinník $\cos\varphi$ a také příslušná cenová přírážka. Tabulka je uveřejněna v dokumentu zvaném Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu.

Stanovení $tg\varphi$ podle [11]:

$$tg\varphi = \frac{kVArh}{kWh} \quad (-; kVArh, kWh) \quad (2.15)$$

Tab. 2-1 Cenové přírážky při nedodržení účinníku podle [11]

Pásma účinníku	Procentuální přírážka za nedodržení účinníku				Přírážka [%]
	tg φ min [-]	tg φ max [-]	cos φ min [-]	cos φ max [-]	
1	0	0,328	0,95	1	0
2	0,329	0,484	0,9	0,949	2,85
3	0,485	0,75	0,8	0,899	12,38
4	0,751	1,02	0,7	0,799	28,07
5	1,021	1,333	0,6	0,699	48,58
6	1,334	a více	0	0,599	100,00

Odběratel platí tuto přírážku dodavateli elektrické energie, neboť tím způsobuje ohrožení provozuschopnosti soustavy a zvýšení ztrát. Odběratel je také sankciován za dodání kapacitního jalového výkonu do soustavy, což může nastat díky překompenzování. Sankce je v tomto případě stanovena na 440Kč/MVArh.

Je třeba rozlišovat sankce a přírážky. Přírážky se v účetnictví zahrnují do nákladové položky, kdežto sankce jsou placeny ze zisku.

2.4 Shrnutí všech vlivů kompenzace na energetickou síť

Kompenzace jalového výkonu je jedno z nejefektivnějších a ekonomicky nejvýhodnějších řešení vedoucí ke snížení ztrát. Samozřejmě kompenzace není jediné možné řešení. Jsou také metody jako např. zvyšování průřezu vedení, zvyšování jmenovitého napětí atd. Tyto metody jsou ale obvykle hůře proveditelné a ekonomicky ne tak výhodné. Dále je také nutné mít na paměti, že za špatný účinník $\cos\varphi$ mohou také málo zatížené, předimenzované spotřebiče a spotřebiče pracující naprázdno. A to proto, že s klesajícím zatížením klesá velikost činného výkonu a tím i hodnota účinníku (účinník se zhoršuje). Další metoda je tedy patrná. Jde o to se snažit nepoužívat předimenzovaných spotřebičů, ale nahradit je za menší, které budou např. u motorů lépe odpovídat mechanickému zatížení a dále se také snažit nenechávat např. motory běžet zbytečně naprázdno.

Hlavní vlivy kompenzace na energetickou síť:

- **Snížení úbytku napětí-** parametry vedení zůstávají stejné a zmenšuje se proud vedením, tudíž dochází k menšímu úbytku
- **Snížení ztrát-** ztráty jsou ovlivněny druhou mocninou zdánlivého proudu. Pokud se zmenší jalová část proudu, zmenší se i celkový zdánlivý proud a tím i ztráty
- **Snížení výdajů za elektřinu odběratelům-** odběratelé nemusejí platit sankce a přírážky za nedodržení účinníku. I pokud bereme v úvahu náklady spojené s pořízením kompenzace, tak je to stále velmi výhodné. Návratnost je velmi vysoká.
- **Snížení pořizovacích nákladů-** celá síť může být dimenzována na menší proudy
- **Zlepšení zkratových poměrů v síti**
- **Prodloužení životnosti-** snížením proudového zatížení sítě oddalujeme renovace, výměny jednotlivých částí sítě
- **Zvýšení zatížitelnosti-** čím je hodnota účinníku vyšší, tím může být dodáván vyšší činný výkon. Snížením jalové složky výkonu se sníží proudové zatížení sítě a o tuto změnu může být navýšen užitečný činný výkon, tudíž efektivnější využití přenosových schopností soustavy.

3 PROSTŘEDKY PRO KOMPENZACI JALOVÉHO VÝKONU

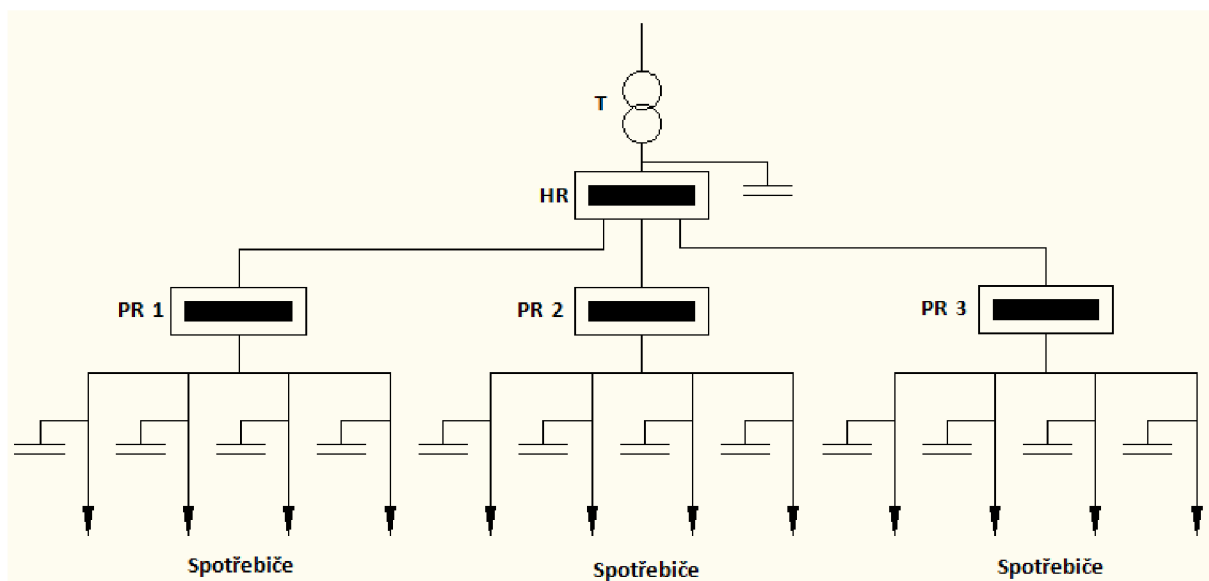
V této kapitole budou představeny nejpoužívanější druhy kompenzačních zařízení, jejich možné umístění vůči spotřebičům a různé typy jejich regulace. Všechny tyto zmíněné okolnosti musejí být při návrhu kompenzace brány v potaz.

3.1 Rozdělení podle místa připojení kompenzace

Rozlišujeme kompenzaci individuální (někdy označovanou jako jednotlivou), skupinovou, centrální a kombinovanou (někdy se používá také termín smíšená kompenzace). Bude vysvětlen princip jednotlivých řešení a uvedeny jejich výhody a nevýhody.

3.1.1 Individuální (jednotlivá) kompenzace

Individuální kompenzace znamená, že přímo na svorky každého jednotlivého spotřebiče je v jeho těsné blízkosti připojen vlastní, vhodně nadimenzovaný kondenzátor. Tento princip kompenzace je uveden na Obr. 3-1, kde zkratka HR znamená hlavní rozvaděč a zkratka PR podružný rozvaděč. Zkratka T znamená transformátor. U nízkého a vysokého napětí se způsob zapojení této kompenzace liší. To si vysvětlíme na příkladu asynchronního motoru. Na nízkém napětí se kondenzátor k motoru připojuje přímo na jeho svorky. Na vysokém napětí přes vybíjecí odpory.



Obr. 3-1 Zapojení individuální kompenzace

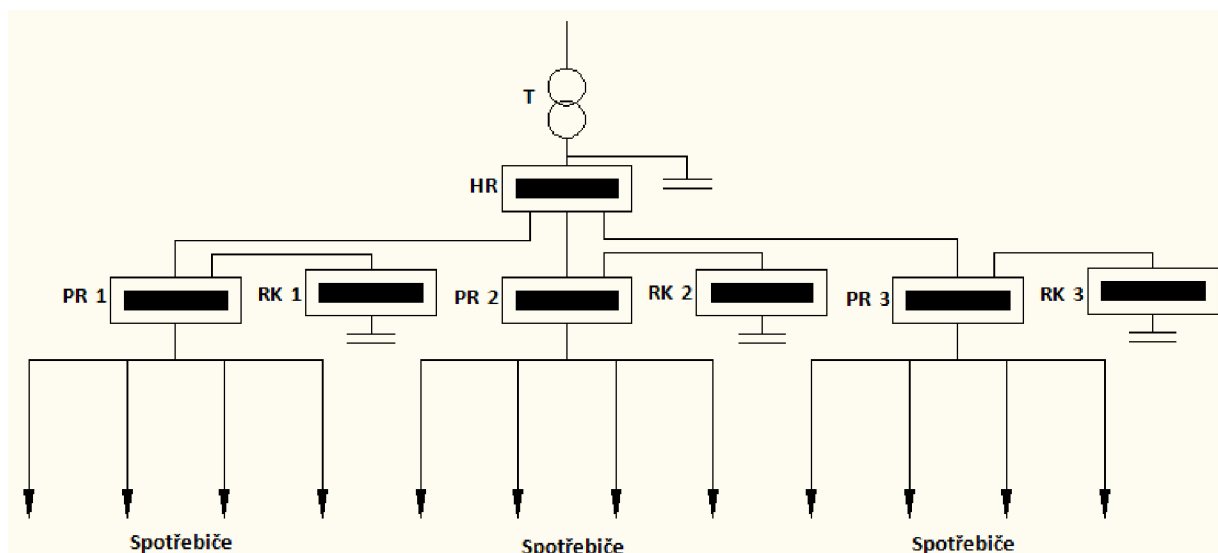
Výhody této kompenzace spočívají hlavně ve vykompenzování celého obvodu (od zdroje až po spotřebič), což znamená úspory. Lze totiž volit menší průřezy vodičů a také optimálně dimenzovat přístroje sloužící v obvodu pro spínání a jištění. Při správném dimenzování je kompenzace spolehlivá, jak z hlediska správného vykompenzování účinníku, tak z hlediska poruchovosti. To je způsobeno tím, že není potřeba žádných dalších prvků pro funkci této kompenzace jako např. regulátory, stykače. Nehrozí zde ani nebezpečí překompenzování, neboť kondenzátor se vždy zapíná a vypíná společně se spotřebičem, vždy ve stejný okamžik. Je to kompenzace nejjednodušší. Je velice snadná na provoz (to díky absenci jakékoliv automatizace). Pokud dojde k poruše, stačí jen jít a vyměnit daný kondenzátor. Nevýhodou je náročná údržba, která je způsobena velkým množstvím kondenzátorů a jejich rozptýlením. Další nevýhodou je, že využití kondenzátoru závisí na využití spotřebiče, což u málo používaných spotřebičů tuto

kompenzaci prodražuje. Také pořizovací náklady jsou velmi vysoké. To je způsobeno velkým množstvím kondenzátorů s čímž souvisí i velké požadavky na prostor (zaberou hodně místa).

Tato kompenzace se používá hlavně ke kompenzaci výkonově náročných zařízení (nad 5kW) se stálým zatížením a dlouho dobou provozu jako např. asynchronní motory, transformátory, svítidla s indukčním předřadníkem atd.

3.1.2 Skupinová kompenzace

Při skupinové kompenzaci se kompenzace připojuje na rozvaděče, a tudíž slouží jedna kompenzační jednotka pro více spotřebičů, viz Obr. 3-2 (kde RK- regulace kondenzátoru). Potřebný výkon kompenzační baterie se stanovuje na základě soudobého výkonu odběru. Díky tomu klesá potřebný kompenzační výkon. Tento druh kompenzace se používá nejčastěji v sítích NN (nízkého napětí), pro spotřebiče méně výkonově náročné (pod 5kW) a pro spotřebiče s krátkým časem využití. Instalaci skupinové kompenzace můžeme najít i v sítích VN (vysokého napětí).

