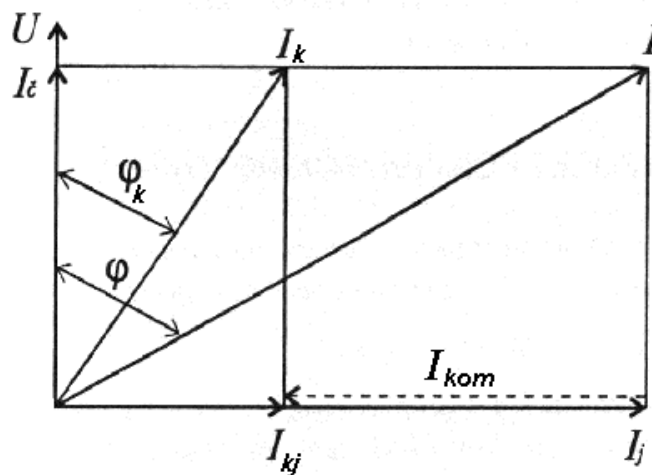


7. Kompenzace účinníku v průmyslových sítích

7.1 Význam kompenzace účinníku

Při stále větší spotřebě elektrické energie vstupují do popředí snahy nalézt způsoby, jak snížit ztráty při přenosu a rozvodu elektrické energie. V průmyslových závodech je nejvýznamnějším způsobem šetření energie kompenzace účinníku. Průmyslová spotřeba zatěžuje síť jalovým odběrem. Nejčastěji používaným spotřebičem v průmyslu je asynchronní motor. K tomu, aby byla v motoru činná složka elektrické energie přeměněna na práci, musí motor ze sítě odebírat i jalovou složku nezbytnou k vytvoření magnetického pole v motoru. Přívodní vedení ke spotřebiči je pak zatěžováno nejen činnou, ale i jalovou složkou proudu. Rozvodná zařízení se musí tedy dimenzovat na hodnotu zdánlivého proudu I . Přenos jalového proudu zvyšuje úbytky napětí a také činné ztráty v rozvodu, které jsou úměrné I^2 . Vyrobit-li se jalový proud (výkon) v blízkosti induktivního spotřebiče, sníží se výrazně velikost zdánlivého proudu I v přívodních vedeních (obr. 7.1).

Výroba jalové energie v místě nebo v blízkosti její spotřeby, jejíž cílem je snížení případně zcela potlačení jalové složky proudu v rozvodných sítích, se nazývá **kompenzace účinníku**, nebo také **kompenzace jalového výkonu**.



Obr. 7.1 Účinek kompenzace účinníku – fázorový diagram

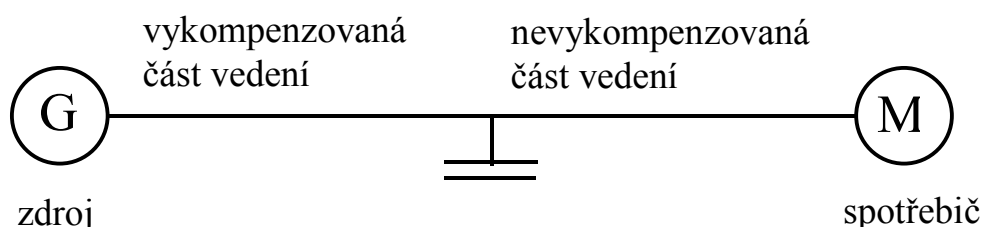
Činná složka proudu $I_c = I \cos \varphi$

Jalová složka proudu $I_j = I \sin \varphi$

Účinník $\cos \varphi = \frac{I_c}{I} = \frac{P}{S}$

Kompensace účinníku se provádí paralelním připojením kompenzačního zařízení ke spotřebiči. Ke kompenzaci se používají kondenzátory, synchronní kompenzátory, mezi relativně nová zařízení pak patří aktivní filtry.

Vliv kompenzace se projevuje jen v části soustavy mezi zdrojem a místem připojení kompenzačního zařízení (obr.7.2), avšak účinník spotřebiče zůstává i po kompenzaci nezměněn.



Obr. 7.2 Vliv kompenzace

Kompensací účinníku indukčních spotřebičů se obecně dosáhne:

- dimenzování zařízení na nižší průchozí proudy, z toho vyplývají nižší pořizovací náklady na rozvodná zařízení (např. při účinníku 0,8 jsou pořizovací náklady vyšší zhruba o 10%, při účinníku 0,6 o 45%, při účinníku 0,5 o 71% než při účinníku 1,0)
- lepší využití rozvodných zařízení, z toho vyplývá oddálení investic do nových rozvodných zařízení
- snížení přenosových ztrát ve vedeních a transformátorech $\Delta P \sim RI^2$
- zlepšení napěťových poměrů $\Delta U \sim I$
- zlepšení zkratových poměrů v síti (nižší budící napětí generátoru související s menším požadavkem na výrobu jalové energie, má za následek i nižší nárazové a trvalé zkratové proudy v síti)
- odlehčení generátorů, resp. budičů, které jsou zdrojem jalové energie.

