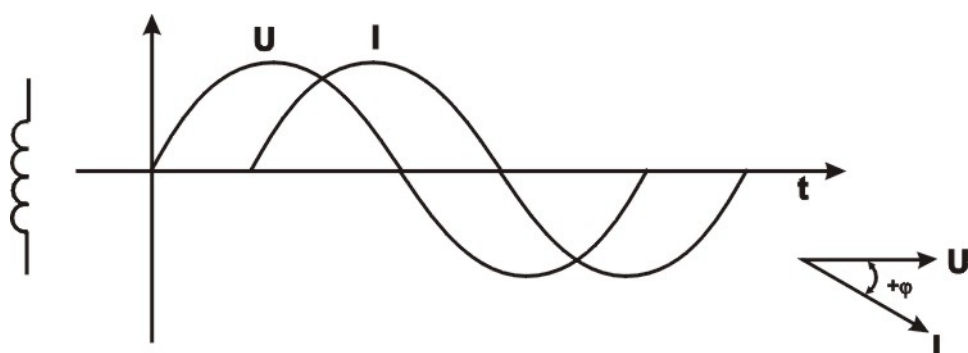
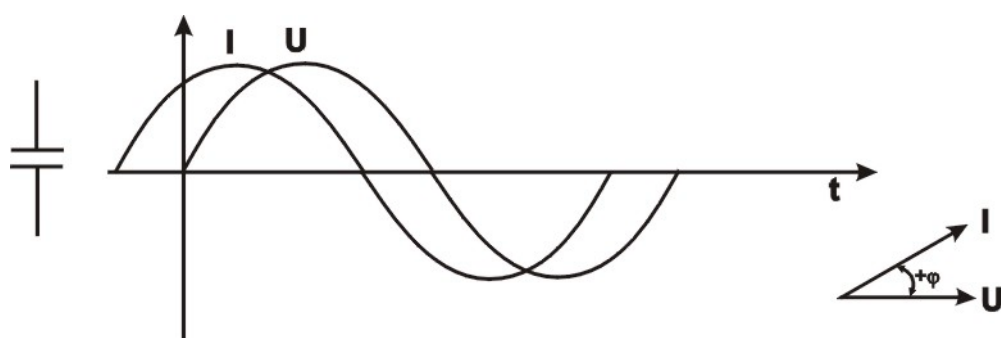


Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu

Výroba, přenos a rozvod a v neposlední řadě spotřeba elektrické energie jsou realizovány ve trojfázové střídavé soustavě. Pro provoz některých zařízení, ať už na straně elektrických sítí, nebo spotřebičů elektrické energie, je nutné vytvořit elektromagnetické nebo elektrické pole. To se vytváří buď vinutími (indukčností), nebo elektrodami (kapacitou). Na indukčnosti dochází k fázovému posuvu proudu za napětím, na kapacitě se fázově opožďuje napětí za proudem (viz. Obr. 1 a 2). Chování jednotlivých prvků elektrizační soustavy stejně jako spotřebičů elektrické energie je možné popsat jejich impedancí, která v sobě zahrnuje nejen složku činnou (ohmickou), ale i složku jalovou (induktivní nebo kapacitní).



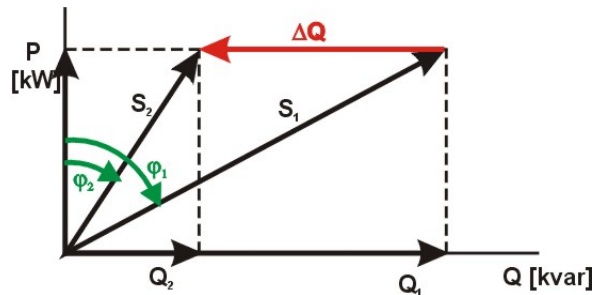
Obr. 1 Posuv napětí a proudu induktivních spotřebičů



Obr. 2 Posuv napětí a proudu kapacitních spotřebičů

Jalovou je nazývána z toho důvodu, že energii do této impedance vloženou nelze nikterak zužitkovat, ale přesto se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Při tomto přenosu však vznikají na jednotlivých prvcích přenosových a distribučních sítí ztráty, které jsou ve formě tepla uvolňovány do okolí. V některých případech se jeví jako velmi účelné vkládat do elektrických sítí další zařízení, obvykle kondenzátory, kterými se jejich charakter (a tedy i impedance) změní, a tím se ztráty částečně eliminují. Toto snížení ztrát nazýváme kompenzací jalového výkonu.

