

použití kapacitních a indukčních kompenzátorů jalového výkonu a nevhodnější místo jejich připojení,  
 vliv kolísání napětí na provoz sítě,  
 vliv vyřazení části vedení z provozu, náhlé vypnutí zátěže nebo některé elektrárny,

podklady pro další výstavbu a spolupráci sítě,  
 opatření na zmenšení ztrát v síti.

Při poruchách řešíme:  
 rozdělení proudů a napětí v síti při zemním spojení a zkratech,  
 určení největších a nejmenších poruchových proudů pro správné nastavení reléových ochran,  
 vliv uzemnění uzlu,  
 vliv indukčních a kapacitních vazeb mezi sítěmi,  
 zkoušení statické a dynamické stability sítě.

#### 4.5.4. Dynamický model sítě

Dynamický model sítě se používá při přímém zjišťování a měření statické a dynamické stability přenosů na dlouhých vedeních. Nastavením hodnot v příslušných měřítkách řeší dynamický model komplikované diferenciální rovnice, které vznikají při matematickém řešení otázek stability. Skládá se z článků vedení, zátěží a napájecích bodů. Používaná frekvence je pracovní frekvencí skutečné sítě. Je to kopie skutečného systému ve zmenšeném měřítku.

Dynamické modely jsou provedeny trojfázově, takže lze studovat přímo různé nesymetrické jevy v sítích. Generátorové jednotky jsou vyhotoveny jako synchronní stroje s vyměnitelnými rotory, čímž se dosahuje možnosti zobrazení různých alternátorů. Pro nastavení různých momentů setrvačnosti se používají přídatné zátěže, které se upevňují na rotor synchronního stroje. Na dynamickém modelu lze sledovat výkony generátorů, působení ochran, regulátorů apod.

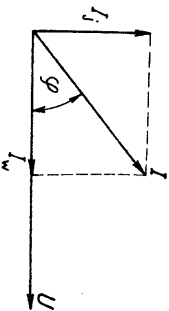
Vyspělou techniku dynamických modelů mají v SSSR, kde na dynamických modelech velmi úspěšně řeší mnohé problémy dálkových přenosů.

Na závěr je třeba konstatovat, že síťové modely se dnes nahrazují číslicovými počítači, které jsou při stejném rozsahu použitelnosti obvykle rychlejší, menší a mají podstatně větší výkon.

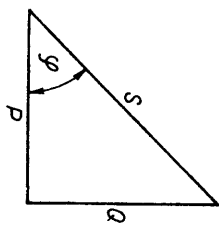
## 5. Kompenzace účinníku

### 5.1. VLIV ÚČINNÍKU V SÍTÍCH

Některé spotřebiče elektrické energie v průmyslu představují indukční zátěž a v silnoproudém rozvodu způsobují, že jim procházejí nejen činné složky proudu ( $I_w = I \cos \varphi$ ), ale i jalové složky (indukční  $I_j = I \sin \varphi$ , obr. 5.1). Zejména jalové složky proudu zatěžují silnoprůdný rozvod, zvětšují ztráty v rozvodu elektrické energie a úbytek napětí, nepříznivě působí na činnost vypínačů a zhoršují účinník v sítích.



Obr. 5.1. Odvození činného proudu  $I_w$  a jalového proudu  $I_j$



Obr. 5.2. Trojúhelník zdánlivého výkonu  $S$ , činného výkonu  $P$  a jalového výkonu  $Q$

Činný výkon pro harmonické proudy a napětí vyjadřujeme vztahem

$$P = UI \cos \varphi \quad (W; V, A)$$

kde  $U$ ,  $I$  jsou efektivní hodnoty napětí a proudu,

$\varphi$  je fázový posuv mezi nimi,  $\cos \varphi$  účinník.

Jalový (reaktanční) výkon pro harmonické napětí a proud vyjadřujeme vztahem

$$Q = UI \sin \varphi \quad (\text{var}; V, A)$$

Zdánlivý výkon je dán součinem efektivních hodnot proudu a napětí

$$S = UI \quad (V \cdot A; V, A)$$

a potom platí

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

Uvedené vztahy vyplývají i z trojúhelníku výkonů (obr. 5.2). Účinník lze vyjádřit ze vztahu

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Ze zdánlivého výkonu využíváme jen činný výkon  $P$  (tepelná, světelná a mechanická energie) a jalový výkon  $Q$  musíme přivést ke spotřebičům např. na vytvoření magnetického pole. Spotřebič má tím lepší účinník, čím větší část přivedeného zdánlivého výkonu se využije jako činný výkon a čím menší jalový výkon potřebujeme na vytvoření magnetického pole, tedy poměr  $P/S$  nabývá větší hodnoty. Jalový příkon můžeme vyrobit v elektrárnách a vedením ho přenést ke spotřebiči, nebo ho vyrobit co nejblíže u spotřebiče. Výroba jalové energie v místě spotřeby činné energie se nazývá kompenzace účinníku.

Je-li účinník špatný, projeví se to v hospodárnosti přenosu elektrické energie a ve vyšších provozních nákladech. Velké indukční jalové výkony se přenáší rozvodným systémem při špatném účinníku, a proto při jeho dimenzování má účinník velký význam. Zlepšování účinníku má velký hospodářský význam jak pro výrobu elektrické energie tak i pro spotřebitele energie. Ekonomické důsledky kompenzace probereme na závěr této kapitoly.