Často lze zlepšit účinník i bez kompenzace provedením těchto opatření:

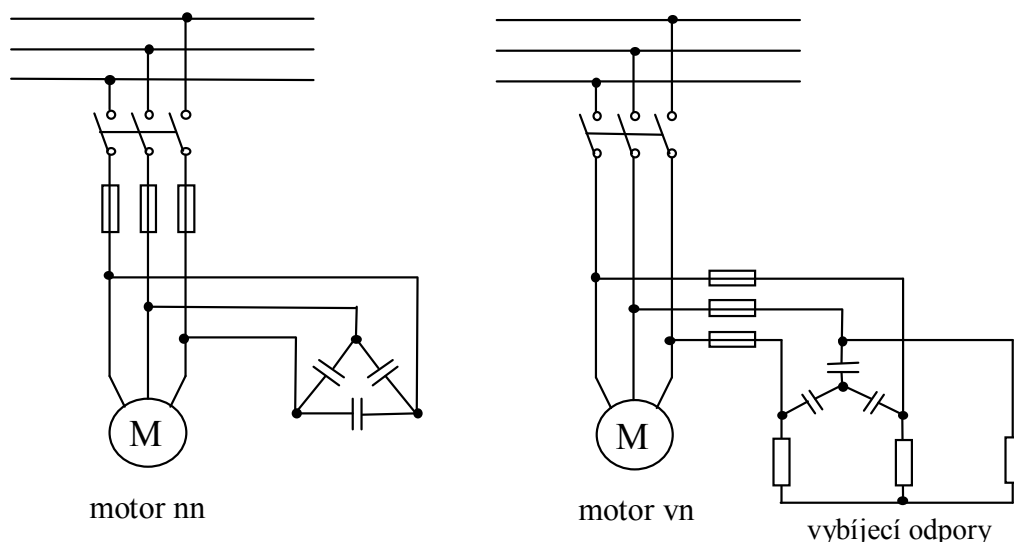
- použití synchronních motorů místo asynchronních (vhodné pro výkony motorů 100 kW a více s trvalým chodem, buzením motoru lze měnit odebíraný jalový výkon ze sítě)
- nahrazení málo zatížených motorů motory o menším výkonu (potřeba jalového výkonu se zvyšuje s rostoucím výkonem motoru a je přibližně stejná, ať je motor zatížen úplně, částečně nebo vůbec. Předimenzované motory i transformátory pracují s nízkým účinníkem)
- omezení chodu motorů a transformátorů naprázdno (při chodu naprázdno pracují stroje s nízkým účinníkem, např. nezatížené transformátory představují téměř čistou jalovou zátěž s účinníkem 0,1 až 0,2)
- připojení málo zatížených motorů na nižší napětí.

7.2 Druhy kompenzace účinníku a její návrh

Paralelní kompenzace účinníku kondenzátory se provádí těmito způsoby:

7.2.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

Každý spotřebič indukčního výkonu se opatří vlastním vhodně dimenzovaným kondenzátorem. Norma ČSN 33 3080 uvádí, že se individuální kompenzaci musí dávat přednost.



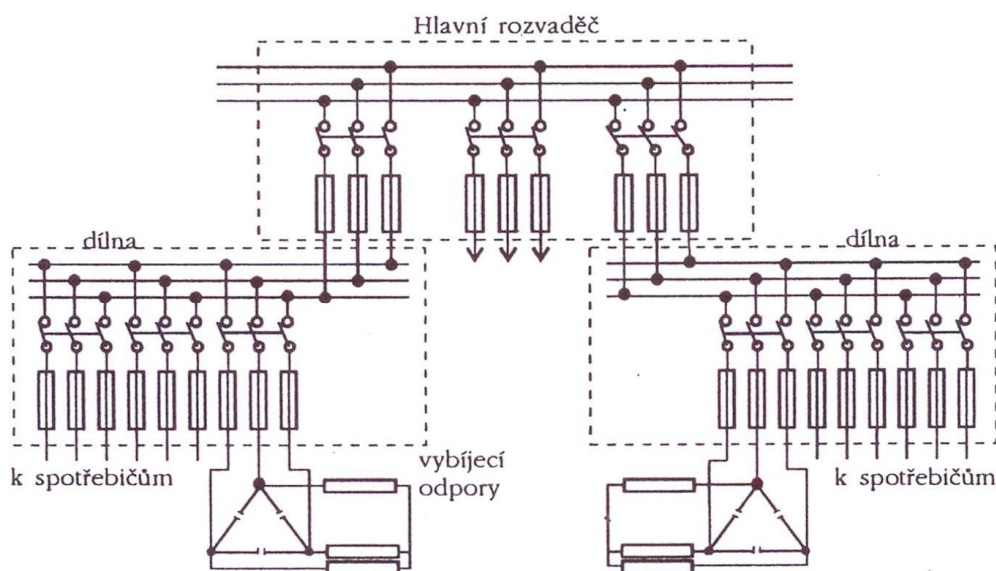
Obr. 7.3 Připojení kompenzačních kondenzátorů k motorům nn a vn

- Výhody:
- odlehčení vedení až ke spotřebiči
 - snížení úbytku napětí na přívodním vedení ke spotřebiči
 - není potřeba automatické regulace jalového výkonu, výkon kondenzátorů je navržen podle výkonu spotřebiče
 - jednodušší a provozně spolehlivější než ostatní způsoby kompenzace
- Nevýhody:
- u málo používaných spotřebičů je využití kondenzátorů nízké
 - nebezpečí překompenzování u spotřebiče s měnícím se zatížením
 - vyšší náklady na kompenzaci, zejména při používání spotřebičů s nižším využitím
 - vzhledem k rozptýlenému umístění kondenzátorů je kontrola a údržba kondenzátorů obtížnější
 - prostorová náročnost
- Použití:
- pro motory nad 5 kW s vysokým časovým využitím (pro běžné hodnoty účinníku asynchronních motorů 0,75 až 0,80 se kompenzační výkon pohybuje v rozmezí 30 až 40% činného příkonu motoru, což zhruba odpovídá jalovému výkonu motoru v chodu naprázdno)

- z důvodu bezpečnosti nelze použít u jeřábových motorů
- u motorů s přepínáním Y-D při rozběhu se kondenzátory připojují až po sepnutí vinutí do D
- od individuální kompenzace lze ustoupit při nízké době využití spotřebiče (nižší než 1000h/r)
- u transformátorů z důvodu kompenzace indukčního výkonu naprázdno (kondenzátory se připojují mezi sekundární svorky a vypínač, u vstupních transformátorů připojených k veřejné distribuční síti se kompenzační výkon volí podle indukčních ztrát naprázdno, u transformátorů s normálními plechy platí tato povinnost od velikosti 50 kVA včetně a u transformátorů s orientovanými plechy od velikosti 250 kVA včetně, u běžných transformátorů se volí kompenzační výkon asi 5% zdánlivého výkonu transformátoru). Je-li proud naprázdno menší než 3%, má transformátor orientované plechy.