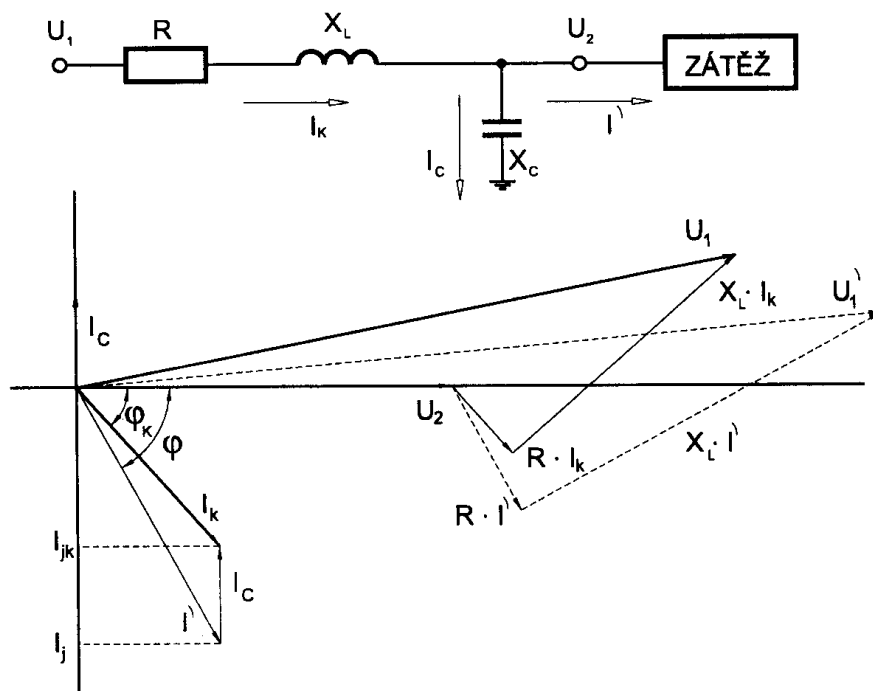
Posuv mezi proudem a napětím nám udává veličina nazvaná účinník, což je kosinus úhlu fázového posuvu mezi 1. harmonickou napětím a proudem.



Obr. 3 Snížení fázového posunu

Z obrázku vidíme, že kosinus uhlu φ je podíl činného výkonu k výkonu zdánlivému. Vložení kondenzátoru do obvodu se zdánlivým výkonem S_1 a účínkem $\cos\varphi_1$ snížíme jalový výkon Q_1 na hodnotu Q_2 . Snížení proběhlo za přispění jalového výkonu ΔQ dodávaného kondenzátorem.

Jako matematický model kompenzace jalového výkonu použijeme střídavou síť s paralelním kondenzátorem. Na tomto zapojení a k němu příslušnému fázorovému diagramu jasně vidíme, že po připojení kondenzátoru dojde ke změně fázoru proudu (z I' na velikost I_K).



Obr. 4 Střídavá síť s paralelním kondenzátorem

Celkový proud vedení se potom změnil na

$$\bar{I}_K = \bar{I}' + \bar{I}_C$$

Za předpokladu, že činný výkon zůstane konstantní, se změnil po připojení kondenzátoru fázový posuv z hodnoty φ na hodnotu φ_K a poměr jalových složek proudů I_{jK} a I_j bude stejný jako tangenty příslušných úhlů.

$$\frac{I_{jK}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_K}{\operatorname{tg}\varphi} = k$$

kde k nazýváme koeficientem kompenzace.