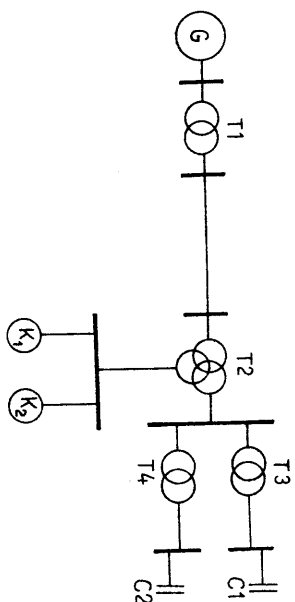
## 5.2. PRINCIP A DRUHY KOMPENZACE

Kompenzace účinníku je zmenšování indukčního výkonu kapacitním výkonem kondenzátorů nebo točivých kompenzátorů.

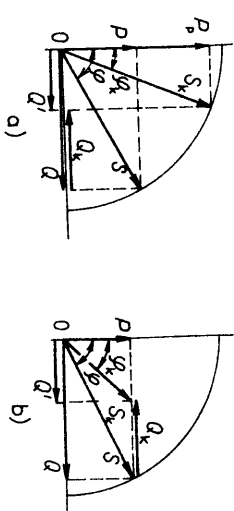
Jestliže v příslušném místě rozvodného systému odebíráme kapacitní výkony, kterými se kompenzují indukční výkony, dosahujeme zlepšení účinníku. Účinník má významnou úlohu při dimenzování rozvodných soustav, protože ovlivňuje přenos požadovaných výkonů. Je-li špatný účinník, v rozvodné soustavě se přenáší velké jalové výkony  $Q$ . Ty mají vliv na přenosovou schopnost rozvodného systému, ovlivňují ztráty i úbytky napětí, jakož i celkovou hospodárnost přenosu elektrické energie. Špatný účinník má vliv i na provozní náklady. Důležité je, aby úspory získané z kompenzace byly větší než vynaložené náklady.

Příklad zapojení kompenzačních zařízení je na obr. 5.3. Účinník lze kompenzovat:

- a) zvýšením činného výkonu  $P$  na  $P_p$  při nezměněném dimenzování rozvodu (obr. 5.4a),



Obr. 5.3. Příklad zapojení kompenzačních zařízení  
G – generátor,  
T1 až T4 – transformátory,  
K1, K2 – rotační kompenzátory,  
C1, C2 – statické kondenzátory



Obr. 5.4. Kompenzace jalového výkonu  
a) zvýšením činného výkonu, b) zmenšením přenášeného jalového výkonu

- b) zmenšením přenášeného jalového výkonu při nezměněném činném výkonu: rozvod se dimenzuje na menší zdánlivý výkon  $S_k$  nebo se umožní zmenšení úbytku napětí a ztrát v rozvodu (obr. 5.4b).

### 5.2.1. Druhy kompenzace

Kompenzace indukčního výkonu se provádí

- a) kompenzací jednoúčelových spotřebičů,
- b) kompenzací u odběratele,
- c) kompenzací v síti energetických rozvodných podniků.

Při kompenzací jednoúčelových spotřebičů jsou jejich výrobci povinni je kompenzovat tak, aby ze sítě odebrali minimální magnetizační výkon při stavu naprázdno.

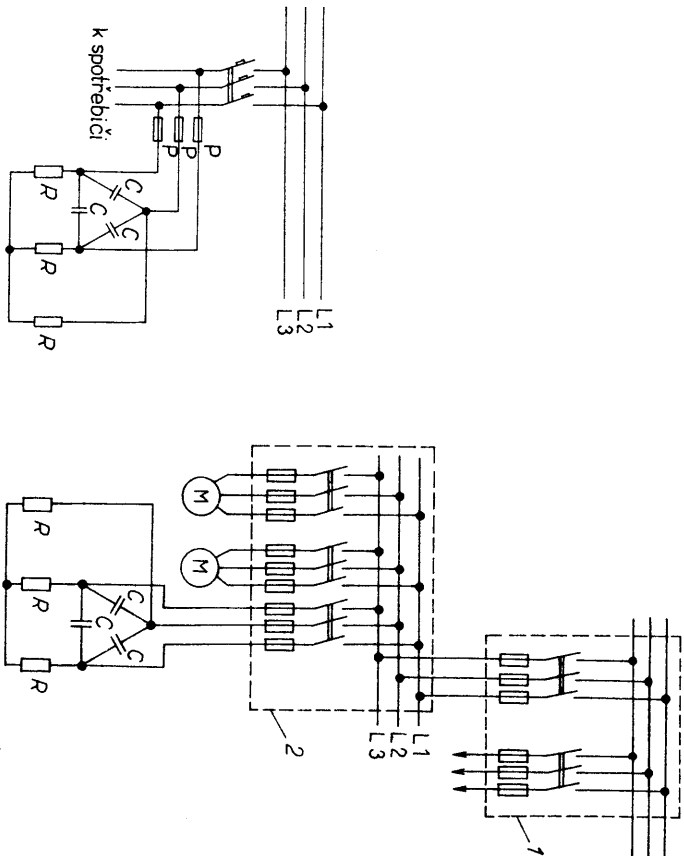
Kompenzací indukčního výkonu u odběratele rozdělujeme na:

- individuální kompenzací (jednotlivou),
- skupinovou kompenzací,
- centrální kompenzací (ústřední),
- smíšenou kompenzací.