7.2.2 Skupinová kompenzace

Kompenzační baterie se připojují na přípojnice skupinového rozváděče napájejícího několik spotřebičů. Velikost baterie je navržena na kompenzaci soudobého odebíraného výkonu (ne součtu instalovaného výkonu spotřebičů). Baterie je většinou rozdělena na více samostatně ovladatelných skupin kondenzátorů, tzv. stupňů.



Obr. 7.4 Skupinová kompenzace

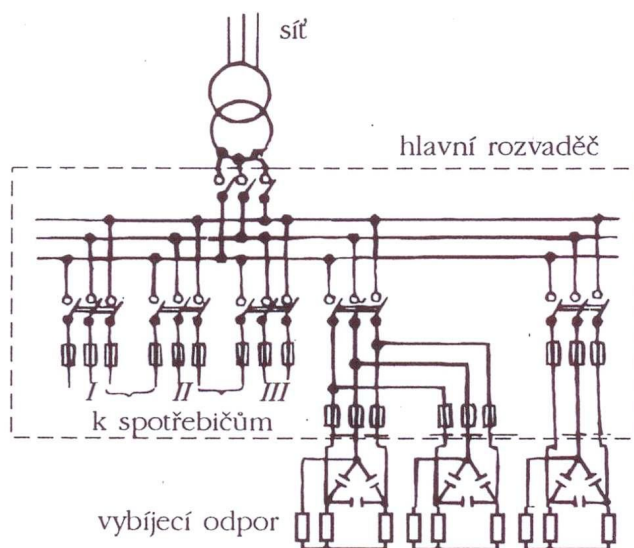
- Výhody:
- lepší využití instalovaných kondenzátorů oproti individuální kompenzaci
 - odlehčí se vedení od vstupní rozvodny ke skupinovému rozváděči

Nevýhody: - vedení od skupinového rozváděče ke spotřebiči není kompenzováno
- nutnost opatřit kondenzátory spínacími prvky a jištěním
- nutnost řízení velikosti kompenzačního výkonu, tj. nutnost automatické regulace jalového výkonu

Použití: - nejčastěji v rozvodu nízkého napětí
- skupiny motorů s výkonem pod 5 kW, s nízkým časovým využitím

7.2.3 Ústřední (centrální) kompenzace

Indukční výkon se kompenzuje centrálně pro celý průmyslový závod připojením kondenzátorových baterií na přípojnice vstupní rozvodny nebo hlavního rozváděče. Velikost dodávaného jalového výkonu se reguluje automaticky pomocí regulátorů jalového výkonu.



Obr. 7.5 Centrální kompenzace

Výhody: - menší potřebný kompenzační výkon

Nevýhody: - potřeba rozváděče vybaveného regulační automatikou
- rozvod uvnitř závodu je nevykompenzován

Použití: - menší průmyslové závody s málo proměnlivým zatížením

7.2.4 Smíšená kompenzace

Smíšená kompenzace je nejčastějším řešením kompenzace účinníku v průmyslových závodech. Například v průmyslovém závodě se u velkých motorů s trvalým chodem použije individuální kompenzace, u skupin malých motorů s kratší dobou chodu se použije skupinová kompenzace a v hlavní transformovně se dokompenzuje na požadovanou hodnotu účinníku centrální kondenzátorovou baterií.

Obecně nelze říci, který druh kompenzace účinníku je nejvýhodnější. Obvykle se navrhne více alternativ kompenzace a posoudí se nejvýhodnější varianta z technického i ekonomického hlediska.

7.3 Stanovení potřebného kompenzačního výkonu

Při návrhu kompenzace se vychází ze středních hodnot výkonů a účinníku. Střední výkony a účinník se určí z údajů elektroměrů naměřených za určitou dobu:

$$P = \frac{A_e}{t} \quad Q = \frac{A_j}{t} \quad \cos \varphi = \frac{A_e}{\sqrt{A_e^2 + A_j^2}} = \frac{P}{S}$$

U nově budovaných zařízení údaje elektroměrů nejsou k dispozici. Veličiny potřebné pro výpočet kompenzačního výkonu se určují z instalovaného výkonu, soudobosti a účinníku zařízení.

Kompenzační výkon musí být úměrný spotřebě jalové energie v daném provozu, max. doporučená rezerva výkonu je 25 až 30%. Navržená kompenzace obvykle vyhoví při plném zatížení. Při odlehčení strojů je nutné stupeň kompenzace překontrolovat, aby nedošlo k překompenzování.

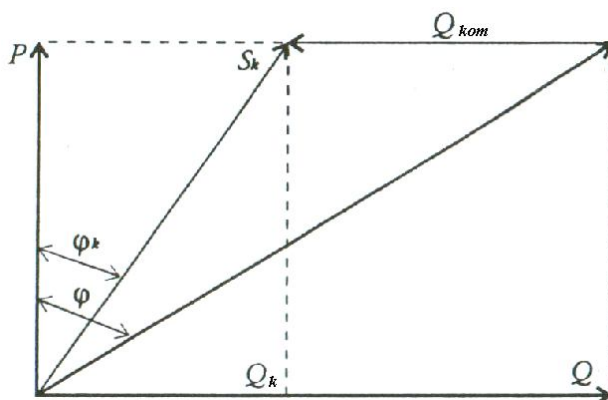
Dále bude dodržena tato indexová konvence:

bez indexu – stav před kompenzací, index k – stav po kompenzací.