Tzv. stupeň kompenzace obdržíme, odečteme-li koeficient kompenzace od jedné.

$$k_p = 1 - k = \frac{I_j - I_{jK}}{I_j} = \frac{I_C}{I_j} = \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Výkon kondenzátoru potřebný ke změně fázového posuvu z hodnoty φ na hodnotu φ_K :

$$Q_C = U \cdot I_C = U_2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K)$$

Ztráty ušetřené kompenzací:

$$\Delta P_{u\dot{s}} = \Delta P - \Delta P_K = \frac{R}{U_s^2} \cdot [(P^2 + Q^2) - P^2 + (Q - Q_C)^2] = \frac{R}{U_s^2} \cdot [Q_C \cdot (2Q - Q_C)]$$

Snížení ztrát v procentech ztrát původních v důsledku vykompenzování odběru s původním účinníkem $\cos \varphi$ na $\cos \varphi_K$, čili ztráty ušetřené kompenzací lze také vypočítat jako:

$$\Delta P_{u\dot{s}\%} = (\Delta P - \Delta P_K) \cdot \frac{100}{\Delta P} = \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_K} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot 100 = 100 \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_K} \right)$$

A stejně tak i procentní snížení velikosti úbytku napětí oproti stavu před kompenzací:

$$\Delta U_{\%} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_K} \right)$$

Z hlediska jejího připojení do sítě rozlišujeme kompenzaci:

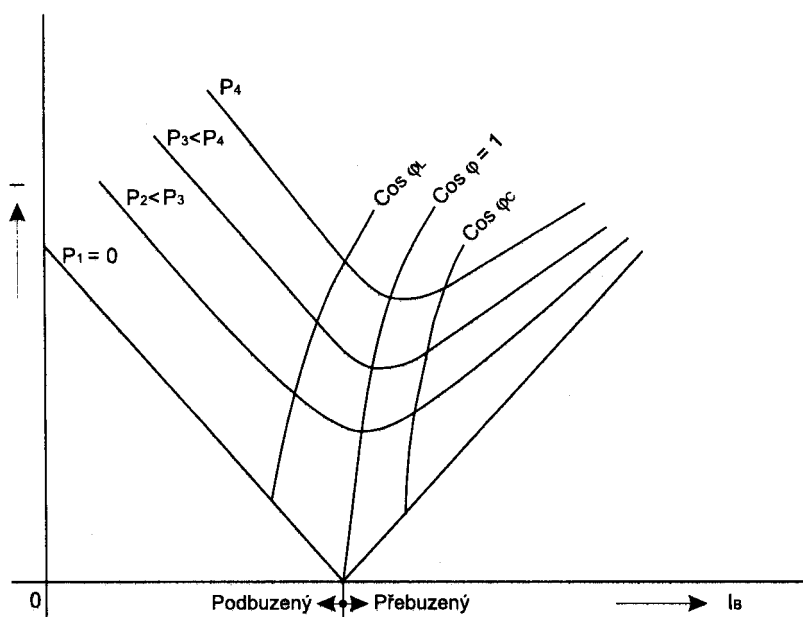
- *individuální*. Kompenzační zařízení je v tomto případě připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Od jalového výkonu je odlehčená celá elektrizační soustava od zdroje až po spotřebič. Úspory ztrát jsou nejvyšší, avšak využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzovaného zařízení. Používá se např. pro kompenzaci magnetizačního proudu asynchronního motoru a transformátorů, kompenzace zářivkových a výbojkových svítidel.
- *skupinovou*, kdy je kompenzační zařízení připojeno na přípojnících rozvaděče pro skupinu spotřebičů. Například je to kompenzace na hlavních rozvaděcích vn/nn v rozvodech průmyslových podniků. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od tohoto rozvaděče ke zdroji. Vzhledem k soudobosti spotřebičů vychází kompenzační výkon menší a je nutná jeho regulace.
- *centrální*, pokud je kompenzace připojena na přípojnici vstupní trafostanice podniku. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon. Rovněž je nutná regulace a většinou je třeba řešit kompenzaci na úrovni vysokého napětí, což představuje vyšší náklady.
- *kombinovaná kompenzace* je logickou kombinací předchozích variant. Ve skutečnosti bývá poměrně dost rozšířená, zejména v rozsáhlých průmyslových sítích.

Základní rozdělení technických prostředků pro kompenzaci jalového výkonu

1. Rotační kompenzační zařízení

Mezi rotační kompenzační zařízení patří synchronní kompenzátory a synchronní motory. Synchronní elektrický stroj se vyznačuje zejména tím, že se mu magnetizační energie dodává samostatným budícím vinutím napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu.