U kompenzace indukčního výkonu u odběratele jde o kompenzaci účinniku, která se používá v průmyslu. Tato kompenzace se nazývá paralelní kompenzace.

Individuální kompenzace. U individuální kompenzace se každý spotřebič výkonu indukčního charakteru kompenzuje vlastním kondenzátorem (obr. 5.5). Používá se v zařízeních, u nichž je využití menší než 1 000 hodin ročně, a nelze-li řešit kompenzaci výhodnějším způsobem. Individuální kompenzace se uskutečňuje na svorkách každého stroje.

Individuální kompenzace je ideální, protože nevznikají přepětí při zapínání kondenzátoru a je možno vynechat údržbu spínacích zařízení. Její výhodou je zejména kompenzace indukčního výkonu v místě spotřeby, čímž se odlehčí přívod a celá síť. Zároveň se zmenší ztráty ve vedení



Obr. 5.5. Individuální kompenzace  
C – statický kondenzátor, R – vybíječi  
rezistor, P – pojistka

Obr. 5.6. Skupinová kompenzace  
1 – hlavní rozváděč, 2 – podružný  
rozváděč, M – indukční spotřebiče,  
C – statický kondenzátor, R – vybíječi  
rezistor, M – spotřebič

a úbytek napětí. Se spotřebičem se zapíná a vypíná i kondenzátor, a proto nevzniká nebezpečí překompenzování. Využívá-li se některé zařízení pouze několik hodin denně, kondenzátor je využit málo. Jsou-li zařízení v provozu rozptýlená, je kontrola kondenzátoru komplikovanější.

Skupinová kompenzace. U skupinové kompenzace se kondenzátorová jednotka nebo kondenzátorová baterie připojí na přípojnice skupinového rozváděče (obr. 5.6). Doporučuje se výhodná skupinová kompenzace výrobní linky, která je poháněna několika na sobě funkčně závislými motory. Kapacitní výkon pro celou skupinu se přepíná až s posledním nebo největším spuštěným motorem. Vypínání kondenzátorové baterie se provádí v opačném pořadí. Skupinová kompenzace se uskutečňuje na provozech v podružných rozváděcích.

U skupinové kompenzace lze lépe využít výkon kondenzátorů. Při projektování této kompenzace se vychází ze skutečné současné spotřeby indukčního výkonu a nebere se v úvahu součet indukčních výkonů kompenzovaných spotřebičů. Vedení mezi skupinovým rozváděčem a hlavním rozvodem se odlehčí od indukčního výkonu. Vyžaduje se však automatická regulace a vypínání kondenzátorových jednotek, vypínače, pojistky, spínače s relé, vybíječi rezistory, jejich údržba a obsluha, což kompenzaci zdražuje. Přívody od skupinového rozváděče ke spotřebičům jsou proudově zatíženy.

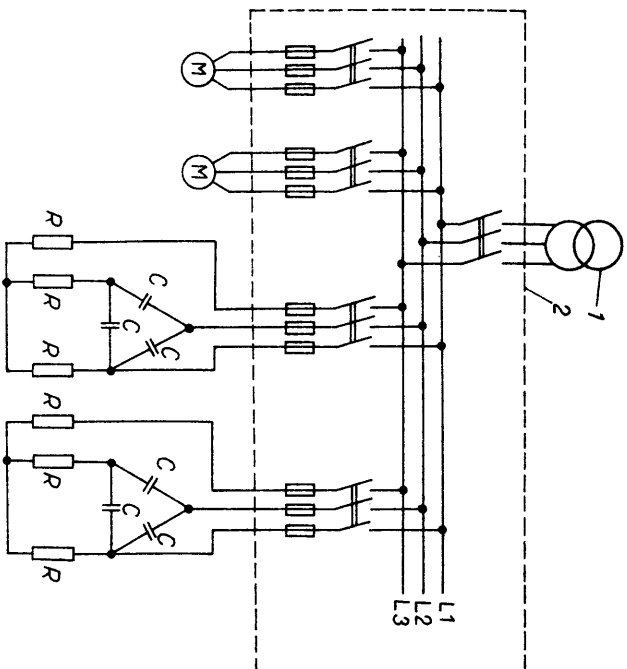
Centrální kompenzace. U centrální kompenzace se indukční výkon kompenzuje pro celý závod. Velikost kapacitního výkonu se reguluje automaticky (obr. 5.7). Centrální kompenzace se uskutečňuje v hlavním rozváděči.

Při centrální kompenzaci je nejvýhodnější využít kondenzátorovou baterii, protože významnou úlohu má zejména činitel současnosti. Kondenzátorová baterie dosahuje v porovnání s předcházejícími kompenzacemi nejmenší velikosti. Snadná je i kontrola zařízení ústřední kompenzace. Kompenzace v sítích energetických rozvodných závodů. V praxi je účelné odlehčit energetické rozvodné síť od přenosu jalové energie a indukční výkon kompenzovat přímo v místě spotřeby. Kompenzace jalového výkonu u spotřebitelů je velmi důležitá, a až potom se přistupuje ke kompenzaci v energetických rozvodných sítích.