Výpočet potřebného kompenzačního výkonu se liší podle cíle, který se kompenzací sleduje:

Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku

Známe hodnoty těchto veličin: zdánlivý výkon S , činný výkon P , účinník $\cos \varphi$ před kompenzací a účinník $\cos \varphi_k$ po kompenzací.



Obr. 7.6 Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku

Z digramu je patrné, že požadovaný kompenzační výkon se určí jako rozdíl mezi jalovým indukčním výkonem před kompenzací Q a po kompenzací Q_k :

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P \cdot \operatorname{tg} \varphi - P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k).$$

Kompence podle požadovaného zmenšení zdánlivého výkonu

Známe tyto veličiny: zdánlivý výkon S , činný výkon P , účinník $\cos\varphi$ před kompenzací a zdánlivý výkon S_k po kompenzaci.

Fázorový diagram kompenzace podle požadovaného zmenšení zdánlivého výkonu je totožný s obr. 7.6.

Činný výkon před i po kompenzaci je stejný. Účinník po kompenzaci $\cos\varphi_k = \frac{P}{S_k}$.

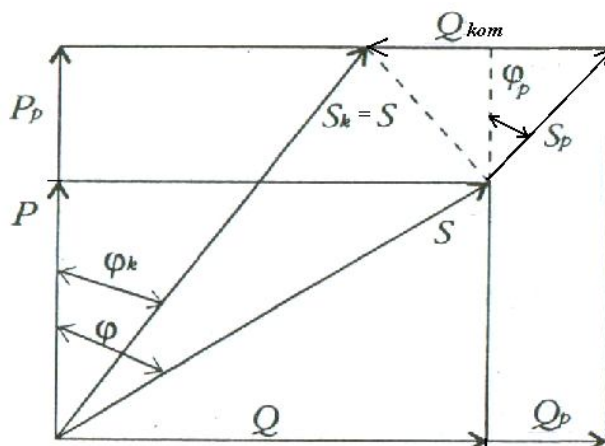
Požadovaný kompenzační výkon se určí jako rozdíl mezi jalovým indukčním výkonem před kompenzací Q a po kompenzaci Q_k :

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P \cdot \operatorname{tg}\varphi - P \cdot \operatorname{tg}\varphi_k = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k).$$

Kompence podle požadovaného zvětšení využití příkonu

Zdánlivý výkon zůstane po kompenzaci stejný, činný výkon se zvětší a tím se zlepší využití elektrických zařízení. Známe tyto veličiny: zdánlivý výkon S a účinník $\cos\varphi$ před kompenzací a činný výkon další připojované zátěže P_p . Zdánlivý výkon před i po kompenzaci je stejný. Účinník po připojení další zátěže

a po kompenzaci $\cos\varphi_k = \frac{P + P_p}{S_k} = \frac{P + P_p}{S}$.



Obr. 7.7 Kompence podle požadovaného zvětšení využití příkonu

Požadovaný kompenzační výkon se určí jako rozdíl jalového výkonu po připojení další nekompenzované zátěže ($Q + Q_p$) a jalového výkonu po připojení další zátěže a po kompenzaci Q_k :

$$Q_{kom} = (Q + Q_p) - Q_k = (P \cdot \operatorname{tg}\varphi + P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi_p) - (P + P_p) \cdot \operatorname{tg}\varphi_k$$

Jestliže chceme připojit spotřebiče stejného druhu (účinník spotřebičů $\cos\varphi_p$ je shodný s účinníkem stávající zátěže $\cos\varphi$), uvedený vztah se zjednoduší:

$$Q_{kom} = (P + P_p) \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k)$$

Podmínkou reálnosti kompenzace je, aby $P + P_p \leq S$.

Dalšími cíli, které kompenzace jalových výkonů sleduje, jsou např. zlepšení napěťových poměrů nebo zmenšení ztrát při přenosu. Stanovení požadovaného kompenzačního výkonu pro tyto účely nebudeme podrobněji uvádět.

7.4 Zařízení pro kompenzaci jalového výkonu

Nejčastěji používaným prostředkem ke kompenzaci účinníku jsou kondenzátory, resp. kondenzátorové baterie. Ke kompenzaci se používají i jiné prostředky, např. synchronní kompenzátory nebo aktivní filtry.

7.4.1 Zařízení využívající kondenzátory

Kompenzační rozváděče jsou rozváděče obsahující zařízení pro kompenzaci účinníku: kompenzační kondenzátory nebo baterie kondenzátorů, spínací a jisticí prvky, regulátor jalového výkonu a další pomocná zařízení. Jednotlivé kondenzátory či baterie kondenzátorů jsou připojovány nebo odpojovány stykači nebo vypínači ke kompenzovanému zařízení podle okamžité velikosti jalového výkonu. Spínání je řízeno regulátorem jalového výkonu. Kompenzační zařízení v sítích s vyšším obsahem energetického rušení jsou dále doplněna ochrannými, filtračními tlumivkami nebo hradicími členy.

Kompenzační kondenzátory

V kompenzačních zařízeních nn jsou používány 3f kondenzátorové jednotky, jejichž 1f svitky jsou zapojeny na sdružené napětí – do trojúhelníka. Kondenzátory pro vn jsou provedeny jako 1f nebo jako 3f zapojené do hvězdy (jednotlivé svitky jsou připojeny na fázové napětí - nižší napěťové nároky).