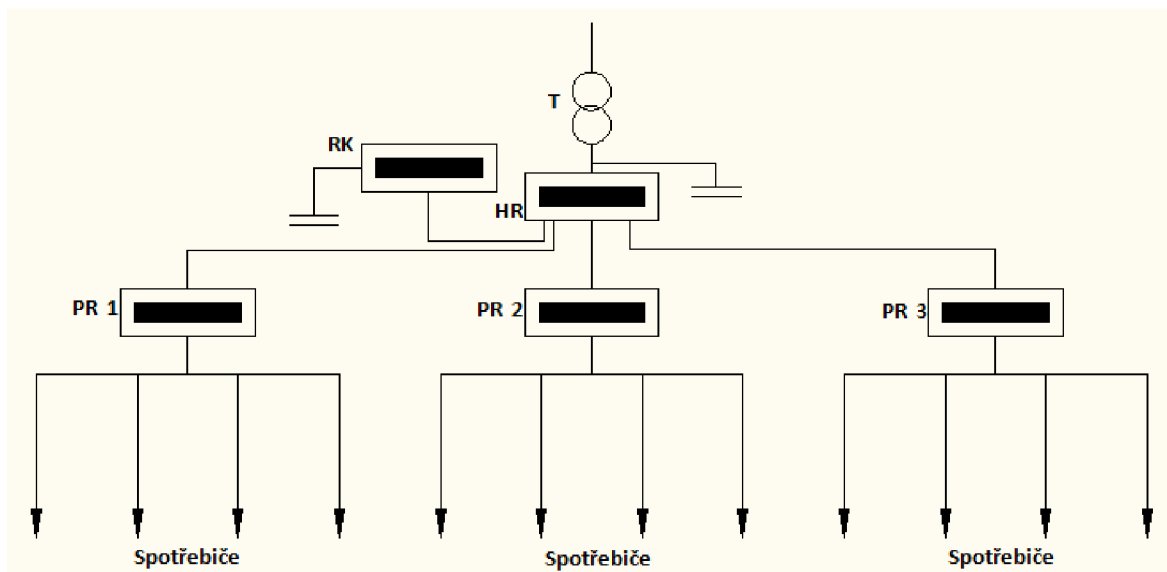


Obr. 3-2 Zapojení skupinové kompenzace

Největší výhodou je snížení počtu kondenzátorů a s tím spojená nižší pořizovací cena, nenáročnost na údržbu a prostor kondenzátorů. Nevýhodou je, že část sítě mezi kompenzací a spotřebiči není vykompenzovaná. Nevýhodou je také náročnější provoz spojený s nutností instalace spínacích prvků a regulací ke kondenzátorům k umožnění automatické regulace míry kompenzování podle průběhu jalového výkonu.

3.1.3 Centrální kompenzace

Je to kompenzace, která se zapojuje ke vstupnímu hlavnímu rozvaděči celého podniku. Zapojení je na Obr. 3-3. Výhody a nevýhody jsou velice podobné jako u skupinové kompenzace. V porovnání s ní se: sníží požadavek na velikost kompenzačního výkonu, sníží se pořizovací náklady, zvětší se nevykompenzovaný úsek sítě.



Obr. 3-3 Zapojení centrální kompenzace

3.1.4 Kombinovaná (smíšená) kompenzace

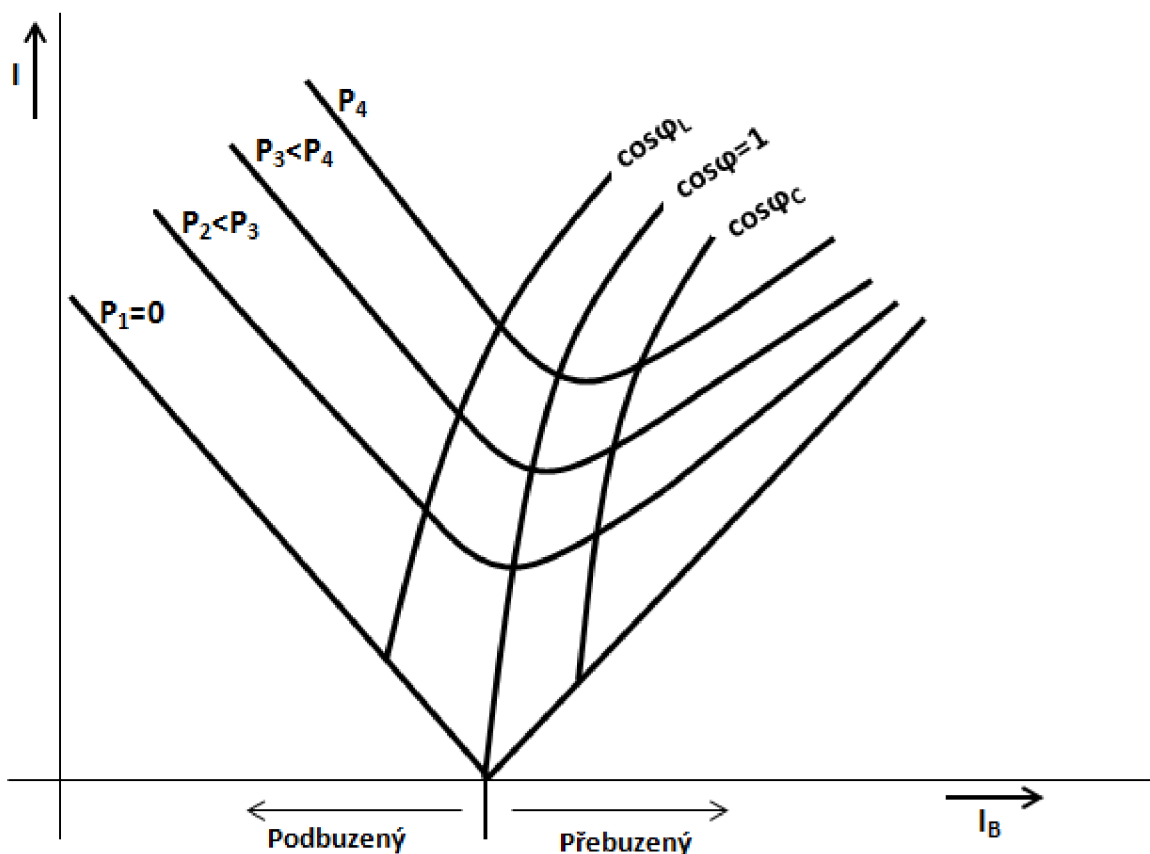
Je, jak už sám název říká, jedná se o kombinaci předchozích variant a to buď dvou, nebo všech tří. Tato kompenzace je velmi rozšířená, což je způsobeno neuniverzálností předchozích variant, jež žádná ze zmíněných kompenzací není ideální. Proto se při návrhu kompenzace hledá kompromis a ten je nejčastěji nacházen právě ve smíšené kompenzaci.

3.2 Rozdělení podle druhu kompenzačních zařízení

V zásadě lze rozdělit prostředky ke kompenzaci do dvou hlavních skupin. A to na zařízení rotační a na zařízení statická. U rotačních zařízení se používají točivé stroje ke kompenzaci. V této skupině je jeden zástupce a tím je synchronní kompenzátor. U statických zařízení se používají pasivními prvky, kondenzátory. Zde je již nabídka širší. Je možné využít např. tzv. prostých kondenzátorů, chráněné kompenzační sekce (hrazená kompenzace) a kompenzačních filtrů. V následujících podkapitolách budou jednotlivé druhy vysvětleny. Nejvíce pozornosti budeme věnovat tzv. hrazené kompenzaci, která se v dnešní době s rapidním rozvojem výkonové elektroniky používá čím dál častěji.

3.2.1 Synchronní kompenzátory

U tohoto typu kompenzace se využívá synchronního stroje. Synchronní stroj se vyznačuje tím, že mu je energie potřebná pro magnetizaci dodávána tzv. budícím obvodem, který je buzen stejnosměrným napětím. Při stálém napětí, kmitočtu a zátěžném momentu nemá buzení vliv na činný výkon stroje. Buzení má ale vliv na jalovou energii. Změnou buzení jsme schopni jalovou energii jak spotřebovat tak dodávat. Pro účely kompenzace je důležitý právě stav, kdy jsme schopni jalovou energii dodávat. Dodávat jalovou energii paralelně připojenému spotřebiči a tím kompenzovat toto zařízení. Oblasti, ve kterých může synchronní stroj pracovat, jsou vidět na V-křivkách (Obr. 3-4). V-křivky jsou závislostí proudu statoru na proudu buzením při konstantním zatížení.



Obr. 3-4 V-křivky synchronního stroje

Z obrázku je vidět, že při různém zatížení jde pomocí vhodného buzení udržovat konstantní hodnotu účinníku. Ke kompenzaci se využívá nejspodnější křivka, která reprezentuje synchronní stroj pracující na prázdko, tedy s velmi malou spotřebou činného výkonu a relativně velkým rozsahem regulace jalového výkonu.

Nevýhodou těchto zařízení je poměrně pomalá odezva na dynamicky se měnící potřebu jalového výkonu. Může tedy docházet jak ke krátkodobému nedokompenzování tak i překompenzování, což má negativní vliv na kolísání napětí v síti.

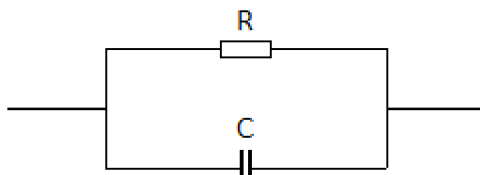
Synchronní stroje pro kompenzaci se využívají především u hladin vysokého napětí (obvykle 6kV). Vzhledem k velkým výkonům synchronních strojů a pomalé odezvě na měnící se potřebu jalové energie se tyto zařízení využívají jako centrální kompenzace rozsáhlých průmyslových podniků, jejichž odběr jalového výkonu je víceméně stabilní. Tento druh kompenzace je nevhodný pro kompenzaci spotřebičů, jejíž spotřeba jalové energie se rychle mění. V poslední době je tento druh kompenzace v útlumu a to především díky spotřebě činného výkonu (buzení je napájeno ze stejnosměrného obvodu), vysokými nároky na údržbu a obestavěný prostor.

3.2.2 Prosté kondenzátory

Jedná se o klasické výkonové kondenzátory, u kterých jsou kladeny velké nároky na tepelnou stabilitu (při vysokém jalovém proudu), odolnost vůči přepětí a spolehlivý provoz. Důležitou vlastností kondenzátorů je jejich frekvenční závislost impedance. Reaktance kondenzátoru X_C je:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega; \text{Hz}, \text{F}) \quad (3.1)$$

Je vidět, že s rostoucí frekvencí se reaktance kondenzátoru zmenšuje. Tudiž, připojením kondenzátoru do sítě s obsahem harmonických, budou tyto harmonické proudově přetěžovat nejen kondenzátor, ale i úsek sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem. To má velký vliv na životnost zařízení vystavených takovému přetěžování. Proto prosté kondenzátory mohou používat pouze v sítích s malým rušením. Tzn., s podílem instalovaného výkonu nelineárních zařízení nepřesahujících 10-15%. Podíl těchto zařízení se stále zvyšuje a tudíž, znemožňuje použití prostých kondenzátorů v sítích, kde to bylo ještě před časem možné. Životnost kondenzátorů je také značně ovlivněna provozní teplotou, která v případě vyšších hodnot způsobuje zrychlenou degradaci dielektrika a jeho vlastností. To ovlivňuje kvalitu kondenzátoru, která je především ovlivněna ztrátami. Ekvivalentní obvod kondenzátoru je na Obr. 3-5.



Obr. 3-5 Ekvivalentní obvod kondenzátoru

Kde odpor R charakterizuje ztráty P_Z (ohmické a ztráty v dielektriku) a kapacita C charakterizuje množství naakumulované energie Q_C . Kvalitu kondenzátoru pak udává tzv. ztrátový úhel $tg\delta$:

$$tg\delta = \frac{P_Z}{Q_C} \quad (-; \text{W}, \text{VAr}) \quad (3.2)$$

Na závěr bude uvedena ještě jedna důležitá vlastnost a tou je velikost výkonu kondenzátoru. Ta se liší podle druhu zapojení. Pro jednofázový kondenzátor je výkon Q_C dán vztahy:

$$Q_C = U_f^2 \cdot \omega \cdot C \quad (\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (3.3)$$

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad (\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (3.4)$$

Pro trojfázový kondenzátor v zapojení do trojúhelníku platí vztah:

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad (\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (3.5)$$

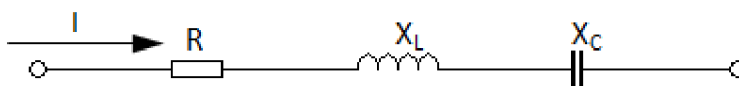
Pro trojfázový kondenzátor v zapojení do hvězdy platí vztah:

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad (\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (3.6)$$

kde I je fázový proud, C_D je velikost kapacity kondenzátoru při zapojení do trojúhelníka a C_Y je velikost kapacity při zapojení do hvězdy.