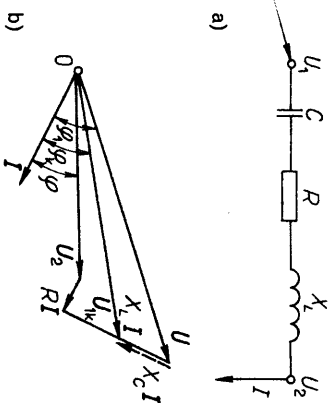
Podle zapojení kompenzačních zařízení rozdělujeme kompenzaci na sériovou a paralelní.

Sériová kompenzace. Uskutečňuje se statickými kompenzátory, které se zapojují do série s vedením. Nejčastěji se používá ke kompenzaci

vedení nebo pecových transformátorů. V těchto případech lze plně využít výhody stabilizace napětí (obr. 5.8). U sériové kompenzace se ovlivňuje podélná impedance vedení, která se kompenzací zmenšuje. Její charakter je indukční. Zlepší se i napětové poměry, zmenší se úbytek napětí a zmenší se i úhel přenosu  $\varphi$ , což je významné z hlediska stability.



Obr. 5.7. Centrální kompenzace  
1 – síť, 2 – hlavní rozváděč, C – statický kondenzátor, R – vybijecí rezistor, M – spotřebič



Obr. 5.8. Sériová kompenzace vedení  
a) náhradní schéma, b) fázorový diagram

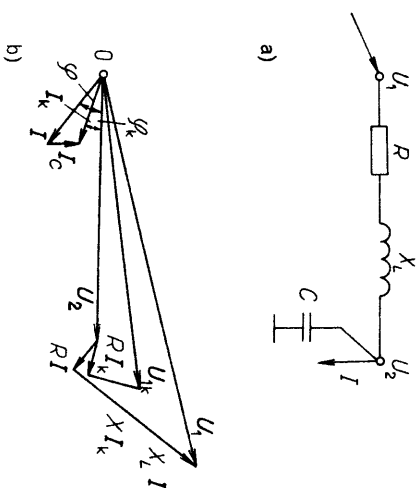
Sériová kompenzace se doporučuje pro dlouhé vedení vvn a zvn, u kterých se vyskytuje velký úbytek napětí. Pro zvětšený výkon sítě lze napsat přibližný vztah

$$S_{2k}(X_L - X_C) = S_2 X_L$$

$$\frac{S_{2k}}{S_2} = \frac{X_L}{X_L - X_C} > 1$$

Skutečnost, že sériové kondenzátory zvětšují zkratové proudy obvodu (zmenšují jeho reaktanci) vede k tomu, že se pro kompenzaci vedení vvn a zvn používají zejména synchronní kompenzátory.

Paralelní kompenzace. Paralelní kompenzace se uskutečňuje statickými kondenzátory nebo synchronními kompenzátory, které jsou zapojeny paralelně ke spotřebičům na konci vedení. Touto kompenzací se dosahuje zmenšení jalového výkonu, tj. zmenšení indukční složky proudu a zmenšení zdánlivého proudu, tj. zlepšení účinníku sítě –  $\cos \varphi$ . Tím se zmenší úbytek napětí a ztráty, tj. celkově se zlepší hospodárnost, zlepší přenos a rozvod elektrické energie. K tomuto způsobu kompenzace patří již vzpomínané jednotlivé, skupinové, centrální a kombinované kompenzace. Náhradní schéma a fázorový diagram paralelní kompenzace je na obr. 5.9. Z fázorového diagramu vyplývá, že zatížením kondenzátoru v místě zatížení poklesne proud protékající vedením z hodnoty  $I$  na  $I_k$ , současně se zmenší fázový posun mezi proudem a napětím z hodnoty  $\varphi$  na  $\varphi_k$ .



Obr. 5.9. Paralelní kompenzace vedení  
a) náhradní schéma, b) fázorový diagram

### 5.3. VÝPOČET KOMPENZAČNÍHO VÝKONU

Ve fázorovém diagramu na obr. 5.4b jsou jednotlivé veličiny označeny takto:

- $S$  – zdánlivý výkon před kompenzací,
- $P$  – činný výkon,
- $Q$  – jalový indukční výkon před kompenzací,
- $Q'$  – jalový indukční výkon po kompenzací,
- $S_k$  – zdánlivý výkon po kompenzací,
- $\cos \varphi$  – účinník před kompenzací,
- $\cos \varphi_k$  – požadovaný účinník po kompenzací,
- $Q_k$  – kompenzační výkon.

Pro kompenzační výkon podle fázorového diagramu platí vztahy

$$Q_k = Q - Q'$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}; \quad Q = P \operatorname{tg} \varphi$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{Q'}{P}; \quad Q' = P \operatorname{tg} \varphi_k$$

Když dosadíme do rovnice pro  $\varphi_k$ , dostaneme vztah pro kompenzační výkon

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

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad (\text{kvar; kW, -})$$

$$Q_k = P \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k}}{\cos \varphi_k} \right)$$

kde  $P$ ,  $Q$  jsou činný a jalový výkon spotřebičů.