U kompenzačních kondenzátorů je nutné sledovat jejich hlavní parametry – teplotu, napětí, proud. Proud kondenzátoru je přímo úměrný napětí, kmitočtu a kapacitě. Přetížení kondenzátoru může vzniknout buď vyšší hodnotou provozního napětí (např. při umístění v blízkosti transformátoru) nebo zvýšeným napětím při výskytu vyšších harmonických v síti. Velikost proudu kondenzátoru nesmí trvale překročit 143% I_n . Z hlediska funkce kompenzačního zařízení je nutné kontrolovat, zda proud kondenzátoru neklesá pod I_n , tj. zda nepoklesla kapacita kondenzátoru v důsledku poruchy nebo stárnutí. Pokud dojde k poklesu proudu kondenzátoru o více než 20% I_n , je zapotřebí kondenzátor odpojit a vyměnit. Kontrolní měření se provádí nejméně jednou ročně.

Dříve se používaly baterie s papírovým dielektrikem. V současné době se používají kondenzátory s polypropylénovou fólií (MKV, MKP), které mají 3 svitky zapojené do trojúhelníka (starší typy 9-12 svitků) a ztráty 0,5 W/kVAr (starší typy 4 W/kVAr). Při poruše dielektrika těchto kondenzátorů dojde k „samohojení“ (izolování poškozeného místa) a nedojde k odpojení celého svitku, jak se dělo u starších typů kondenzátorů.

Určení kapacity kompenzačních kondenzátorů:

- zapojení do D (nejčastější zapojení): $C = \frac{Q_{kom}}{3\omega U^2}$

- zapojení do Y: $C = \frac{Q_{kom}}{\omega U^2}$

Regulátory jalového výkonu

Starší kompenzátory jsou ještě vybaveny elektromechanickými regulátory (např. WOR) pracujícími na principu běžných elektroměrů. Modernější elektronické regulátory (např. RQ, ERQ) jsou v současné době nahrazovány mikroprocesorovými regulátory. Většina elektronických regulátorů neměří jalový výkon ani velikost jalového proudu, ale jen časový rozdíl mezi průchody proudu a napětí nulou, tj. fázový posun.

V současné době se upouští od tzv. váhového spínání, kdy jednotlivé kompenzační stupně bylo možné spínat pouze v řadě za sebou. Kompenzační výkon byl rozdělen do jednotlivých stupňů např. v poměrech 1:2:4:8:16, aby bylo možné co nejjemněji pokrýt veškeré změny jalového výkonu. Moderní regulátory používají tzv. kruhové spínání. Kompenzační stupně jsou voleny zhruba stejně velké, popř. první dva stupně, které jsou nejčastěji spínané, mají poloviční výkon. Při kruhovém spínání se zásadně vypíná stupeň nejdéle zapnutý a zapíná se stupeň nejdéle vypnutý. Dochází tak ke snížení průměrného počtu spínacích operací a zvýšení životnosti spínacích prvků.

Vzhledem k častému výskytu energetického rušení v průmyslových sítích jsou na moderní regulátory jalového výkonu kladeny podstatně vyšší nároky na jejich elektromagnetickou odolnost než tomu bylo v minulosti.

Spínací prvky

Pro stupňovitě řízené kompenzátory nn se většinou používají stykače, jejichž hlavní kontakty jsou dimenzované na spínání kapacitních proudů. Tyto spínače jsou v provedení klasickém nebo s tzv. odporovým spínáním. Většinou se jedná o vzduchové stykače nebo vakuové stykače. U kompenzátorů vn se používají vypínače.

Plynule řízené kompenzátory využívají bezkontaktní polovodičové spínače, které jsou tvořeny antiparalelním zapojením výkonových tyristorů nebo tranzistorů. Doba reakce těchto spínačů je velmi nízká (20 ms).

Kompenzační zařízení se vyskytují v různých provedeních:

Individuálně připojené kondenzátory

V současné době se používají pouze ke kompenzaci jalového výkonu naprázdno silových transformátorů, nebo velkých motorů na hladině vn (kompenzační výkon odpovídá většinou jalovému výkonu motoru naprázdno).

Kompenzace pomocí nechráněných kondenzátorů není možné použít v průmyslových sítích s vyššími úrovněmi energetického rušení, zejména se zvýšeným obsahem vyšších harmonických (instalovaný výkon nelineárních spotřebičů přesahuje 10 až 15% celkového instalovaného výkonu). Stabilně připojené nechráněné kondenzátory odsávají ze sítě vyšší harmonické proudy, tím se nadměrně zahřívají a jsou potom častým zdrojem poruch. Dále existuje možnost vzniku rezonančních jevů. V současné době se v průmyslových sítích upřednostňují chráněné kondenzátory (kondenzátory doplněné ochrannými tlumivkami nebo hradicími členy).

Stupňovitě spínané kompenzátory s prostými kondenzátory

Tento způsob kompenzace je v současné době nejpoužívanějším v průmyslových sítích nn. Kompenzační výkon je rozdělen do stupňů, jejichž připínání je řízeno regulátorem jalového výkonu. Připínání dalšího stupně (kondenzátoru) je doprovázeno přechodovým dějem, jehož amplituda a frekvence jsou dány počátečním napětím připínaného kondenzátoru, okamžikem sepnutí a impedancí mezi zapnutými a připínaným kondenzátorem. Tato impedance je relativně malá (krátké vodiče či přípojnice mezi jednotlivými stupni) a amplituda nabíjecího proudu je vyšší než 100-násobek jmenovitého proudu kondenzátoru. Čím je impedance obvodu menší, tím má přechodový děj vyšší frekvenci a větší počáteční amplitudu.