Synchronní elektromotory se používají v aplikacích, kde lze očekávat poměrně stabilní zátěžný moment, tedy například pro pohony čerpadel, kompresorů, ventilátorů, rotačních pecí apod. Měníme-li velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí o stálém kmitočtu, je za předpokladu konstantního zátěžného momentu stálý i činný výkon motoru. Změnou velikosti budícího proudu ale můžeme měnit účinnost odběru motoru, a to jak v oblasti induktivní, tak i v oblasti kapacitní. Závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu má tvar tzv. V-křivek – viz obrázek.



Obr. 5 V-křivky synchronního stroje

K dosažení stálého účinníku při různém zatížení je třeba vhodným způsobem řídit budící proud. Regulátory, jimiž se synchronní motory často osazují, mohou zajistit chod motoru i při změnách činného zatížení buď z konstantním účinníkem, nebo konstantním jalovým výkonem.

Těchto vlastností synchronních motorů lze velmi účelně využít ke kompenzaci jalového výkonu paralelně připojených spotřebičů. V případě, že je to ekonomicky zdůvodnitelné jsou pro kompenzaci jalového výkonu používány synchronní kompenzátory. Jsou to vlastně synchronní motory pracující naprázdno, tedy z minimálním činným výkonem a relativně z velkým rozsahem regulace jalového výkonu.

Synchronní stroje sloužící ke kompenzaci jalového výkonu jsou převážně konstruovány pro hladiny vysokého napětí – obvykle pro síť 6 kV. Přestože budící

soupravy synchronních strojů tvoří moderní a velmi rychlé řízené usměrňovače, je i ve spojení s rychlými regulátory jalového výkonu odezva na potřebu změny jalového výkonu zatížena jistým zpožděním. Synchronní stroje jsou tedy zcela nevhodné ke kompenzaci spotřebičů, jejichž spotřeba jalového výkonu se dynamicky mění, jako například u obloukových pecí, dynamicky řízených reverzačních stejnosměrných pohonů apod. V těchto případech dochází v době, než synchronní stroj díky zpoždění zvýší svůj kompenzační výkon, k nedokompenzování, zatímco ještě po jistou dobu, kdy již potřeba kompenzačního výkonu pominula, dále tento výkon dodává. To má negativní dopad na výsledné kolísání napětí, které na změnách jalového výkonu závisí.

Vzhledem k vysokým jednotkovým výkonům synchronních strojů (přibližně od 1 do 15 Mvar) a pomalejší regulaci jalového výkonu oproti jiným kompenzačním zařízením se tyto stroje využívají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. Připojují se k přípojnícím podružným průmyslovým rozveden 6 kV nebo přes samostatný transformátor 22/6 kV k přípojnícím hlavním rozveden.

Kompenzace jalového výkonu pomocí synchronních strojů je v poslední době v útlumu. Provoz synchronních strojů je spojen se spotřebou činné energie, vyššími nároky na údržbu zařízení a v neposlední řadě vyššími nároky na obestavěný prostor a jeho vybavenost oproti kompenzačním zařízením statickým.

2. Statické kompenzátory

Na rozdíl od rotačních kompenzátorů nejsou statické kompenzátory závislé na dodávce činné energie. V klasickém pojetí jsou tvořeny pasivními kompenzačními prvky, jako jsou výkonové kondenzátory. V pojetí novém to jsou tzv. aktivní filtry.

2.1. Prosté kondenzátory

Jedním z mnoha typů výkonových kondenzátorů je kondenzátor určený pro zlepšení účinnosti elektrických zařízení na střídavý proud. Je to kondenzátor, jehož použití vyžaduje zabezpečení zejména těchto tří hlavních požadavků:

1. tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu,
2. odolnost proti přepětí,
3. spolehlivost a bezpečnost provozu.

Existují další typy výkonových kondenzátorů, jako vazební, impulsní, rázové, odrušovací, komutační a jiné. U nich se sleduje např. též odolnost proti velkým impulsním proudům, vlastní indukčnost, napěťová stabilita atd. Věnujme se však základním vlastnostem výkonových kondenzátorů určených pro kompenzaci jalového výkonu, z nichž hlavní je jalový výkon kondenzátoru při různých způsobech zapojení.