Za odebranou elektrickou energií se u velkoodběratelů stanoví poplatek podle středního účinníku  $\cos \varphi_{\text{st}}$ , který zjišťujeme elektroměry činné práce  $W_s$  a jalové práce  $W_j$  za určité sledované období (např. měsíčně). Z údajů činného elektroměru se určí činný výkon  $P$

$$P = \frac{W_s}{t} = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Z údajů jalového elektroměru

$$Q = \frac{W_j}{t} = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

$$\cos \varphi_{\text{st}} = \frac{W_s}{W_s^2 + W_j^2}$$

nebo (náms už známý vztah)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{W_j}{W_s}$$

Je-li zjištěný účinník menší než  $\cos \varphi_{\text{neur}} = 0,95$ , podnik musí platit penále. Překompenzování se rovněž nedovoluje.

Na přibližné určení hodnot kompenzačního výkonu se v praxi používají nomogramy. Když např. vyjádříme kompenzační výkon  $Q_k$  v procentech činného výkonu  $P$ , tak kompenzační výkon vypočítáme

$$Q_k = P \frac{p}{100}$$

příčemž  $p$  (%) pro příslušný účinník  $\cos \varphi$  vyhledáme v nomogramu.

Použijeme nomogramů vysvětlíme na příkladech a úlohách.

### 5.4. KOMPENZAČNÍ ZATÍŽENÍ, REGULACE KOMPENZACE

V úvodu jsme uvedli, že na kompenzaci účinníku používáme kompenzační zařízení, a to statické kondenzátory nebo točivé kompenzátory (synchrónní kompenzátory, synchrónní motory).

#### 5.4.1. Statické kondenzátory

Kondenzátor pro silový rozvod, kterým kompenzujeme účinník, je elektrické zařízení, které ze sítě odebírá kapacitní výkon  $Q_C$  a kapacitní složku proudu  $I_C$  (tato složka je v protifázi s jalovou složkou proudu  $I_L$ ). Kondenzátor je zdrojem jalové složky proudu, a tudíž zdrojem jalové energie. Kompenzační kondenzátor se skládá ze soustavy svitků vyvrtaných kovovými vrstvami, které jsou odděleny dielektrikem. Kondenzátorová jednotka obsahuje jeden nebo několik svitků umístěných v nádobě s vyvedenými svorkami.

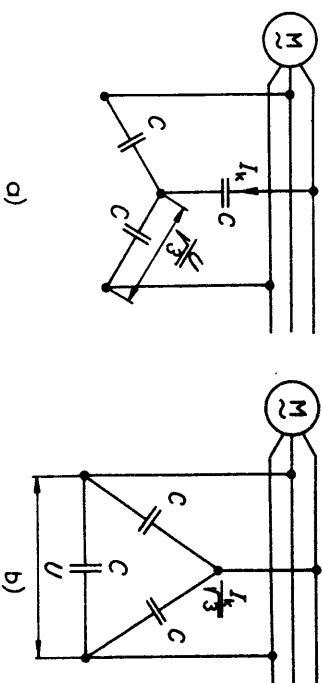
Kondenzátorová baterie se skládá ze skupiny kondenzátorových jednotek, které jsou navzájem elektricky spojeny, jsou jednofázové nebo trojfázové.

Statické kondenzátory připojujeme sériově nebo paralelně k přenosové soustavě.

Sériové kondenzátory. Používají se zejména ke zlepšení napětových poměrů v sítích vn (do 35 kV). V sítích zvln a vvn se používají pro zlepšení stability elektrizační soustavy a zlepšení přenosových parametrů vedení.

Při spínání se může projevit jejich nepříznivý vliv zejména v přípustnosti proudů vyšších harmonických. V místě připojení vyvolávají kondenzátory zvýšené napětí. Když toto zvýšené napětí nevyhovuje ostatním elektrickým zařízením, je třeba ho vhodným způsobem snížit.

Paralelní kondenzátory. Paralelní kondenzátory se připojují paralelně k průmyslovým sítím do napětí 1 kV pro zlepšení účinnosti. Velmi málo se používají v sítích nad 1 kV. Spojují se do hvězdy nebo do trojúhelníku (obr. 5.10).



Obr. 5.10. Paralelní kondenzátory  
a) v zapojení do hvězdy, b) v zapojení do trojúhelníku

Uvážíme-li jen základní harmonické napětí, proud, souměrnost a zanedbáme ztráty činného výkonu, pro jalový výkon odebraný jednou fází můžeme napsat vztahy:

pro zapojení do hvězdy

$$Q_A = I_C U_f = U_f \frac{U_f}{1} = U_f^2 \omega C$$

$$\omega C$$

a pro zapojení do trojúhelníku

$$Q_V = I_C U_s = U_s \frac{U_s}{1} = U_s^2 \omega C$$

$$\omega C$$

Pro trojfázový výkon:  
pro zapojení do hvězdy

$$Q_A = 3U_f^2 \omega C = 3 \frac{U_s^2}{(\sqrt{3})^2} \omega C = \frac{3}{3} U_s^2 \omega C$$

neboli

$$Q_A = U_s^2 \omega C$$

a pro zapojení do trojúhelníku

$$Q_A = 3U_s^2 \omega C$$

Pro stejný jalový výkon platí

$$U_s^2 \omega C_A = 3U_s^2 \omega C$$

$$Q_A = 3Q_C; \quad C_A = 3C$$

Z výpočtů vyplývá:

a) kapacita kondenzátoru při zapojení do hvězdy je trojnásobná než při zapojení do trojúhelníku, proto se všude v sítích nn používá zapojení kondenzátorů do trojúhelníku,

b) kondenzátor dodává do sítě indukční jalový výkon a odebírá ze sítě kapacitní jalový výkon, proto se výhodně používá pro kompenzaci účinnosti.