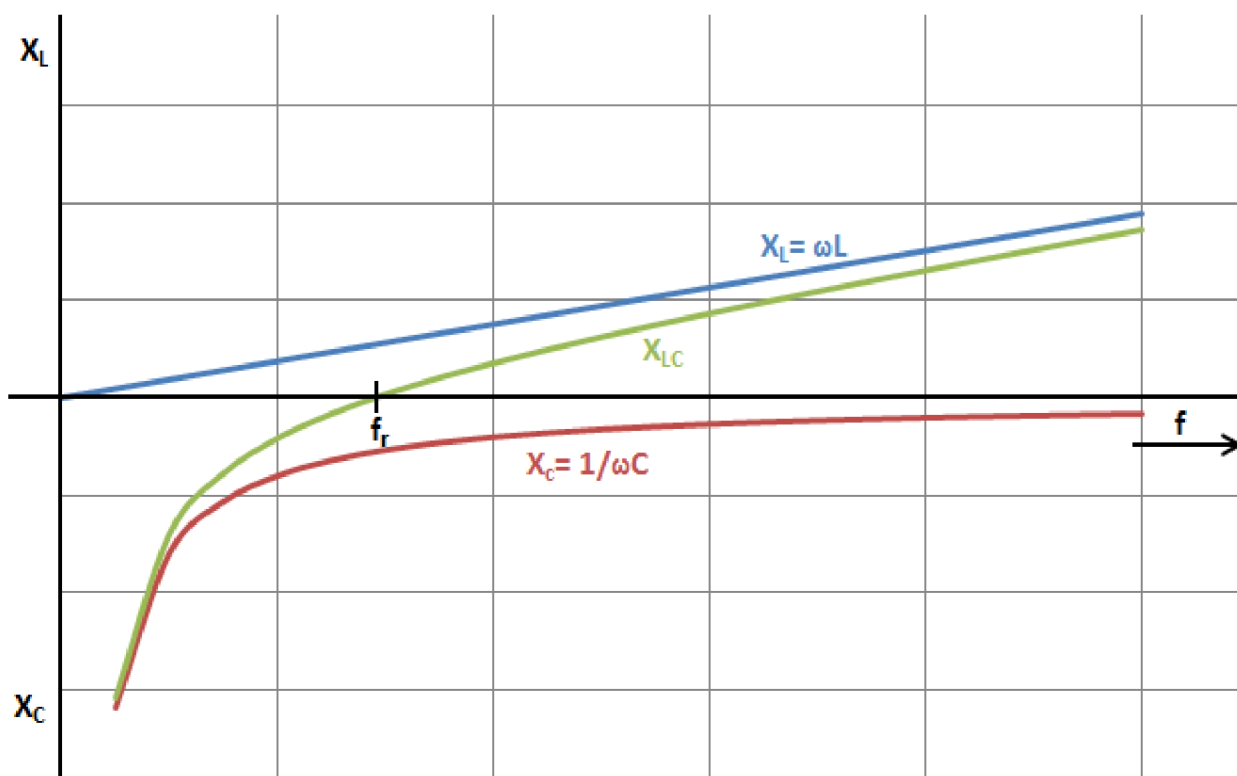
3.2.3 Chráněné kompenzační sekce (hrazená kompenzace)

Princip hrazené kompenzace spočívá ve vřazení indukčnosti do série s kondenzátorem určeným pro kompenzaci Obr. 3-6. Tím vzniká sériový rezonanční obvod tzv. chráněná sekce, která se připojí paralelně ke kompenzovanému spotřebiči. Tento druh kompenzace se v poslední době značně rozšířil. To je způsobeno velkým nárůstem nelineárních spotřebičů v síti emitujících harmonické do sítě.



Obr. 3-6 Chráněná kompenzační sekce

Nyní bude vysvětlen princip hrazené kompenzace. K jednoduššímu pochopení poslouží Obr. 3-7, kde je znázorněna kmitočtová charakteristika LC obvodu.



Obr. 3-7 Frekvenční charakteristika LC obvodu

Z obrázku je vidět, že kapacitní reaktance se s rostoucím kmitočtem zmenšuje a tudíž, by bez přítomnosti indukčnosti celková impedance klesala a tak by docházelo ke zvyšování proudu v důsledku harmonických, které by v takovém případě byly RLC obvodem tzv. odsány a tím by docházelo k přetěžování kondenzátoru. V případě, že je ke kondenzátoru vřazena indukčnost, tyto proudy vyšších harmonických odsány nebudou, a tudíž nebude docházet k přetěžování kondenzátoru. To je způsobeno tím, že induktivní reaktance s frekvencí roste a tak tyto vyšší harmonické potlačí. To je důvod slova „chráněná“ v tomto druhu kompenzace, neboť vřazením indukčnosti je chráněn kondenzátor před přetěžováním. Je vidět tedy, že chráněná sekce slouží jak pro kompenzaci (pro kmitočty menší než rezonanční kmitočet, kde převládá kapacitní charakter), tak i pro ochranu proti přetěžování kondenzátoru. To je důležité, neboť přetěžováním

dochází k degradaci dielektrika a ke zhoršení kvality kondenzátoru. Vlivem této kompenzace dochází také k omezení zapínacího proudového rázu a rezonančních jevů.

Nyní budou uvedeny vztahy, které je nutné znát při návrhu hrazené kompenzace:

Rezonanční frekvence se vypočítá ze vztahu:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (\text{Hz; F, C}) \quad (3.7)$$

Řád harmonické, při kterém rezonance nastane:

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad (-; \text{Hz, Hz}) \quad (3.8)$$

Ochranné tlumivky se navrhují za předpokladu, že $X_L \ll X_C$ a proto:

$$X_L = -p \cdot X_C \quad (\Omega; -, \Omega) \quad (3.9)$$

kde p je tzv. činitel zacívkování a je dán vztahy:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (3.10)$$

$$p = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2 \quad (-; \text{Hz, Hz}) \quad (3.11)$$

Hodnota reaktance kondenzátoru se určí ze štítkových hodnot:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} \quad (\Omega; \text{V, VAR}) \quad (3.12)$$

kde U_{CN} je napětí (štítková, sdružená hodnota), které už v sobě zahrnuje zvýšení vlivem předřazené tlumivky.

Reaktance kompenzačního článku je:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad (\Omega; -, \Omega) \quad (3.13)$$

Vlivem připojení tlumivky do série s kondenzátorem se zvýší napětí na kondenzátoru oproti napětí sítě U_S (sdružená hodnota) na hodnotu:

$$U_C = \frac{U_S}{1 - p} \quad (\text{V; V; } -) \quad (3.14)$$

Při výběru tlumivky je nutné zvolit tlumivku s vhodnou hodnotou zacívkování (proč je vysvětleno k závěru této kapitoly). Předchozí vztah slouží např. k ověření, zda zvolený kondenzátor může být použit, zda jeho štítkové napětí je vyšší než napětí, které se na něm objeví díky vřazení tlumivky. Také je při vřazení tlumivky nutné přepočítat výkon uvedený na štítku

kondenzátoru na skutečný kompenzační výkon, který je menší. Skutečný výkon kompenzačního článku s tlumivkou se vypočítá:

$$Q_{LC} = \frac{U_S^2}{X_{LC}} \quad (\text{VAR}; V, \Omega) \quad (3.15)$$

kde U_S je jmenovité napětí sítě (sdružená hodnota).

Rezonanční kmitočet chráněné sekce musí být zvolen tak, aby ležel pod kmitočtem nejnižší harmonické vyskytující se v síti a aby neohrožoval signál hromadného dálkového ovládání HDO, který je většinou vyslán na frekvenci 216 2/3Hz. Teoreticky ideální by bylo tedy naladit rezonanci na kmitočet 125Hz. To ale vede k velmi drahým tlumivkám. Proto se jako nejlepší zdá použití frekvence 189Hz (to odpovídá činiteli zacívkování $p=7\%$).

3.2.4 Kompenzační filtry

Kompenzační filtry se používají pro potřeby filtrace harmonických proudů a současně pro kompenzaci účinníku. Tyto filtry tvoří sériový rezonanční obvod, stejně jako v případě chráněné kompenzační sekce. Princip funkce lze jednoduše pochopit z Obr. 3-7.

Obvod kompenzačního filtru (je stejný jako na Obr. 3-6) je schopen fungovat ve velmi širokém pásmu kmitočtů. Při jisté frekvenci zvané rezonanční frekvence f_r , nastane rezonance. To znamená, že se úplně vyruší kapacitní a induktivní reaktance a tím je celková impedance obvodu určena pouze odporem. Při rezonanci je tedy proud pouze činné povahy a tím dochází jak k filtraci harmonických, tak ke zlepšení účinníku. Dochází k odsávání harmonických.

Provedení spočívá v několika paralelně připojených kompenzačních filtrů, které jsou naladěny na tzv. charakteristické harmonické a ty jsou řízené regulátorem. Kompenzační filtry se standardně nevyrábí, a proto se musí každý kompenzační člen navrhnout a vyrobit pro konkrétní požadavky filtrace. Používají se v sítích, kde je rušení vyššími harmonickými značně vysoké a kde je potřeba eliminovat harmonické generované spotřebiči, jejichž výkon je v síti dominantní.

Filtrační tlumivky bývají v porovnání s ochrannými značně předimenzované a dražší. Lze totiž jen velmi těžce předpovědět velikost proudu, který bude filtr odsávat. Z toho důvodu je použití těchto tlumivek dosti problematické.

Jsou ještě také tlumivky dekompenzační, které se používají tam, kde je nadbytek kapacitního výkonu, k dekompenzaci.

3.3 Rozdělení podle druhu regulace

V této části budou představeny základní druhy řízení kompenzace jalového výkonu. Je to již v dnešní době neoddělitelná část kompenzačních zařízení a má velký vliv na celkovou kvalitu kompenzace.

3.3.1 Stupňovitá regulace

U tohoto druhu kompenzace je nejdůležitější otázkou volba počtu a velikosti stupňů. To platí jak pro kontaktní tak i bezkontaktní kompenzátory jak na hladinách VN a NN. To jaký počet stupňů zvolit závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na hodnotě účinníku, na který se má kompenzovat. Pro stupně se stejným kompenzačním výkonem musí být v ideálním stavu splněn vztah:

$$tg\varphi \geq \frac{Q_L - N \cdot Q_{Cl}}{P} \quad (-; \text{VAr}, -, \text{VAr}, W) \quad (3.16)$$

kde Q_L je jalový výkon zátěže při činném výkonu P , Q_{Cl} je jalový výkon jednoho stupně a N je počet stupňů

Ze vztahu (3.16) je možné odvodit vztah pro stanovení počtu kompenzačních stupňů:

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot tg\varphi}{Q_{Cl}} \quad (-; \text{VAr}, W, -, \text{VAr}) \quad (3.17)$$

Stupňovitou regulaci lze ještě rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

- **Kontaktní**

Připínání kompenzátorů se děje podle pokynů regulátoru, který tyto kompenzátory připojuje přímo na síť, která má být kompenzována. Tyto kompenzátory s klasickými výkonovými kondenzátory se uplatňují v sítích s nízkým rušením vyššími harmonickým a v sítích kde nejsou vysoké nároky na rychlost kompenzace.

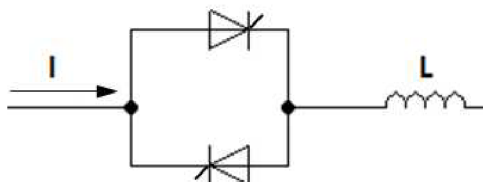
V případech připínání klasickými stykači je zde velké riziko vzniku přechodových jevů, kdy proudové rázy mohou dosahovat až stonásobku. Další nevýhodou je vznik rušivých jevů vysílaných do sítě, které jsou způsobeny nesynchronním spínáním. To může být do jisté míry vylepšeno předřazením ochranných tlumivek a použitím moderních spínacích kontaktních prvků.

- **Bezkontaktní**

Používají se v aplikacích, kde je nutná rychlá kompenzace, kde kompenzátory musejí být schopny rychle sledovat změny jalového výkonu kompenzovaného zařízení. Zde je nutné používat bezkontaktní spínače a také rychlejší regulátor s rychlejším algoritmem. Kondenzátorům se obvykle předřazují ochranné tlumivky.

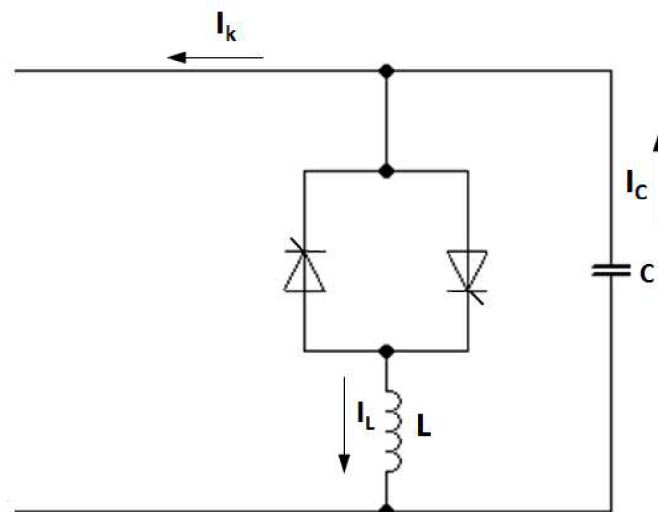
3.3.2 Plynulé řízení- pasivní (s dekompenzačními členy)

Plynulé řízení jalového výkonu je možné za pomoci řízení proudu procházejícího tlumivkou. S použitím fázově řízeného tyristorového spínače v antiparalelním zapojení lze dostat zapojení této regulace (Obr. 3-8). Tento obvod umožňuje plynulou regulaci proudu tlumivky L v rozmezí od nulové hodnoty až na hodnotu maximální určenou impedancí tlumivky. Velikost proudu tlumivkou závisí okamžiků spínání tyristorů.