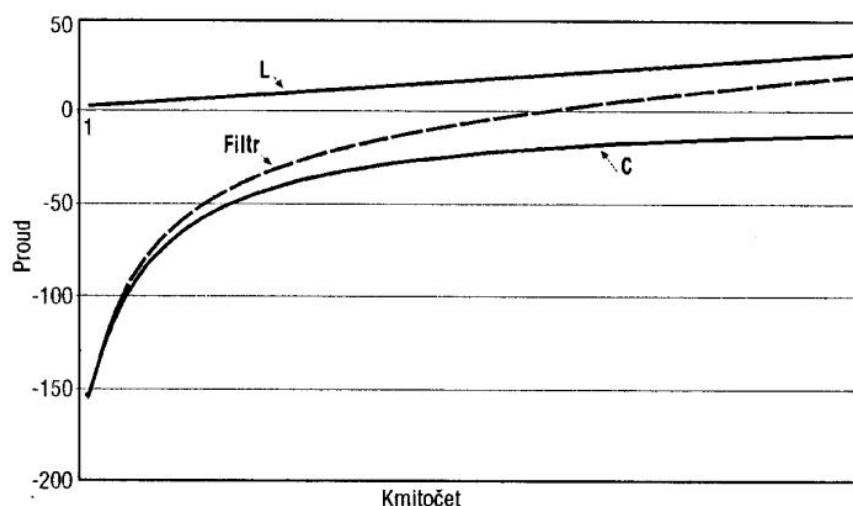
Omezení přechodového děje je možné provést vřazením vhodné impedance do série s připojovaným kondenzátorem. Trvalé připojení indukčnosti do obvodu se jeví jako ekonomicky i technicky náročné řešení a používá se pouze v případech, kdy je nutná eliminace rezonančních jevů (viz. další odstavec). Vhodnějším řešením je použití speciálně konstruovaných stykačů, tzv. stykačů s odporovým spínáním, které v první fázi přechodného děje krátkodobě vřadí odpor do série s připínaným kondenzátorem. Tyto stykače mají dvě sady kontaktů: pomocné kontakty připojí do obvodu odpor, který je obvykle součástí stykače, po několika milisekundách spínají hlavní kontakty, které překlenou vřazené odpory.

Na hladinách vn je tento způsob kompenzace používán zřídka, neboť to vyžaduje použití speciálních regulátorů jalového výkonu (regulátory používané pro hladiny nn nejsou vhodné) a zajištění správného jištění jednotlivých stupňů (klasické proudové ochrany, např. AT31X jsou na vyšší harmonické téměř necitlivé a v případě vzniku rezonance, kdy hrozí poškození kondenzátorů, kondenzátory nechrání).

Stupňovitě spínané kompenzátory s chráněnými kondenzátory

Při použití nechráněných (prostých) kondenzátorů může dojít k sériové rezonanci mezi kompenzačním kondenzátorem a reaktancí sítě (viz. obr. 7.8). Jestliže rezonanční kmitočet tohoto obvodu bude blízký kmitočtu některé vyšší harmonické vyskytující se v síti, může dojít k výrazné deformaci průběhu napětí

v místě připojení a proudovému i napěťovému přetížení kompenzačních kondenzátorů. Ve většině případů je možné rezonancím zabránit tak, že se kondenzátorům předradí ochranná tlumivka. Dojde tak k přeladění sériového obvodu reaktance sítě – kondenzátor s tlumivkou na jiný kmitočet, který se neshoduje s kmitočtem některé vyšší harmonické vyskytující se v síti.



Obr.7.8 Sériové spojení kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky

Stupeň kompenzátoru je tedy tvořen sériovým spojením kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky. Tím vzniká sériový rezonanční LC obvod s výslednou kmitočtovou charakteristikou (obr. 7.8) a rezonančním kmitočtem:

$$\omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Ochranná tlumivka musí být navržena tak, aby rezonanční kmitočet byl s dostatečnou rezervou pod kmitočtem nejnižšího řádu vyšší harmonické vyskytující se v síti (obvykle pod 200 Hz). Pro základní harmonickou (50 Hz) se tento obvod chová jako kondenzátor (obr. 7.8), pro kmitočty nad rezonančním kmitočtem se obvod chová jako indukčnost, která omezuje odsávání vyšších harmonických proudů ze sítě a chrání tak kompenzační kondenzátory před proudovým přetěžováním.

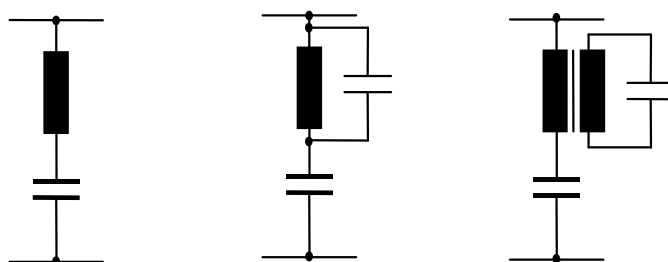
V těchto kompenzačních zařízeních je nutné používat kondenzátory dimenzované na vyšší jmenovité napětí, neboť vlivem vřazené indukčnosti se provozní napětí kompenzačních kondenzátorů zvýší. Osvědčilo se používat v jednom zařízení minimální počet kompenzačních stupňů (2 až 3).