Při kompenzaci účinnosti kondenzátorem mohou nastat tyto případy:

a)  $Q = Q_C$ , tj. síť dodává jen činný výkon – ideální kompenzace.  
b)  $Q < Q_C$ , tj. kondenzátor nejen kompenzuje spotřebič, ale dodává i část do sítě – překompenzováno.

c)  $Q > Q_C$ , tj. kondenzátor nedostatečně kompenzuje spotřebič, protože mu nedodává požadovaný jalový výkon – podkompenzováno.

Kondenzátory v provozu nevyžadují obsluhu, vyznačují se malými ztrátami a dávají možnost při paralelním zapojení vytvářet baterie kondenzátorů požadovaného výkonu. Jsou však velmi citlivé na zvýšení napětí v síti, protože výkon vzrůstá s druhou mocninou napětí, též jsou citlivé na přetížení vyššími harmonickými.

Kondenzátory se připojují na přípojnice spínačem. Jestliže by výkon kondenzátoru překročil nejmenší hodnotu indukčního výkonu kompenzovaného zařízení, musí se kondenzátor opatřit regulátorem indukčního výkonu, aby se výkon rozdělil na skupiny kondenzátorů.

Paralelně ke svorkám kondenzátorů se montuje vybíjecí zařízení (vybíjecí rezistor), které je schopno odstranit zbytkové napětí v předepsané době po odpojení kondenzátorů od sítě.

Při připojení kondenzátorových baterií na síť je třeba sledovat vliv spínání, který může způsobit nežádoucí změny provozních podmínek, např. samobuzení strojů, spínací přepětí, zvýšení vyšších harmonických atd.

V době provozu kondenzátorů je třeba kontrolovat jejich teplotu. Nádoba kondenzátoru může mít nejvyšší dovolenou teplotu 60 °C. Nejlepší místo kondenzátoru je na víku, které musí provozovatel pravidelně kontrolovat. Jsou-li kondenzátory chlazeny vodou, jejich teplota na vstupu nesmí překročit 30 °C.

S ohledem na životnost kondenzátorů se kromě teploty sleduje i napětí a proud. Jestliže proud kondenzátoru překročí dovolenou hodnotu, je třeba uskutečnit příslušná opatření. Uříme převažující harmonickou a zmenšení proudu dosáhneme:

- zvětšením kapacity,
- přemístěním kondenzátorů do jiného uzlu sítě,
- snížením rezonanční frekvence obvodu pod frekvenci rušivé harmonické zapojením sériových tlumivek ke kondenzátorům.

Jestliže uvedená opatření proud neomezí, můžeme zařadit rezistory. Naopak, jestliže proud kondenzátoru v jedné fázi poklesne ne o více než 20 % jmenovité hodnoty, je třeba ho vyměnit.

Kondenzátory se odpojují od sítě vlastním vypínačem, nebo současně s transformátorem, popř. indukčním motorem. Používá-li se vlastní vypínač, je třeba po vypnutí počkat, až se zbytkový náboj zmenší přes vybíjecí rezistor. U kondenzátorů nn trvá čekací doba 1 minutu, u vn 5 minut. Nejprve se odzkouší zkoušечkou a potom izolovaným vodičem nebo u vn zkratovou soupravou. Zjistí se, zda má kondenzátor náboj, a potom se spojí svorky kondenzátoru nakrátko. U kondenzátorů vn je třeba všechny fáze uzemnit a zkratovat.

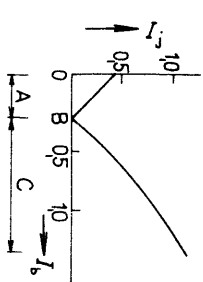
## 5.4.2. Rotační kompenzátory

Pro kompenzaci účinku používáme synchronní kompenzátory nebo synchronní motory.

Synchronní kompenzátory. Synchronní kompenzátor je synchronní stroj, který pracuje jako motor bez mechanického zatížení. Stroj se vzhle-

dem k síti chová jako kondenzátor (kapacita) nebo tlumivka (induktčnost) a je zdrojem nebo spotřebičem jalového výkonu. Regulace jalového výkonu, který vyrobí kompenzátor nebo spotřebuje ze sítě, se uskutečňuje změnou budícího proudu stroje. V přebuzeném stavu působí synchronní stroj jako kondenzátor, tj. může do sítě dodávat jalový výkon, v podbuzeném stavu působí jako tlumivka, tj. odebírá ze sítě indukční proud.