Obr. 3-8 Obvod s fázovým řízením proudu tlumivkou

V případě potřeby řídit kapacitní proud, stačí paralelně k dekompenzačnímu členu připojit kondenzátor, obvod je na Obr. 3-9.



Obr. 3-9 Obvod plynule řízeného kompenzátoru

Je vidět, že výsledný proud ke kompenzaci se rovná:

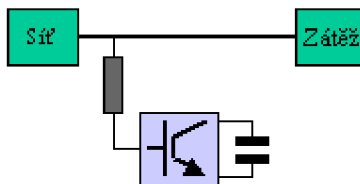
$$I_k = I_C - I_L \quad (\text{A; A, A}) \quad (3.18)$$

3.3.3 Plynulé řízení- aktivní

Aktivní filtry si lze představit generátory, které lze k síti připojit buď paralelně nebo sériově. Ty jsou vhodným regulátorem řízeny tak, aby byla vždy zvolena vhodná kompenzace (ta musí sledovat změny dynamicky se měnícího jalového výkonu v síti) k vykompenzování nežádoucích harmonických. Podle typu zapojení filtru lze zlepšovat proud, napětí nebo obojí. Filtry lze dělit na paralelní, sériové a kombinované.

- **Paralelní aktivní filtr**

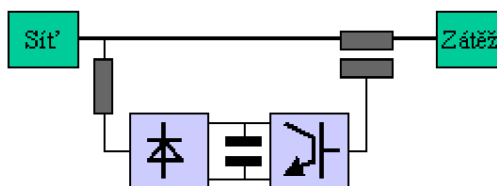
Tento filtr je tvořen řízeným generátorem proudu zapojeným paralelně k síti. Je schopen odstraňovat nežádoucí harmonické proudy a to tím, že generuje stejné složky opačného směru a přivádí je do sítě. Výsledný proud je tudíž zbaven harmonických složek a tím je provedena filtrace proudu odebíraného ze sítě (také je upraveno napětí).



Obr. 3-10 Paralelní (derivační) filtr [21]

- **Sériový aktivní filtr**

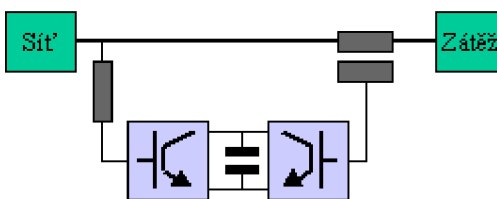
Tento filtr je tvořen řízeným generátorem napětí, který je připojen mezi svorky sítě a zátěže. Tímto filtrem lze vylepšovat napětí a to způsobem popsaným u paralelního filtru. V případě výpadku napájecího napětí je schopen dodávat energii (pokud je napájen nezávislým zdrojem).



Obr. 3-11 Sériový filtr [21]

- **Kombinované (sério-paralelní) aktivní filtry**

V poslední době stále častěji používané. Jde o kombinaci funkcí sériového a paralelního aktivního filtru.



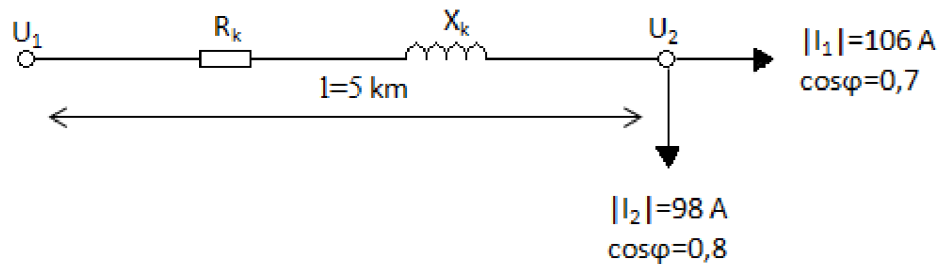
Obr. 3-12 Kombinovaný filtr [21]

4 PŘÍKLAD NÁVRHU KOMPENZACE

Na příkladu bude ukázáno, jak se vlivem kompenzace změní poměry v síti a stanovena velikost výkonu kompenzační baterie, nutné k dosažení požadovaného účinníku.

4.1 Zadání příkladu

Jedná se o třífázové vedení. Každá fáze je zatížena dvěma odběry. Napětí na začátku vedení je 6kV. Rezistance vedení je 0,156 Ω/km a reaktance vedení je 0,34 Ω/km. Celková délka vedení 5 km. Situace je znázorněna na Obr. 4-1. Úkolem bude určit:



Obr. 4-1 Schéma zadání

- Napětí na konci vedení
- Jednofázový proud odebíraný kompenzační baterií potřebný k vykompenzování na účinník 0,96
- Zmenšení úbytku napětí díky kompenzace
- Zmenšení ztrát vlivem kompenzace
- Velikost výkonu kompenzační baterie

4.2 Řešení příkladu

Stanovení jednotlivých odběrových proudů:

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= |I_1| \cdot \cos\varphi - j \cdot |I_1| \cdot \sin\varphi = 106 \cdot 0,7 - j \cdot 106 \cdot 0,714 = (74,2 - j75,7)A \\ \bar{I}_2 &= |I_2| \cdot \cos\varphi - j \cdot |I_2| \cdot \sin\varphi = 98 \cdot 0,8 - j \cdot 98 \cdot 0,6 = (78,4 - j58,8)A\end{aligned}\quad (4.1)$$

Stanovení celkového odběrového proudu:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = (74,2 - j75,7) + (78,4 - j58,8) = (152,6 - j134,5)A \quad (4.2)$$

- Napětí na konci vedení (zanedbáváme imaginární část úbytku napětí)

$$\Delta U = R_K \cdot l \cdot I_{\check{c}} + X_K \cdot l \cdot I_j$$

$$\frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = R_K \cdot l \cdot (I_{\check{c}1} + I_{\check{c}2}) + X_K \cdot l \cdot (I_{j1} + I_{j2})$$

$$U_2 = U_1 - (R_K \cdot l \cdot (I_{\check{c}1} + I_{\check{c}2}) + X_K \cdot l \cdot (I_{j1} + I_{j2})) \cdot \sqrt{3} \quad (4.3)$$

$$U_2 = 6000 - (0,156 \cdot 5 \cdot (74,2 + 78,4) + 0,34 \cdot 5 \cdot (75,7 + 58,8)) \cdot \sqrt{3}$$

$$U_2 = 5,4kV$$

b) Odebíraný proud kompenzační baterií potřebný k vykompenzování na účinník 0,96

$$\bar{I} = (152,6 - j134,5)A$$

Určení $tg \varphi$ (před kompenzací):

$$tg \varphi = \frac{I_j}{I_{\check{c}}} = \frac{134,5}{152,6} = 0,881 \Rightarrow \cos \varphi = 0,75 \quad (4.4)$$

Určení $tg \varphi_k$ (po kompenzaci):

$$\cos \varphi = 0,96 \Rightarrow tg \varphi_k = 0,292 \quad (4.5)$$

Proud po kompenzaci (předpokládá se, že se jedná o ideální kompenzaci a tudíž kompenzace nemá vliv na činnou složku proudu, tzn. činný proud po kompenzaci $I_{\check{c}k}$ je roven činnému výkonu před kompenzací $I_{\check{c}}$):

$$tg \varphi = \frac{I_j}{I_{\check{c}}} \quad a \quad tg \varphi_k = \frac{I_{jk}}{I_{\check{c}k}} \Rightarrow I_{jk} = I_j \cdot \frac{tg \varphi_k}{tg \varphi} = 134,5 \cdot \frac{0,292}{0,881} = 44,6A$$

$$\bar{I}_k = I_{\check{c}k} + I_{jk} = (152,6 - j44,6)A \quad (4.6)$$

Proud odebíraný kompenzační baterií:

$$I_C = I_j - I_{jk} = 134,5 - 44,58 = 89,9A$$

$$\bar{I}_C = j89,9A \quad (4.7)$$

c) Zmenšení úbytku napětí vlivem kompenzace

Napětí na konci vedení po kompenzaci:

$$U_{2k} = U_1 - (R_K \cdot l \cdot I_{\check{c}k} + X_K \cdot l \cdot I_{jk}) \cdot \sqrt{3} \quad (4.8)$$

$$U_{2k} = 6000 - (0,156 \cdot 5 \cdot 152,6 + 0,34 \cdot 5 \cdot 44,6) \cdot \sqrt{3}$$

$$U_{2k} = 5,6kV$$

Zmenšení úbytku:

$$\Delta u = \Delta U - \Delta U_k = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} - \frac{U_1 - U_{2k}}{\sqrt{3}} = \frac{6000 - 5400}{\sqrt{3}} - \frac{6000 - 5600}{\sqrt{3}} = 115,5V$$

$$\Delta u = 115,5V \quad (4.9)$$

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta u}{\Delta U} \cdot 100\% = \frac{115,5}{346,4} \cdot 100\% = 33\%$$

Vlivem kompenzace došlo ke snížení úbytku napětí o 33%.

d) Zmenšení ztrát vlivem kompenzace:

$$\Delta p = \Delta P - \Delta P_k = 3 \cdot R_k \cdot l \cdot |I|^2 - 3 \cdot R_k \cdot l \cdot |I_k|^2$$

$$\Delta p = 3 \cdot 0,156 \cdot 5 \cdot (152,6^2 + 134,5^2) - 3 \cdot 0,156 \cdot 5 \cdot (152,6^2 + 44,6^2) = 96822 - 59146$$

$$\Delta p = 37,7kW \quad (4.10)$$

$$\Delta p_{\%} = \frac{37700}{96822} \cdot 100\% = 39\%$$

Vlivem kompenzace došlo ke snížení ztrát o 39%.

e) Velikost výkonu kondenzační baterie

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_{2k} \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 5600 \cdot 89,9$$

$$Q_C = 872 \text{ kVAr}$$

(4.9)

4.3 Zhodnocení

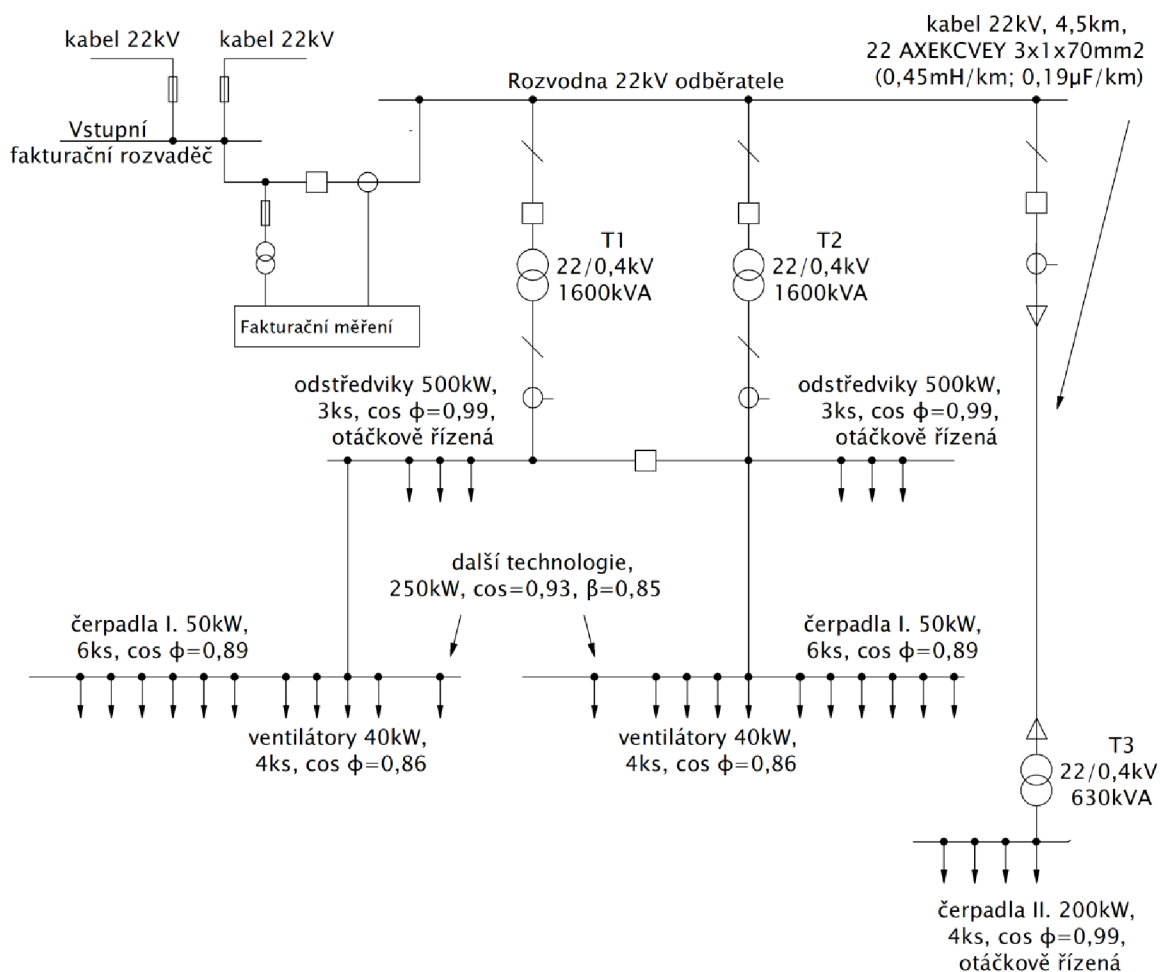
Byly vypočteny všechny body zadání a z některých výsledků je jasně vidět, že použití kompenzace je výhodné. Např. ze zmenšení úbytku díky kompenzaci je vidět, že došlo ke snížení o 33%. To samé v případě zmenšení ztrát, zde došlo ke snížení dokonce o 39%. Vypočítaná byla také velikost výkonu kondenzátoru potřebného pro vykompenzování na požadovanou hodnotu účinníku, která činí 872kVAr.