Při návrhu rezonančního kmitočtu kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky je třeba vzít v úvahu i kmitočet signálu HDO používaného v dané síti. V případě, že rezonanční kmitočet bude blízký kmitočtu HDO, bude LC obvod pro kmitočet HDO představovat velmi malou impedanci, signál HDO bude ze sítě odsáván, což se projeví většími úbytky signálního napětí v síti a snížením úrovně signálního napětí v místě připojení kompenzačního zařízení. Jestliže ochranné

tlumivky nedokážou zabránit odsávání signálu HDO v dostatečné míře, je možné kompenzační zařízení doplnit hradicími členy (obr. 7.9). Hradicí člen je tvořen paralelním obvodem vyladěným na frekvenci HDO. Pro tuto frekvenci představuje velkou impedanci a odsávání signálu HDO kondenzátorem je omezeno. Hradicí členy se používají i u kompenzačních zařízení s prostými (nechráněnými) kondenzátory. Podrobněji o tomto problému pojednává podniková norma energetiky PNE 33 3430-6.

Obr. 7.9. Blokování kompenzačních kondenzátorů

a) blokovací tlumivka b) hradicí člen c) hradicí člen s transformátorovou vazbou



Stupňovitě spínané kompenzátory s kompenzačními filtry

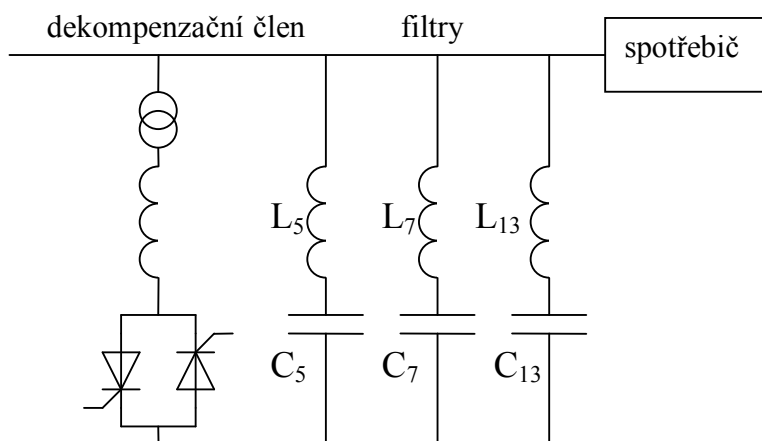
Vhodným návrhem jednotlivých prvků sériových LC obvodů lze sestavit nejen kompenzační stupně chráněné před nebezpečným proudovým přetěžováním vyššími harmonickými, ale i stupně, jejichž rezonanční kmitočet bude shodný s kmitočtem některé vyskytující se vyšší harmonické a tudíž budou úroveň této harmonické v průmyslové síti snižovat. LC obvod kompenzuje účinník a částečně také filtruje vyšší harmonické, proto se tato zařízení označují pojmem kompenzační filtry. Používají se především v průmyslových sítích vn (např. pánvové obloukové LF pece, indukční pece) a tam, kde by se použitím ochranných tlumivek nedosáhlo přípustné míry zkreslení napětí vyššími harmonickými. Jednotlivé sériové LC obvody (stupně) jsou naladěny na vyšší harmonické vyskytující se ve spektru proudu kompenzovaného spotřebiče, např. 5., 7., 11. atd. Při spínání stupňů se musí striktně dodržovat pořadí jednotlivých stupňů (kompenzační filtr naladěný na nejnižší kmitočet musí být odpínán jako poslední a připínán jako první). V případě, že nejprve bude připojen filtr naladěný na harmonickou nejvyššího řádu, bude tento filtr pro harmonické proudy nižších řádů, které ještě nejsou připojením dalších filtrů eliminovány, kapacitní reaktancí (obr. 7.8) a může dojít k nežádoucí paralelní rezonanci s reaktancí napájecí sítě. Tato rezonance může mít za následek zvýraznění některé harmonické složky napětí, což způsobí výraznou deformaci napětí v místě připojení spotřebiče a zvýšení rušení ostatních spotřebičů.

Stupňovitě spínané kompenzátory s bezkontaktními spínači

Klasický spínací prvek – stykač je v tomto případě nahrazen bezkontaktním polovodičovým spínacím prvkem. Bezkontaktní spínání je možné využívat v kompenzačních zařízeních s chráněnými i nechráněnými stupni. Masovějšímu nasazení těchto zařízení brání jejich cena odvozená od relativně technicky náročného elektronického vybavení, které by mělo zajistit spínání pokud možno bez přechodných jevů.

Plynule řízené kompenzační filtry

V současné době patří mezi technicky nejdokonalejší kompenzační prostředky. Tvoří je několik trvale připojených kompenzačních filtrů (sériový LC obvod naladěný na některou vyšší harmonickou), k nimž je připojen tzv. dekompenzační člen realizovaný řízenou tlumivkou. Velikost kompenzačního výkonu filtrů nelze měnit zvyšováním nebo snižováním kapacity kondenzátoru, neboť by došlo k rozladění LC obvodu. Výsledný kompenzační výkon je regulován pomocí fázově řízeného spínače napětí, na který je připojena dekompenzační tlumivka. Pomocí tlumivky lze kompenzační výkon filtrů pouze snížit.



Obr. 7.10 Plynule řízené kompenzační filtry

Toto zařízení, označované také jako filtračně kompenzační zařízení, umožňuje nejen dynamickou kompenzaci jalového výkonu, filtraci vyšších harmonických, ale také symetrizaci odběru a eliminaci flikru, způsobeného rychlými změnami činného i jalového odběru. Používá se pro kompenzaci elektrických svářecích zařízení.

7.4.2 Rotační synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátor je synchronní motor pracující bez mechanického zatížení. Změnou jeho buzení je možné v dostatečném rozpětí měnit spotřebu či dodávku jalové energie. V přebuzeném stavu představuje synchronní motor zdroj indukční jalové energie.