Synchronní kompenzátory mají plynulou regulaci jalového výkonu a podle velikosti buzení zastávají buď frekvenci kondenzátoru, nebo tlumivky. Používají se k regulaci v nadřazených energetických soustavách, a to zejména v hlavních energetických uzlech, kde se používají nejen ke kompenzování, ale i k regulaci napětí. Jestliže regulujeme vedení na stále napětí, elektrárny dodávají jen činný výkon a kompenzátory, které jsou připojeny na vedení, dodávají jalový výkon. Dodávku jalového výkonu do vedení v závislosti na buzení vysvětlíme pomocí obr. 5.11, na kterém jsou křivky V synchronního kompenzátoru pro činný výkon  $P = 0$ .



Obr. 5.11. V – křivky synchronního kompenzátoru  
A – oblast podbuzení, C – oblast nadbuzení

Na vodorovné ose je budící proud  $I_b$ , na svislé ose je jalový proud  $I_j$ . V bodě B pracuje stroj s účinnkem  $\cos \varphi = 1$ . U hodnot buzení menších než  $\overline{OB}$ , tj. vlevo od bodu B, bude stroj odebírat indukční proud a bude mít vlastnosti tlumivky. Od bodu B vpravo, tj. u hodnot budícího proudu větších než  $\overline{OB}$ , bude kompenzátor z vedení odebírat jalový proud kapacitního charakteru. Pro splnění požadavku konstantního napětí v síti je třeba buzení synchronního kompenzátoru regulovat automaticky.

Synchronní motory. Synchronní motor může v přebuzeném stavu pracovat jako kompenzátor a přitom odevzdávat i mechanický výkon. Kompenzaci synchronními motory je možné s výhodou využít zejména v těch provozech, kde se synchronní motory používají jako pohony, např. na pohon v dolech, kompresorů, ventilátorů atd.

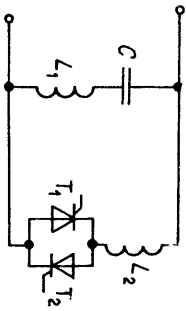
### 5.4.3. Regulace kompenzace

Podle okamžité hodnoty  $\cos \varphi$  a odebraného jalového výkonu je třeba kompenzační zařízení regulovat. Regulace se provádí ručně nebo automatickým regulátorem účinníku.

Kondenzátorové baterie, případně kondenzátorové jednotky jsou zapojeny do stupňů, které podle okamžité hodnoty  $\cos \varphi$  lze přepínat nebo vypínat.

U automatické kompenzace se používá automatický regulátor účinníku.

Obr. 5.12 znázorňuje použití statických kompenzátorů s tyristory.



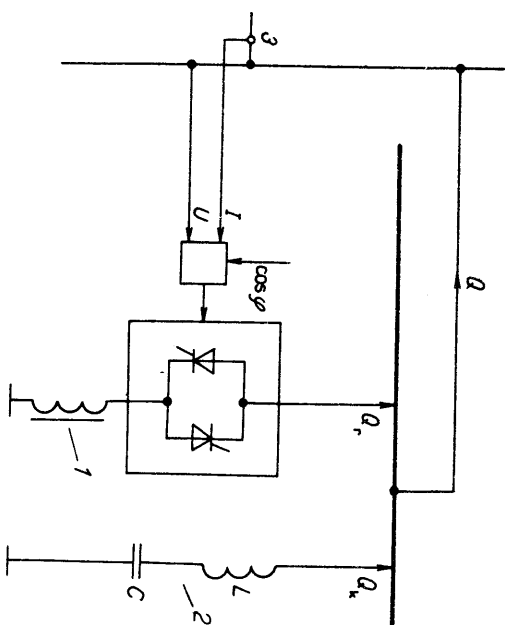
Obr. 5.12. Kompenzátor účinníku  
C – statický kondenzátor,  $L_1$  – filtrační  
tlumivka,  $L_2$  – kompenzační  
tlumivka,  
 $T_1, T_2$  – tyristory

Automatický kompenzační filtr. Automatický kompenzační filtr má funkci centrálního kompenzátoru účinníku, tj. automaticky podle okamžité potřeby kompenzuje jalový indukční výkon a zároveň se používá jako filtr vyšších harmonických. Ve smyslu uvedených funkcí se může používat pro jednotlivou, skupinovou nebo ústřední kompenzaci elektrických zařízení, která jsou zdroji vyšších harmonických. Tato elektrická zařízení jsou spotřebiči velkého a časově rychle se měnícího indukčního jalového výkonu (např. řízené polovodičové měniče atd.).

Na obr. 5.13 je znázorněno principiální schéma automatického kompenzačního filtru. Kompenzační filtr se skládá z měniče impedance 1 a filtru vyšších harmonických 2. Filtr se skládá z filtrační tlumivky indukčnosti  $L$  a z kondenzátorové baterie s kapacitou  $C$ . Prvky  $L$ ,  $C$  jsou zapojeny v sérii a paralelně se připojují k síti; zvoleny jsou tak, aby obvody byly v sériové rezonanci pro filtrované harmonické. Počtu vyšších harmonických odpovídá počet sériových obvodů. Kondenzátory filtrů se musí příslušně dimenzovat. V praxi se používají kondenzátory pro vyšší jmenovité napětí než je napětí sítě v provozu. Kompenzační výkon  $Q_k$  se volí tak, aby se kompenzovala špička jalového výkonu. Přebytká část kompenzačního výkonu se ztrácí v regulačním členu (měnič impedance). Měníč impedance obsahuje např. tlumivku, jejíž indukční výkon lze rychle a plynule regulovat. Tento výkon však závisí na jejím svorkovém napětí,

kteří můžeme regulovat tyristorovým střídavým fázovým řízeným spínačem. Výkon tlumivky  $Q_t$  se odčítá od kompenzačního výkonu kondenzátorů  $Q_k$ . Výsledný kompenzační výkon  $Q$  odpovídá okamžité potřebě ve smyslu určení regulátoru jalového výkonu.