5 NÁVRH KOMPENZACE PRO PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE

V této kapitole se budeme zabývat praktickou částí této bakalářské práce. Úkolem je navrhnout kompenzaci pro průmyslový areál chemické výroby.

5.1 Zadání

Areál průmyslové výroby je zobrazen na Obr. 5-1. Je zde vidět uspořádání a skladba spotřebičů tohoto areálu. Jedná se o síť s jedním odběrným (fakturačním) místem a spotřebou jednak v jednom velkém objektu, ale i ve vzdálené vysunuté trafostanici.



Obr. 5-1 Schéma zadání

Velký objekt je vybaven dvojicí totožných transformátorů T1, T2 z nichž vždy pracuje maximálně jeden. Oba transformátory mají stejný odběr a to jak po stránce velikosti výkonu tak i skladby provozovaných zařízení. Každý z transformátorů napájí tři odstředivky (každou o výkonu 500kW), z nichž jsou vždy maximálně dvě v provozu. Tyto odstředivky jsou poháněny střídavým regulovaným pohonem, který je složen ze statického měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem a asynchronního motoru. Pohony odstředivek jsou generovány harmonické proudy. Generované harmonické jsou uvedeny v

Tab. 5-1. Dále oba transformátory napájí šest čerpadel I (každé o výkonu 50kW), z nichž vždy maximálně čtyři jsou v provozu a čtyři ventilátory (každý o výkonu 40kW), z nichž vždy maximálně dva jsou v provozu. Jak čerpadla I tak i ventilátory jsou napájeny asynchronním motorem přímo připojeným k síti. Ještě napájí také další technologii složenou ze spotřebičů menších výkonů jako asynchronní motory, ruční nářadí, svářečky atd.

Tab. 5-1 Generované harmonické

Řád harmonické n [-]	Kmitočet [Hz]	Obsah harmonických v proudu [%]
5	250	28
7	350	20
11	550	15
13	650	10

Vysunutý provoz je napojen z rozvodny 4,5km dlouhým VN kabelem 22kV (přesněji kabelem 22 AXEKCVEY 3x1x70mm² s parametry $L_{kab}=0,45\text{mH/km}$ a $C_{kab}=0,19\mu\text{F/km}$), na trafostanici T3. Tato trafostanice napájí čerpací stanici vody se čtyřmi čerpadly II, z nichž vždy maximálně dvě jsou v provozu. Čerpací stanice je poháněna stejným pohonem jako v případě odstředivek. Generují také stejné harmonické uvedené v

Tab. 5-1.

V průmyslovém areálu se také nachází rozsáhlá osvětlovací soustava, která je nyní v rekonstrukci. Staré, nevyhovující svítidla jsou nahrazována novějšími svítidly s elektronickým předřadníkem.

Problémem je nedodržování předepsaného účinníku odběru při poruchových stavech, při stavech mimořádných, kdy např. některé spotřebiče musely být dočasně odstaveny, ale i při stavech normálních, např. kdy je v provozu jen transformátor T3.

Úkolem je navrhnout kompenzaci, která bude řešit výše uvedené problémy, respektovat skladbu a charakter spotřebičů a která bude schopna reagovat na jakoukoli situaci provozu.

5.2 Rozbor zadání

Provozovatele technologie trápí hlavně problémy nedokompenzování a překompenzování při poruchových, mimořádných, ale i normálních stavech a s tím spojené vyšší platby za elektřinu. K tomu, aby došlo k odstranění problému nedokompenzování, bude nutné použít kompenzační rozvaděč s regulovaným výkonem pro transformátory T1 a T2, který bude schopen měnit dodávku kapacitního výkonu spotřebičům na základě jejich aktuální spotřeby. Bude použita stupňovitá regulace. Kompenzace bude, z ekonomického hlediska, umístěna na hladině NN 0,4kV. Současně také bude zapotřebí se vypořádat s kapacitním výkonem vznikajícím na 4,5km dlouhém VN kabelu. Tento kapacitní výkon kabelu je buďto možné dekompenzovat dekompenzačním rozvaděčem nebo je možné využít tento kapacitní výkon pro kompenzaci spotřeby za transformátory T1, T2. Nabízí se nám tedy dvě možné varianty.

Varianta č. 1 bude samostatné řešení pro hlavní budovu a vysunutou trafostanici. Bude vykompenzován odebíraný jalový výkon za transformátory T1, T2 a dekompenzován kapacitní výkon kabelu.

Varianta č. 2 bude řešena jako celek, bude snaha využít kapacitní výkon kabelu pro kompenzování za transformátory T1, T2. Tato varianta ovšem bude moci být použita pouze za předpokladu, že provoz bude umožňovat vždy provozovat současně T1 a T3 nebo T2 a T3.

Kvůli výskytu harmonických produkovaných pohony odstředivek, které jsou nebezpečné z hlediska přetěžování kondenzátorů, budou muset být kompenzační rozvaděče hrazené. Základním parametrem hrazené kompenzace je činitel zatlumení p . Volba hodnoty činitele zatlumení se volí s ohledem na nejnižší harmonickou vyskytující se v síti a s ohledem na frekvenci, na které je v daném místě vysílán signál hromadného dálkového ovládání HDO. Nejnižší harmonická je pátá, která odpovídá frekvenci 250Hz. Signál HDO je vysílán na frekvenci 216 2/3 Hz. Z toho důvodu bude zvolen činitel zatlumení na hodnotu $p=7\%$.

Osvětlovací soustava nebude brána při výpočtech v úvahu, neboť je zrovna v rekonstrukci. Staré svítidla jsou vyměňovány za nové s elektronickým předřadníkem a účinníkem blízkým jedné.

V tabulce Tab. 5-2 jsou vypočtené jalové výkony Q_L odebírané spotřebiči. V případě spotřebičů s účinníkem 0,99 je zanedbán jalový výkon. Je zde také vypočten kapacitní jalový výkon Q_C vznikající na 4,5 dlouhém VN kabelu. Z těchto hodnot se bude vycházet při stanovování potřebné kompenzačního a dekompenzačního výkonu.

Tab. 5-2 Výkonová bilance

Zařízení	Ks [-]/ délka [km]	Současně v provozu	P [kW]	cosφ	Q _L [kVAr]	Q _C [kVAr]
odstředivka	6	2	1000	0,99	0	-
čerpadlo I.	12	4	200	0,89	102	-
ventilátory	8	2	80	0,86	47,5	-
technologie	1	0,85	212,5	0,93	84	-
čerpadlo II.	4	2	400	0,99	0	-
kabel 22kV	4,5	4,5km	-	-	-	129,9
suma	-	-	1892,5	-	233,5	129,9

Příklady výpočtů:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{200}{0,89} = 224,7kVA \quad (5.1)$$

$$Q_L = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{224,7^2 - 200^2} = 102kVAr \quad (5.2)$$

$$Q_C = U_S^2 \cdot \omega \cdot C_{kab} \cdot l = 22000^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5 = 129,9kVAr \quad (5.3)$$

5.3 Návrh- varianta č. 1

Jak už bylo řečeno v rozboru zadání, tato varianta bude řešit jak hlavní budovu tak vysunutou trafostanici jako samostatné celky.

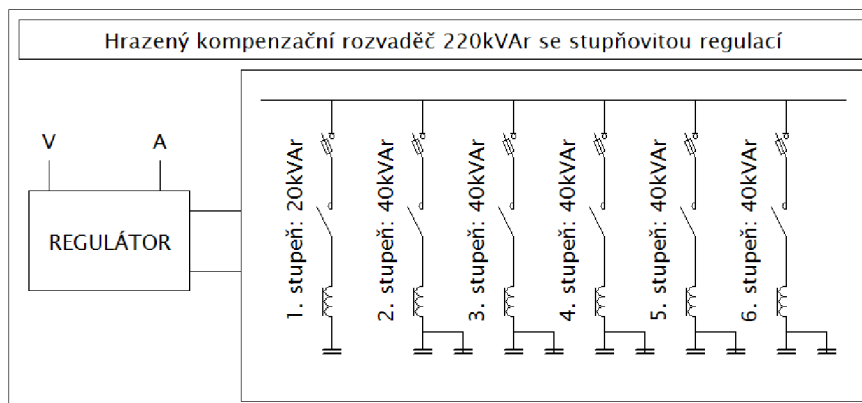
5.3.1 Návrh hrazeného kompenzačního rozvaděče pro transformátor T1, T2

Bude vykompenzováno 230kVAr jalového výkonu za trafostanicemi T1, T2. To bude řešeno kompenzačním rozvaděčem 220kVAr se stupňovitou regulací (nastavenou na účinník 0,98), se šesti stupni. Instalovaný kompenzační výkon bude tedy o 10kVAr menší než je deficit jalového výkonu, což je zanedbatelná odchylka. První stupeň regulace bude 20kVAr, zbylých pět stupňů bude 40kVAr. Neboť je to ekonomicky výhodnější, budou 40kVAr stupně řešeny jako 2x20kVAr. Volbě velikosti a počtu jednotlivých stupňů v praxi většinou předchází měření pomocí síťových analyzátorů, které nám jsou schopny poskytnout diagram zatížení. Z diagramu zatížení se poté stanoví jednotlivé stupně. Kompenzační rozvaděč bude umístěn na hladině NN 0,4kV. Kompenzace bude řešena jako hrazená s činitelem zacívkování 7%.

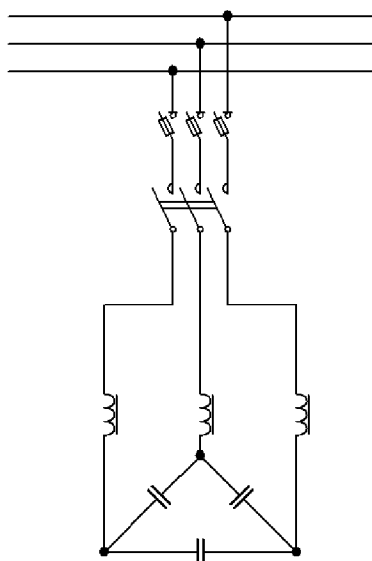
Každý jednotlivý stupeň hrazeného kompenzačního rozvaděče bude složen z:

- Kondenzátoru
- Ochranné (hradící) tlumivky
- Stykače
- Pojistkového odpínače

Celý kompenzační rozvaděč bude ještě vybaven regulátorem jalového výkonu a usazen v rozvaděčové skříni viz Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Kompenzační rozvaděč pro transformátor T1, T2



Obr. 5-3 Zapojení kompenzačního stupně

- **Výběr vhodného kondenzátoru 20kVAr**

Při výběru vhodného kondenzátoru je nutné brát v úvahu vliv předřazené tlumivky, která změní některé parametry důležité pro správný výběr kondenzátoru. Vlivem předřazené tlumivky dojde ke zvýšení napětí na kondenzátoru na hodnotu U_C , které bude větší než napětí sítě U_S a na kterou musí být daný kondenzátor konstruován. Jmenovité napětí udávané výrobcem je sdružené a proto, hledané napětí bude taky sdružené. Skutečná hodnota napětí U_C tedy je:

$$U_C = \frac{U_S}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430V \quad (5.4)$$

Je vidět, že kondenzátory na jmenovitou hodnotu napětí 400V nebude možné použít. S velkým rozvojem nelineárních spotřebičů začali i výrobci kondenzátorů přizpůsobovat své výrobky dnešním požadavkům a proto dnes, lze již běžně sehnat kondenzátory se jmenovitou hodnotou napětí 440V.