Synchronní kompenzátory jsou především používány v přenosových a rozvodných sítích vn a vvn jako prostředek pro kompenzaci jalových výkonů, k regulaci napětí a udržení stability sítě. Do sítě jsou zapojovány prostřednictvím transformátoru se třemi vinutími. Oproti kondenzátorům se u synchronních kompenzátorů při poklesu napětí zvyšuje odebíraný kapacitní jalový výkon, tím se zmenšuje úbytek napětí v síti a napětí se udržuje.

V rozsáhlejších průmyslových sítích rotační kompenzátory plní funkci centrální kompenzace na hlavní vstupní rozvodně. Jmenovité napětí synchronních kompenzátorů je obvykle 6 kV a k rozvodnám o vyšším napětí jsou připojovány přes transformátor. Jmenovité výkony synchronních kompenzátorů používaných v průmyslových závodech jsou v rozmezí 5 až 15 MVA_r.

S ohledem na jejich dobu reakce jsou vhodné ke kompenzaci průmyslových sítí, jejichž odběr jalového výkonu je víceméně stabilní nebo se mění bez dynamických rázů. V ostatních případech může docházet ke krátkodobému nedokompenzování nebo překompenzování, čímž se může ještě více zvýšit úroveň kolísání napětí. Synchronní kompenzátory nepotlačují ani nezvýrazňují harmonické zkreslení napětí, nejsou ani zdrojem ani filtrem vyšších harmonických. Z těchto důvodů nejsou vhodné pro kompenzaci elektrických obloukových pecí, regulovaných pohonů apod. S ohledem na provozní náklady jsou postupně v průmyslových sítích nahrazovány statickými kompenzačními prostředky.

7.4.3 Aktivní filtry

Aktivní filtry jsou v poslední době nejčastěji diskutovaným technickým prostředkem pro zajištění kompatibility ve výkonových systémech. Kromě kompenzace jalového výkonu plní i jiné funkce, např. odstranění kolísání napětí, potlačení zkreslení napětí vyššími harmonickými, potlačení vyšších harmonických v síti, symetrizaci napětí. Princip a druhy zapojení aktivních filtrů jsou podrobněji rozebrány v kap. 8.

Aktivní filtry se začínají teprve prosazovat a v současné době jsou používány především v rozvodech nn. Pro hladiny vn jsou aktivní filtry ve stadiu prototypových zařízení. Problémem jsou nízké hodnoty napětí (cca 3 až 5 kV), kterým odolají současné výkonové polovodičové součástky. Aktivní filtry jako rychlé kompenzátory účinníku jsou projektovány pro výkony řádově až stovky kVA.

Špatně navržené či provozované kompenzační zařízení může způsobit dodatečné kolísání napětí, například soustavným připínáním a odpínáním

kompenzačních stupňů. V případě použití nevhodných spínacích prvků bývá kompenzační zařízení významným zdrojem impulsního rušení v celé průmyslové síti.

Velmi závažným problémem je také vznik rezonancí. Stav, kdy se dostane do paralelní rezonance induktivní reaktance napájecího transformátoru s kapacitní reaktancí kompenzačního zařízení, je v průmyslových sítích velice častým jevem. Obvykle má za následek soustavné přetěžování zařízení a zkreslení napájecího napětí pro ostatní spotřebiče.

Stupňovitě regulované kompenzační zařízení může v případě nevhodného použití, např. pro kompenzaci spotřebičů s rychlými změnami odebíraného jalového výkonu, způsobit svým provozem podstatně vyšší kolísání napětí, než způsobuje sám kompenzovaný spotřebič. Kýžený efekt, snížení přenosových ztrát, se nedostaví, neboť odběr bude soustavně překompenzovaný nebo nedokompenzovaný.

Vhodně navržený a provozovaný kompenzátor může ve velké míře eliminovat negativní zpětné působení spotřebičů na napájecí síť (vyšší harmonické, kolísání napětí, nesymetrie).

7.5 Požadavky na kompenzaci jalového výkonu u odběratelů

Odběratelé (s výjimkou odběrů pro domácnosti) musí ze zákona provést taková opatření, aby odebírali elektrickou energii z veřejné rozvodné soustavy s hodnotou účinníku 0,95 až 1,0 induktivního charakteru, pokud ve smlouvě dodavatele s odběratelem nebylo dohodnuto jinak.

Dodavatel neodpovídá za kvalitu dodávané elektrické energie odpovídající doporučeným technickým normám, pokud odběratel odebírá elektrickou energii s účinníkem jiným než stanoveným zákonem nebo dohodnutým s dodavatelem. Dodavatel (distribuční energetická společnost) se může kdykoliv měřením přesvědčit o dodržení předepsaného účinníku. Organizace provozující závodní elektrárnu se synchronními generátory je povinna v denní době dodávat do veřejné sítě elektrickou energii s hodnotou účinníku 0,9, není-li smlouvou mezi organizací a distribuční společností určeno jinak. Obecně platí, že odběratel nesmí dodávat jalovou energii do veřejné sítě dodavatele bez jeho souhlasu. Výjimky lze dohodnout smluvně s dodavatelem.

Ceny elektrické energie jsou stanoveny pro odběry při účinníku 0,95 až 1,0 induktivního charakteru. Jak již bylo uvedeno, výjimečně může dodavatel povolit i účinník jiný. Pokud tato závazná hodnota účinníku nebude ze strany odběratele dodržena (nižší hodnota účinníku nebo účinník kapacitního charakteru), zaplatí odběratel dodavateli cenovou přírážku za ohrožení provozu soustavy a zvýšení ztrát v rozvodné síti. Tato cenová přírážka může přesáhnout i hodnotu 100% sazby za odebranou, resp. dodanou kVArh.