Význam využívání automatického kompenzačního filtru je velký, a to zejména ve snižování plateb za elektrickou energii. Kromě toho se snižuje počet poruch elektrických zařízení v provozu potlačením vyšších harmonických a omezuje se kolísání napětí.



Obr. 5.13. Principiální  
schéma automatického  
kompenzačního filtru  
1 – měnič impedance,  
2 – filtr vyšších  
harmonických,  $Q_k$  – celkový  
kompenzační výkon  
kondenzátorů,  $Q_t$  – jalový  
výkon měniče impedance –  
tlumivky,  $Q$  – celkový  
výsledný kompenzační  
výkon  $Q = Q_k - Q_t$ ,  
3 – přívod

## 5.5. TECHNICKÉ A EKONOMICKÉ DŮSLEDKY KOMPENZACE ÚČINNÍKU

### 5.5.1. Technické důsledky kompenzace účinníku

Úbytek napětí v síti. Při velkém odběru jalové energie spotřebiči se úbytek napětí v síti zvětšuje. Úbytek je dán rozdílem napětí v síti na začátku a na konci vedení.

Zkratové poměry v síti. Při špatném účinníku musí být buzení strojů velké, protože vzniká indukční odběr z elektrárny. Proto je případný zkratový proud velký a trvalý a zvětšuje se i nárazový zkratový proud a stejnosměrná (nesouměrná) složka.



## 5.5.2 Ekonomické důsledky kompenzace účinníku

Využití elektrického zařízení. Velký odběr jalové energie zhoršuje využití elektrických zařízení, jako např. u alternátoru zeslabuje buzení magnetů, a proto je třeba zvětšovat budící proud. V některých případech už budič svým výkonem nestačí křýt zvětšování budícího proudu, proto napětí na svorkách generátoru klesá a stroj se musí odstavit z provozu.

Investiční náklady na elektrické zařízení. Se zhoršujícím se účinníkem stoupají investiční náklady na zajištění elektrických zařízení. Zvětšuje se hmotnost generátorů, transformátorů, spojovacích kabelů, kondenzátorových baterií i ztráty elektrické energie.

Tepelné ztráty elektrických zařízení. Zdánlivý proud způsobuje tepelné ztráty, a to jeho činná i jalová složka. Tepelné ztráty vzrůstají s druhou mocninou účinníku. Oteplují se alternátory, vedení, transformátory. Celková účinnost přenosu elektrické energie se zhoršuje.

## 6. Poruchové stavy v elektrických sítích a zařízeních

### 6.1. PŘEPĚTÍ

#### 6.1.1. Vznik a charakter přepětí v elektrických soustavách

Zařízení elektrické soustavy se při dimenzování navrhuji na určitou napěťovou hladinu. Její velikost je dána jmenovitým provozním napětím. Při návratích elektrických zařízení považujeme jmenovité napětí za nejvyšší provozní napětí elektrické soustavy.

Jestliže se zvýší napětí mezi fázemi nebo mezi fází a zemí (nad jmenovitou provozní hodnotu), hovoříme o přepětí. Podle jeho vzniku rozlišujeme přepětí na:

- a) *spínací* (vnitřní, provozní),
- b) *atmosférické* (vnější – venkovní).

Vnitřní přepětí vznikají při poruchovém provozu nebo při spínání za normálního chodu v přenosových a rozvodných systémech. Nejčastěji se vyskytují při odpinání kapacitních nebo indukčních obvodů pojistkou nebo vypínačem. U zemních spojení a při zkratech v sítích vn, vvn, zvn se objevují provozní přepětí (vnitřní). U zemních spojení nastává v izolovaných nebo kompenzovaných soustavách zvýšení napětí nepostižených fází a uzlu, proti zemi. Zemní spojení ovlivňují sdílovací vedení.

Zemní spojení je často doplněno obloukem, který se v důsledku napětí posunuté fáze zapaluje a zhasíná, neboli jde o přerušované zemní spojení. Tímto přerušováním a zapalováním se izolace unavuje, takže vznikají další průrazy. U zemního spojení dosahuje přepětí trojnásobku až čtyřnásobku jmenovitého napětí rozvodné a přenosové soustavy. Z místa vzniku přepětí se šíří na obě strany jako proudová a napěťová vlna, jejíž velikost se mění na rozhraní dvou impedancí. Rychlost šíření proudových a napěťových vln vypočítáme podle vztahu

$$v = \frac{1}{\sqrt{CL}} \quad (\text{km} \cdot \text{s}^{-1}; \text{F} \cdot \text{km}^{-1}, \text{H} \cdot \text{km}^{-1})$$

kde  $C$  je kapacita vedení,  
 $L$  indukčnost vedení.