Další parametr kondenzátoru je proud. Ten je výrobcem udáván jako proud fázový, tudíž I :

$$I = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 28,87A \quad (5.5)$$

Pomocí napětí na kondenzátoru U_C a proudu tekoucího kondenzátorem I bude vypočtena kapacita kondenzátoru C . Všechny kondenzátory na hladině NN, jsou v zapojení do trojúhelníka. Je potřeba si tedy uvědomit, že proud v zapojení do trojúhelníka bude přes kondenzátor $\sqrt{3}$ krát menší než proud fázový (za předpokladu zachování výkonu) a daná kapacita C bude:

$$C = \frac{I}{U_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{28,87}{430 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 123 \cdot 10^{-4}F = 123\mu F \quad (5.6)$$

Pomocí všech výše vypočtených parametrů bude vybrán vhodný kondenzátor. Hledaným parametrům odpovídá nejlépe kondenzátor od firmy VISHAY, který přesně odpovídá vypočteným hodnotám, viz tabulka výrobce Tab. 5-3. Pouze v případě velikosti výkonu je hodnota jiná a to 22,5kVAr, což by ovšem mělo být v pořádku, neboť vlivem hrazené kompenzace dojde ke snížení skutečného výkonu kondenzátoru.

Tab. 5-3 Katalog výrobce VISHAY: kondenzátory NN [12]

RATED VOLTAGE 440 V, 50 Hz, DELTA CONNECTION, UL/ULC							
CAN BE USED ALSO FOR 415 V							
TYPE	ARTICLE NO. (1)	OUTPUT kvar 440 V	OUTPUT kvar 415 V	CAP. μF	CURRENT A 440 V/415 V	DIMENSIONS $\varnothing \times H$ mm	WEIGHT kg
PhMKP440.3.15.00-84	5341-44411-xx	15	13.3	3 x 82.2	19.7/18.6	84.4 x 190	1.3
PhMKP440.3.16.90-84	5341-44412-xx	16.9	15	3 x 92.6	22.2/20.9	84.4 x 190	1.3
PhMKP440.3.18.80-84	5341-44413-xx	18.8	16.7	3 x 103.0	24.7/23.3	84.4 x 265	1.7
PhMKP440.3.20.00-84	5341-44414-xx	20	17.8	3 x 109.6	26.2/24.8	84.4 x 265	1.7
PhMKP440.3.22.50-84	5341-44415-xx	22.5	20	3 x 123.3	29.5/27.8	84.4 x 265	1.7

To, zda vybraný kondenzátor vyhovuje z hlediska požadovaného výkonu, se ověří následujícím výpočtem:

$$Q_{LC} = \frac{U_S^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_{CN}^2}{Q_N}\right)} = \frac{400^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{440^2}{22500}\right)} = 19994,7 \text{ VAr} = 20 \text{ kVAr} \quad (5.7)$$

kde U_{CN} je jmenovité napětí kondenzátoru a Q_N jeho jmenovitý výkon.

Je vidět, že kapacitní výkon chráněné sekce Q_{LC} vyhovuje požadovanému kompenzačnímu výkonu.

- **Výběr vhodného kondenzátoru 40kVAr**

Jak již bylo zmíněno tak z ekonomických důvodů budou použity ve stupních 40kVAr dva paralelně řazené kondenzátory o výkonu 20kVAr. Tím pádem již není potřeba počítat parametry dalších kondenzátorů, použijí se ty samé jako ve stupni 20kVAr.

To jak vypadají kondenzátory určené na hladinu nízkého napětí, je ukázáno na Obr. 5-4.



Obr. 5-4 Výrobce VISHAY: Kondenzátory NN [12]

- **Výběr vhodné ochranné tlumivky pro stupeň 20kVAr**

Pro výpočet parametrů hradící tlumivky je nutné znát reaktanci kondenzátoru X_C . Je třeba mít na paměti zapojení chráněné kompenzační sekce, viz Obr. 5-3, z čehož je vidět, že velikost hledané indukčnosti bude pro případ zapojení do hvězdy. Proto při výpočtu reaktance kondenzátoru je potřeba počítat s hodnotou kapacity C třikrát větší. Reaktance kondenzátoru je:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 123 \cdot 10^{-6}} = 8,6 \Omega \quad (5.8)$$

Ze znalosti reaktance kondenzátoru a činitele zahrazení p se vypočte reaktance hradící tlumivky X_L a následně indukčnost tlumivky L :

$$X_L = X_C \cdot p = 8,6 \cdot 0,07 = 0,602 \Omega \quad (5.9)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,602}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,92 \cdot 10^{-3} = 1,92 \text{mH} \quad (5.10)$$

Dalším potřebným parametrem je proud celé kompenzační sekce I_{LC} :

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 28,87 \text{A} \quad (5.11)$$

Na základě vypočtených parametrů bude vybrána vhodná tlumivka. Hledaným parametřům odpovídá nejlépe tlumivka od výrobce ELCOM, viz Tab. 5-4 (červený rámeček).

Tab. 5-4 Katalog výrobce ELCOM: Ochranné tlumivky [13]

Typové označení tlumivky EL-3L	22.400/440- e/7 22.400/440- f/7	45.400/440- a/7 45.400/440- f/7
Jmenovitý výkon kondenzátoru [kvar]	22,50	45,00
Kompenzační výkon sekce [kvar]	20,00	39,99
Jmenovité síťové napětí [V]	400	400
Rezonanční kmitočet [HZ]	189	189
Činitel ztlumení	7 %	7 %
Jmenovitý proud tlumivky [A]	28,9	57,7
Maximální efektní proud tlumivky [A]	34,11	68,22
Jmenovitá indukčnost tlumivky [mH]	1,92	0,96
Ztráty tlumivky [W]	60	100
Hmotnost [kg]	22,5	31,0

- **Výběr vhodné ochranné tlumivky pro stupeň 40kVAr**

Stupeň 40kVAr bude řešen dvojicí paralelně připojených kondenzátorů 20kVAr (viz Obr. 5-2). V případě paralelního spojení kondenzátorů se jejich kapacita sčítá a proto, výsledná reaktance kondenzátoru v tomto případě bude:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 123 \cdot 10^{-6}} = 4,3 \Omega \quad (5.12)$$

Nyní se stejně jako v předchozím výpočtu tlumivky, vypočte potřebná indukčnost tlumivky, její proud a následně se v katalogu výrobce vybere vhodná tlumivka (viz Tab. 5-4, zelený rámeček):

$$X_L = X_C \cdot p = 4,3 \cdot 0,07 = 0,301 \Omega \quad (5.13)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,301}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 9,58 \cdot 10^{-4} = 0,96 \text{mH} \quad (5.14)$$

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 57,74 \text{A} \quad (5.15)$$

- **Výběr vhodných stykačů**

Pro spínání jednotlivých stupňů bude použito stykačů od rakouské firmy BENEDICT. Tato firma nabízí stykače jak pro spínání samotných kondenzátorů, tak pro spínání kondenzátorů s předřazenými tlumivkami. Stykače pro spínání samotných kondenzátorů jsou vybaveny pomocnými kontakty s odpory, omezujícími velké počáteční nabíjecí proudy. Naopak stykače určené pro spínání hrazené kompenzace, již tyto pomocné kontakty nemají. V případě hrazené kompenzace totiž předřazené tlumivky omezují nabíjecí proudy a proto, již nejsou pomocné kontakty s odpory nutně potřeba. To, zda opravdu není nutné používat stykače s pomocnými kontakty, v případě hrazené kompenzace, je stále velmi diskutované téma, na které není jednoznačná odpověď. Stykače s pomocnými kontakty jsou samozřejmě dražší, na druhou stranu ale prodlužují život kondenzátorů a velmi značně přispívají k jejich ochraně. V našem v případě není kladen důraz na co nejmenší cenu a proto, budou použity stykače s pomocnými kontakty.

Pro výběr vhodných stykačů je nutné znát velikost spínaného výkonu, velikost proudu a napětí. Pro případ prvního kompenzačního stupně jsou požadované parametry: spínaný výkon 20kVAr, proud 28,89A a napětí 440V. Pro případ zbylých pěti kompenzačních stupňů jsou požadované parametry: spínaný výkon 40kVAr; proud 57,74A a napětí 440V. Tyto hodnoty vychází z předešlých výpočtů. Z katalogu výrobce nyní vybereme vhodné stykače, viz Tab. 5-5.

Tab. 5-5 Katalog výrobce BENEDICT: stykače [14]

Capacitor Switching Contactors									
Data according to IEC 947-4-1, EN 60947-4-1, VDE 0660									
Main Contacts	Type	K3-18NK	K3-24K	K3-32K	K3-50K	K3-62K	K3-74K	K3-90K	K3-115K
Utilization category AC6b									
Switching of non-reactive and reactive 3-phase capacitor banks									
Ambient temperature $\leq 50^{\circ}\text{C}$									
Rated operational current I_e	690V A	0-18	14-28	14-36	30-48	30-72	30-108 ¹⁾	50-115	50-144 ²⁾
Rated operational power	220-240V kVAr	0-7	5-11	5-14	12-20	12-28	12-33	20-45	20-55 ²⁾
	380-400V kVAr	0-12,5	10-20	10-25	20-33,3	20-50	20-75 ¹⁾	33-80	33-100 ²⁾
	415-440V kVAr	0-13	10,5-22	10,5-27	23-36	23-53	23-75 ¹⁾	36-82	36-103 ²⁾
Ambient temperature $\leq 60^{\circ}\text{C}$									
Rated operational current I_e	690V A	0-18	14-28	14-36	30-48	30-72	30-87	50-108	50-130 ²⁾
Rated operational power	220-240V kVAr	0-7	5-11	5-14	12-20	12-28	12-30	20-40	20-50 ²⁾
	380-400V kVAr	0-12,5	10-20	10-25	20-33,3	20-50	20-60	33-75	33-90 ²⁾
	415-440V kVAr	0-13	10,5-22	10,5-27	23-36	23-53	23-64	36-77	36-93 ²⁾

Jak je vidět v Tab. 5-5, pro stupeň 20kVAr je vybrán stykač s typovým označením K3-32K. Jeho jmenovitý proud je v rozmezí od 14A do 36A a jmenovitý spínaný výkon v rozmezí od 10,5kVAr do 27kVAr. Pro stupeň 40kVAr je vybrán stykač s označením K3-62K. Jeho jmenovitý proud je v rozmezí od 30A do 72A a jmenovitý spínaný výkon v rozmezí od 23kVAr do 53kVAr. To jak vypadají stykače od firmy BENEDICT je možné vidět na Obr. 5-5, kde je ukázán stykač K3-62k.



Obr. 5-5 Výrobce BENEDICT Stykač K3-62K [14]

Z důvodu hrazení kompenzace je nutné počítat s poměrně velkým odvodem tepla z tlumivek. Je proto nebytné vědět pro jakou teplotu okolí jsou hodnoty stykačů určeny. Jak lze vidět z Tab. 5-5 všechny výše uvedené hodnoty stykačů platí jak pro teplotu okolí 50°C tak 60°C. Oba stykače by tedy měli bez problému vyhovět našim požadavkům.

V případě, že by bylo možné zajistit teplotu okolí nižší než 40°C, šli by použít stykače z nižších řad, viz Tab. 5-6, čímž by došlo k ušetření peněz. Současně by to ovšem znamenalo nejspíš nutnost nainstalovat nucenou ventilaci a s tím spojené vyšší náklady. Proto budou ponechány již vybrané stykače.

Tab. 5-6 Katalog výrobce BENEDICT: stykače (teplota okolí 40°C, vhodné pojistky) [14]

Contactors													
Data according to IEC 947-4-1, EN 60947-4-1, VDE 0660													
Main Contacts	Type	K3-10	K3-14	K3-18	K3-22	K3-24	K3-32	K3-40	K3-50	K3-62	K3-74	K3-90	K3-115
Rated insulation voltage U_i ¹⁾	V AC	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	1000	1000
Rated operational current $I_n (=I_m)$ at 40°C, open 690V	A	25	25	32	32	50	65	80	110	120	130	160	200
Short circuit protection Coordination-type "1" acc. to IEC 947-4-1 Contact welding without hazard of persons													
fuse size	from gL (gG) A	35	35	35	35	50	63	63	80	125	160	160	160
	to gL (gG) A	63	63	63	63	80	100	100	160	160	200	200	250

V další části budou vybírány vhodné pojistkové odpínače a nožové pojistky. Pro volbu vhodných pojistek bude možné využít, na základě již vybraných stykačů, opět katalog výrobce BENEDICT.

- **Výběr vhodných pojistkových odpínačů a pojistek**

Jak již bylo předesláno v části o výběru stykačů, bude možné pro zjištění vhodných nožových pojistek, které budou umístěny v pojistkových odpínačích, použít katalog výrobce BENEDICT. Podle již zvolených stykačů zjistíme v Tab. 5-6 vhodné velikosti pojistek. Jak lze

vidět tak pro námi vybraný stykač K3-32 je doporučena pojistka typu gL (gG) 63A-100A. Pro stykač K3-62 potom pojistka gl (gG) 125-160A.

Nožové pojistky a pojistkové odpínače budou vybrány od české firmy OEZ. Na základě znalosti potřebných pojistek z katalogu firmy BENEDICT byli důkladně projity katalogy firmy OEZ. Ze všech možných variant se jako nejlepší varianta jeví vybrat pojistkové vložky typu PNA o velikosti pojistkových spodků 000 a k nim vybrat řadový pojistkový odpínač typu FHN o velikosti 000 a proudu do 160A.

Pojistkové vložky jsou vybrány z katalogu, viz Tab. 5-7 a pojistkový odpínač vybrán z katalogu viz Tab. 5-8.

Tab. 5-7 Katalog výrobce OEZ: pojistkové vložky [15]

Nožové pojistkové vložky PNA										
Velikost	I_n [A]	Typ	Charakteristika gG			Charakteristika aM			Balení [ks]	
			Kód výrobku	Ztráty [W]	Hmotnost [kg]	Typ	Kód výrobku	Ztráty [W]		Hmotnost [kg]
000	32	PNA000 32A gG	40482	2,6	0,13	PNA000 32A aM	40497	1,5	0,13	3
	35	PNA000 35A gG	40483	3,39	0,13	-	-	-	-	3
	40	PNA000 40A gG	40484	3,1	0,13	PNA000 40A aM	40498	2	0,13	3
	50	PNA000 50A gG	40485	3,8	0,13	PNA000 50A aM	40499	2,4	0,13	3
	63	PNA000 63A gG	40486	4,6	0,13	PNA000 63A aM	40500	3,3	0,13	3
	80	PNA000 80A gG	40487	5,8	0,13	PNA000 80A aM	40501	4,5	0,13	3
	100	PNA000 100A gG	40488	6,95	0,13	-	-	-	-	3
	125	PNA000 125A gG*	40489	7,2	0,16	-	-	-	-	3
	160	PNA000 160A gG*	40490	9	0,16	-	-	-	-	3

Tab. 5-8 Katalog výrobce OEZ: pojistkový odpínač [16]

Radové pojistkové odpínače do 160 A				
Typ	Kód výrobku	Provedení	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
FH000-1A/T	11899	jednopolový, provedení s třmenovými svorkami pro Cu vodič o průřezu 1,5 ÷ 50 mm ²	0,250	1
FH000-3A/T	12362	třípolový, provedení s třmenovými svorkami pro Cu vodič o průřezu 1,5 ÷ 50 mm ²	0,620	1



Obr. 5-6 Výrobce OEZ: pojistkový odpínač FH000 a pojistková vložka PNA000 [16] [15]

- **Výběr vhodného regulátoru jalového výkonu**

Regulátory jalového výkonu jsou přístroje, které řídí kompenzaci jalového výkonu pomocí připínání a odpínání jednotlivých stupňů. Svými reléovými výstupy ovládají stykače. Jejich snahou je měnit velikost jalového výkonu v síti tak, aby v každém okamžik byl dodržen požadovaný účinník. V praxi to znamená, že se snaží regulátor udržet vektor proudu v dovolených mezích v tzv. regulačním pásmu.

Pro náš případ bude použit oblíbený regulátor NOVAR 1106 se šesti reléovými výstupy pro ovládání stykačů (viz Obr. 5-7) od českého výrobce K M B systems, s.r.o.



Obr. 5-7 Výrobce K M B systems, s.r.o.: Regulátor NOVAR 1106 [17]

Tento přístroj je plně automatický. Je vybaven přesným proudovým a napěťovým měřicím obvodem a digitálním zpracováním hodnot. Regulátor se snaží řídit připínání a odpínání jednotlivých stupňů tak, aby bylo požadovaného účinníku dosaženo minimálním počtem operací. Tento regulátor také monitoruje vytížení jednotlivých stupňů a snaží se přednostně spínat ty stupně, které byly nejdéle vypnuty a tím rovnoměrně zatěžovat všechny stupně regulace. Provádí se také neustálá kontrola jednotlivých stupňů. V případě, že regulátor zjistí výpadek nebo změnu parametrů některého ze stupňů, vyřadí dočasně tento stupeň z regulace. Vyřazený stupeň je neustále testován a popřípadě opět uveden do provozu. Přístroj je také schopen analyzovat míru celkového harmonického zkreslení proudu THD a v případě překročení nastavených dovolených mezí, odpojit všechny kompenzační stupně z provozu a tím zabránit jejich zničení. K regulátoru je možné připojit i dekompenzační tlumivky. Mezi hlavní výhody tohoto přístroje patří automatická instalace, kdy si např. sám zjistí velikost spínaných stupňů. Samozřejmostí je také možnost ručního zadání.

- **Výběr vhodné rozvaděčové skříně**

Po konzultaci s firmou ELCOM byla zvolena velikost rozvaděčové skříně 2000x600x600mm (VxŠxH). Vhodná skříň byla nalezena u českého výrobce SPÁLOVSKÝ, viz Tab. 5-9.

Tab. 5-9 Katalog výrobce SPÁLOVSKÝ: rozvaděč STA-N 200606 [18]

• Hlavní montážní rozměry skříní STA-N, STA-NL								
STA-N	A	B	C	D	E×F	G×H	P	Poznámka
200604	1910	510	300	335	370×270	500×300	1	
200605	1910	510	400	435	370×370	500×400	1	
200606	1910	510	500	535	370×470	500×500	2	
200607	1910	510	600	635	370×570	500×600	2	
200608	1910	510	700	735	370×670	500×700	2	

Vybraný rozvaděč má označení STA-N 200606. První dvě číslice v typovém označení znamenají výšku v dm, druhé dvě číslice šířku v dm a poslední dvě číslice hloubku v dm. Rozvaděč splňuje krytí IP55.

5.3.2 Návrh dekompenzačního rozvaděče pro trafostanici T3

Bude dekompenzováno 130kVAr kapacitního jalového výkonu vznikajícího na 4,5km dlouhém VN kabelu. Dekompenzace bude provedena z ekonomických důvodů opět na hladině NN, za transformátorem T3. To bude řešeno dekompenzačním rozvaděčem 135kVAr s napevno připojenými tlumivkami. Instalovaný dekompenzační výkon bude tedy o 5kVAr větší, neboť v případě kapacitního výkonu, musí kvůli způsobu udělování sankcí být dekompenzován veškerý výkon.

- **Výběr vhodných tlumivek**

Celkový výkon dekompenzačního rozvaděče bude činit 135kVAr. To bude řešeno trojicí tlumivek, každé o výkonu $Q_L=45\text{kVAr}$. Rozvaděč bude umístěn na hladině NN. Tudíž budou použity tlumivky se jmenovitým napětím 3 x 400/230V. Tlumivky jsou určeny k zapojení do hvězdy. Pro výběr vhodné tlumivky je potřeba znát proud tlumivky I_L a indukčnost L :

$$I_L = \frac{Q_L}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 64,95\text{A} \quad (5.16)$$

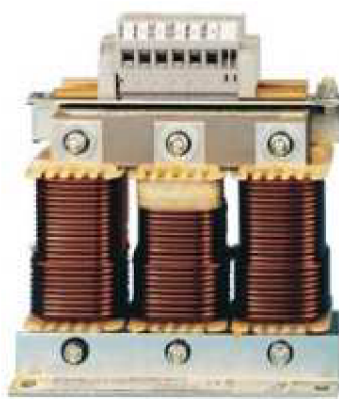
$$X_L = \frac{U_f}{I_L} = \frac{230}{64,95} = 3,54\Omega \quad (5.17)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{3,54}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,01128\text{H} = 11,28\text{mH} \quad (5.18)$$

Hledaným parametrům nejlépe odpovídají dekompenzační tlumivky od firmy KBH ENERGY. Nabízí tlumivky pro použití na hladině napětí 3 x 400/230V, s výkonem 45kVAr, jmenovitým proudem 64,9A a jmenovitou indukčností 34mH (3x11,28mH) viz Tab. 5-10.

Tab. 5-10 Katalog výrobce KBH ENERGY: Dekompenzační tlumivky [19]

Výrobní řady tlumivek DEKOMP					
Jmenovité napětí 3x400/230V, 50 Hz					
Typ tlumivky	Kompenzační výkon [kVAr]	Indukčnost cívky [mH]	Kompenzovaná kapacita [μ F]	Jmenovitý proud [A]	Ztráty tlumivky [W]
DEKOMP 30	30	50,9	597,2	43,3	520
DEKOMP 35	35	43,7	695,6	50,5	530
DEKOMP 40	40	38,2	795,7	57,7	610
DEKOMP 45	45	34	894	64,9	680
DEKOMP 50	50	30,6	993,3	72,2	750
DEKOMP 55	55	27,8	1093,4	79,4	830
DEKOMP 60	60	25,5	1192	86,6	900



Obr. 5-8 Výrobce KBH ENERGY: Dekompenzační tlumivka [19]

- **Výběr vhodných pojistek a pojistkových odpínačů**

Každá tlumivka bude jištěna pojistkovým odpínačem. Je proto nutné vybrat vhodnou nožovou pojistku a vhodný pojistkový odpínač. Přímou v katalogu výrobce je doporučeno jaké pojistky by se měli použít. Jsou doporučeny pojistky s charakteristikou gG,gL. Ze znalosti charakteru proudu tlumivky nejsou očekávány proudové rázy, neboť proud na tlumivce postupně nabíhá. Pro jištění tedy bude použita pojistka s hodnotou nejbližší k jmenovité hodnotě proudu tlumivky. Pojistka je vybírána z katalogu firmy OEZ. Nejbližší nožová pojistka je PNA000 100gG. Tato pojistka bude usazena v pojistkovém odpínači FHN000. Část katalogu, ze kterého byla pojistka a odpínač vybrány, je uvedena na str. 47 (v Tab. 5-7 a Tab. 5-8).

- **Výběr vhodné rozvaděčové skříně**

Po konzultaci s firmou ELCOM byla zvolena stejná rozvaděčová skříň jako v případě kompenzačního rozvaděče a to rozvaděč STAN 200606, viz Tab. 5-9.

5.3.3 Zhodnocení varianty č. 1

Tento návrh řešil jak hlavní budovu tak vysunutou trafostanici jako samostatné celky.

Pomocí hrazeného kompenzačního rozvaděče, 220kVAr se stupňovitou regulací, umístěného za transformátory T1, T2 byli vyřešeny problémy s nedokompenzováním pro jakoukoliv situaci. Pomocí dekompenzačního rozvaděče umístěného za trafostanicí T3 byl naopak vyřešen problém s nevyžádanou dodávkou kapacitního výkonu vznikajícího na 4,5km dlouhém kabelu. Umístění jak kompenzačního tak dekompenzačního rozvaděče je vidět na Obr. 5-9.

5.4 Návrh- varianta č. 2

Jak již bylo uvedeno v rozboru zadání, varianta č. 2 bude řešena jako celek. Bude využit kapacitní výkon 4,5km dlouhého kabelu pro kompenzování za transformátorem T1, T2. Tato varianta počítá s tím, že nebude nikdy v provozu pouze transformátor T3. V případě, že tento způsob provozu nebude možný, nebude ani možné využít variantu č. 2. a to zejména z důvodu možné nevyžádané dodávky kapacitního výkonu do napájecí sítě.

Pro tuto variantu bude použit stejný hrazený kompenzační rozvaděč 220kVAr jako ve variantě č. 1. Ten bude opět umístěn za transformátory T1, T2. Nebude, ale ovšem použit dekompenzační rozvaděč za trafostanicí T3 pro dekompenzaci kapacitního výkonu kabelu.

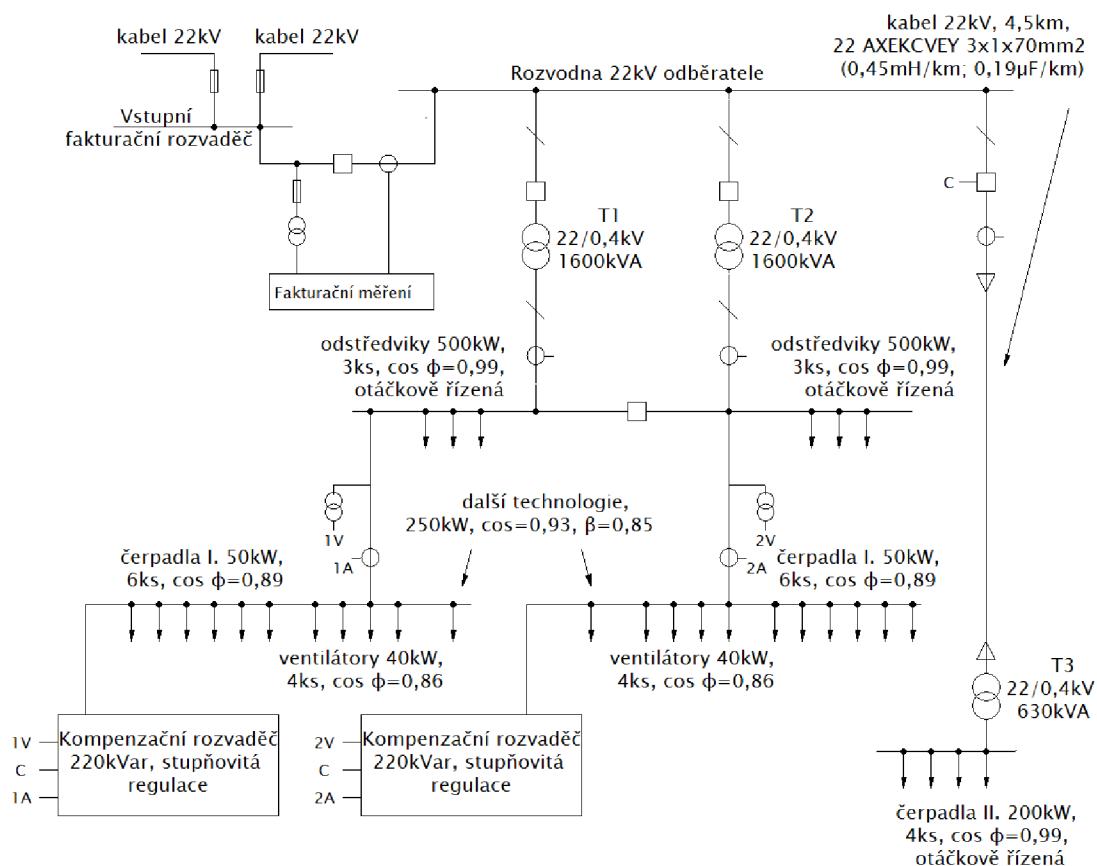
V případě, že bude v provozu jeden z transformátorů T1,T2 a současně nebude v provozu transformátor T3, bude kompenzační rozvaděč 220kVAr v provozu. V případě ale, že bude současně v provozu jak jeden z transformátorů T1, T2 tak i transformátor T3, kompenzační rozvaděč bude uveden mimo provoz a pro kompenzaci se bude využívat 130kVAr kapacitního výkonu kabelu

5.4.1 Zhodnocení varianty č. 2

Tato varianta, co se týče dodržování účinníku, bude za podmínky, že transformátor T3 nebude nikdy v provozu sám, bez problému vyhovovat. Každopádně je nutné říci, že tato varianta není tak komplexní jako varianta č. 1 a již neumožňuje všechny možné scénáře provozu. Její velkou výhodou je ale cena, která je o cca 100 000Kč nižší než v případě předchozí varianty viz Tab. 5-12. Další výhodou je také delší životnost kompenzačního rozvaděče.

Tab. 5-12 Finanční náklady varianty č. 2

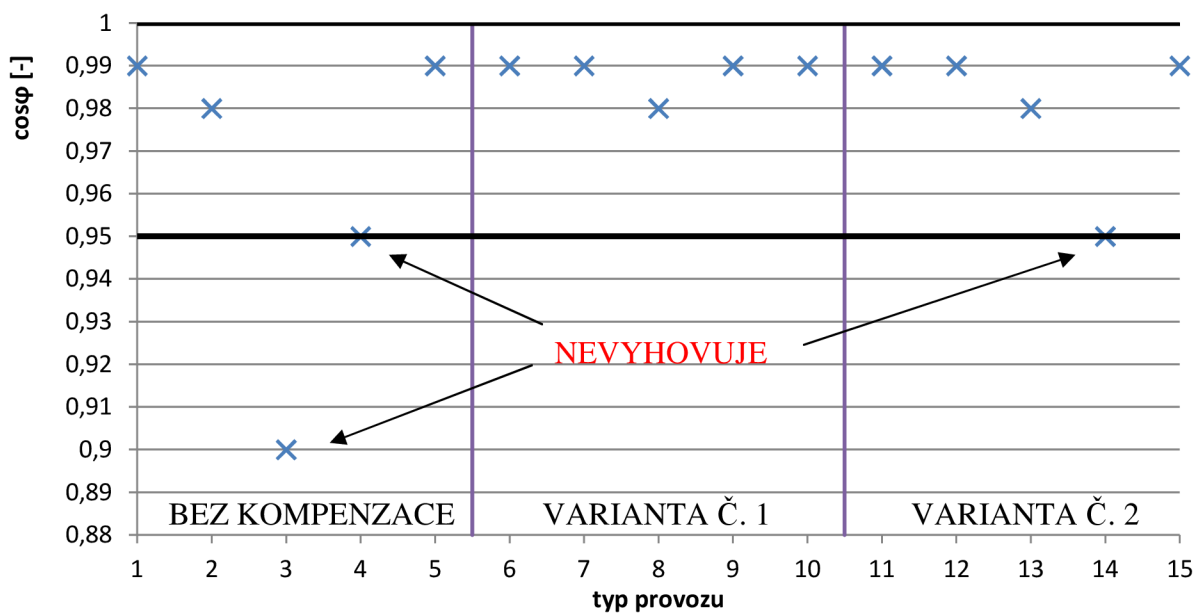
Kompenzační rozvaděč 240kVAr	ks	cena za 1 ks	celkem
Kondenzátor VISHAY 20kVAr	11	970 Kč	10 670 Kč
Ochranná tlumivka ELCOM 20kVAr	1	1 950 Kč	1 950 Kč
Ochranná tlumivka ELCOM 40kVAr	5	2 810 Kč	14 050 Kč
Pojistkový odpínač OEZ FH000 160A	6	1 386 Kč	8 316 Kč
Pojistkové vložky OEZ PNA000 63gG	3	51 Kč	153 Kč
Pojistkové vložky OEZ PNA000 125gG	15	83 Kč	1 245 Kč
Stykače BENEDICT K3-32K	1	1 000 Kč	1 000 Kč
Stykače BENEDICT K3-62K	5	1 687 Kč	8 435 Kč
Rozvaděč SPÁLOVSKÝ 200606	1	9 043 Kč	9 043 Kč
Regulátor KMB ENERGY NOVAR 1106	1	6 500 Kč	6 500 Kč
Celková cena varianty č. 2	-	-	61 362 Kč



Obr. 5-10 Schéma varianty č. 2

5.5 Velikosti účinníků při různých scénářích provozu

Všechny účinníky jsou induktivního charakteru, pouze u provozů typu 4 a 14 jsou účinníky kapacitní, u kterých je jediná dovolená hodnota účinníku 1.



Obr. 5-11 Velikosti účinníků při různých scénářích provozu

Scénáře provozu:

- 1, 6, 11: v provozu současně transformátor T1 a T3
- 2, 7, 12: v provozu pouze transformátor T1
- 3, 8, 13: v provozu pouze transformátor T1 bez odstředivek
- 4, 9, 14: v provozu pouze transformátor T3
- 5, 10, 15 : v provozu transformátory T1 a T3, bez odstředivek

V provozu 14 je v provoz pouze transformátor T3. Ve variantě č. 2 ale počítáme s tím, že transformátor T3 nebude nikdy sám v provozu a tudíž nebude docházet k problému překompenzování.

6 ZÁVĚR

V dnešním moderním světě je kvalita a cena energie nesmírně důležitá. Stejně tak je také velmi důležitá spolehlivost dodávek energie. Ke zlepšení všech těchto atributů přispívá nemalou mírou právě kompenzace jalového výkonu. Lze proto předpokládat, že kompenzace i nadále zůstane nedílnou součástí ovlivňující kvalitu, spolehlivost a cenu elektrické energie.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část postupně seznamuje čtenáře s kapitolami: teorie jalového výkonu, prostředky pro kompenzaci a příklad návrhu kompenzace. V kapitole o prostředích pro kompenzaci je největší prostor vyhrazen kompenzaci hrazené a to z důvodu jejího velkého rozvoje, který přichází v důsledku rostoucího počtu nelineárních spotřebičů v síti. V kapitole o návrhu kompenzace je na jednoduchém příkladu velmi dobře vidět její pozitivní vliv. Vlivem paralelní kompenzace došlo ke snížení ztrát o 39% a ke snížení úbytku napětí o 33%. Teoretická část je koncipována tak, aby čtenář získal komplexní přehled o kompenzaci a hlavně, aby porozuměl jejímu principu.

Praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem kompenzace pro průmyslového odběratele. Zadána je chemická výroba se spotřebou jednak v jednom velkém objektu, ale i ve vzdálené vysunuté trafostanici. Provozovatele areálu trápí penalizace spojené s nedodržováním předepsaného účinníku. Je proveden návrh dvou možných variant kompenzace. Varianta č. 1 řeší hlavní budovu a vysutou trafostanici samostatně. Varianta č. 2 naopak řeší průmyslový areál jako celek. Obě varianty jsou zhodnoceny a to jak z hlediska kvality vykompenzování, tak z hlediska finančního. Z hlediska kvality vykompenzování je výhodnější varianta č. 1. Varianta č. 2 již neumožňuje všechny scénáře provozu. To je názorně zobrazeno na Obr. 5-11, kde jsou stanoveny hodnoty účinníku pro různé scénáře provozu pro stavy bez kompenzace, s kompenzací varianta č. 1 a varianta č. 2. Z hlediska finančního ovšem vychází cena varianty č. 1 na 163 000Kč což je v porovnání s cenou varianty č. 2 63 000Kč značný rozdíl. Abychom mohli jednoznačně říct, která varianta je pro náš případ optimální, museli bychom prodiskutovat se zadavatelem možné scénáře provozu. Pokud by zadavatel potvrdil předpoklad u varianty č. 2., že nemůže být v provozu pouze transformátor T3, byla by jednoznačně zvolena varianta č. 2. V případě ale, že by zadavatel náš předpoklad vyvrátil, musela by být zvolena varianta č. 1.

POUŽITÁ LITERATURA

• Tištěné zdroje

- [1] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1 vydání. Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4
- [2] KOLEKTIV, Autorů. Seminář kvality elektrické energie- Kompenzace jalového výkonu, kondenzátory v energetickém systému. 1 vydání. Ostrava, 2005. 10 stran.
- [3] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu: sborník přednášek. 1 vydání. Trutnov: H.V.K.L. PROPAG TEAM, 1997, 27 stran.
- [4] DRUGDA, Jaroslav, HOLOUBEK, Jiří, HUDEC, Jaroslav. Kompenzace účinníku v energetice, průmyslových a zemědělských podnicích: sborník přednášek. 1 vydání. Trutnov: Dům kultury ROH Trutnov, 1989. 164 stran.
- [5] FRIČ, Helmut. Jalový výkon a jeho kompenzácia v zariadeniach nn, 1 vydání. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatury, 1961. 362 stran.
- [6] HÁLA, Pavel, LACINA, Břetislav. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1 vydání. Brno: Elektromagnet, 1994. 90 stran.
- [7] BLAŽEK, Vladimír, SKALA, Petr. Distribuce elektrické energie (skriptum). Brno: Vysoké učení technické v Brně. 140 stran.

• Internetové zdroje

- [8] ŽÁČEK, Jaroslav. Účinník v teorii a praxi. Časopis ELEKTRO. 2004, č. 12, s. 4-6 [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el120404.pdf>
- [9] ČERNÝ, Václav. Čistě činné zatížení- a přece jalový výkon?. Časopis ELEKTRO. 2003, č. 12, s. 38-39 [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el120338.pdf>
- [10] KOŠTÁL, Josef. Kompenzace elektrického jalového výkonu. Časopis ELEKTRO. 2009, č. 3, s. 2-4 [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38682.pdf>
- [11] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí energetického regulačního úřadu č.5/2012 ze dne 30. Listopadu 2012 [online]. Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV9_2012.pdf
- [12] VISHAY. Power capacitors catalogue [online]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/13004/cylind.pdf>
- [13] ELCOM. Katalog ochranných tlumivek [online]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/vyroba/produkty/clanek/103-ochranne-tlumivky.html>
- [14] BENEDICT. Capacitor contactors catalogue [online]. Dostupné z: <http://www.benedict.at/upload/4525262-Capacitor-Contactors-D385E.pdf>
- [15] OEZ. Katalog pojistkových vložek [online]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/4915-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [16] OEZ. Katalog pojistkových odpínačů [online]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1291-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [17] KMB SYSTEMS. Manuál výrobce [online]. Dostupné z: http://www.zavodny.cz/data/manualy_novar/Novar1xxx,12xx,1312%20Manual.pdf

-
- [18] SPÁLOVSKÝ. Katalog rozvaděčových skříní [online]. Dostupné z:
<http://www.spalovsky.cz/soubory/20121213101651.pdf>
- [19] KBH ENERGY. Katalog dekompenzačních tlumivek [online]. Dostupné z:
<http://www.kbh.cz/dekompenzecni-tlumivky-decomp/dekompenzacni-tlumivky-dekomp>
- [20] ZES SILKO. Katalog kompenzace [online]. Dostupné z:
<http://www.zez-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>
- [21] ELCOM. Aktivní filtry [online]. Dostupné z:
<http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/146-aktivni-filtry---obecne.html>