Po připojení na napětí má jednofázový kondenzátor jalový výkon Q_c podle vztahu:

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C$$

kde

ω ... úhlová rychlost (pro 50 Hz to je hodnota $100 \cdot \pi$),

C ... kapacita kondenzátoru.

Dále víme, že

$$Q_c = U \cdot I$$

a z toho pak

$$Q_c = \frac{I^2}{\omega \cdot C}$$

kde $U, I \dots$ efektivní hodnoty napětí a proudu.

Pro trojfázový kondenzátor zapojený **do trojúhelníka** platí

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D$$

dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

a z toho pak

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D}$$

Analogicky pro zapojení kondenzátorů **do hvězdy** platí

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_Y$$

dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

a z toho pak

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y}$$

Podmínkou pro platnost předchozích výrazů je symetrie trojfázového zapojení, tj. stejné hodnoty všech kondenzátorů.

Kvalitu kondenzátorů výrazně ovlivňují ztráty. Ztráty sestávají z několika komponent, např. ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů atd. Ztráty jsou reprezentovány tangentou ztrátového úhlu kondenzátoru $\text{tg}\delta$. Ten udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinusovém napětí a kmitočtu. Celkové ztráty kondenzátoru můžeme stanovit z rovnice:

$$P_Z = Q_C \cdot \text{tg}\delta,$$

pokud vycházíme ze sinusového průběhu napětí. Tangenta ztrátového úhlu je rozdílná pro různé technologie výroby. Tangenta ztrátového úhlu rovněž závisí na teplotě, a to tak, že roste nejenom s rostoucí teplotou, ale i s teplotou klesající pod 0 °C.

Pro neharmonický průběh je třeba uvažovat ztráty pocházející od všech harmonických. Potom pro celkové ztráty kondenzátoru platí:

$$P_S = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \text{tg}\delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \text{tg}\delta, \quad \text{kde}$$

n ... řád harmonické,

U_n ... napětí harmonické,

f_n ... kmitočet harmonické.

Velký vliv na životnost kondenzátorů má provozní teplota. Nadměrná teplota zrychluje elektrochemickou degradaci dielektrika. Velmi rychlé změny teploty mohou vyvolat degradaci částečnými výboji v dielektriku. Kde není možné zajistit vhodné podmínky chlazení, musí být použity kondenzátory speciální nebo s vyšším jmenovitým napětím.

Další významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost jejich impedance. Kapacitní reaktance X_C , která je jalovou složkou impedance, je dána vztahem:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C},$$

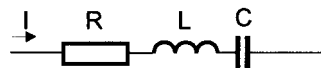
kde opět $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se kmitočtem reaktance klesá. Připojíme-li tedy kondenzátor do sítě, kde budou kromě zdrojů proudu základního kmitočtu i zdroje harmonických, bude pro ně tento kondenzátor představovat velmi nízkou impedanci. Celková efektivní hodnota proudu protékaného kondenzátorem vlivem harmonických vzroste a tento proud bude přetěžovat jednak samotný kondenzátor, ale i části sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem.

Prosté kondenzátory lze použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích nízkého i vysokého napětí s malými úrovněmi energetického rušení, tj. v sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů nepřesahuje 10 až 15% výkonu napájecího transformátoru.

2.2. Chráněné kompenzační sekce

Základní zapojení kompenzačního obvodu lze redukovat na velmi jednoduchý sériový článek RLC. Toto zapojení je popisováno v každé příručce a učebnici elektrotechniky. Přesto řada odvození a z nich prakticky použitelné vztahy běžně publikovány nejsou. Proto je zopakujeme a provedeme některé úpravy pro praktické potřeby.



Obr.6

Jednoduchý sériový RLC článek

Je zřejmé, že součástky dle obr. 6 jsou schopny funkce v širokém spektru kmitočtů, v němž mají zvláštní postavení jmenovitý pracovní kmitočet f_N a rezonanční kmitočet f_r .

Zavedeme nejprve pomocné veličiny:
řád harmonické (ve vztahu k oběma kmitočtům) n , takže **rezonance** nastává při:

$$n_r = \frac{f_r}{f_n}$$

a činitel ztlumení:

$$p = \frac{1}{n_r^2}$$

Ochranné tlumivky se aplikují za podmínky, že $X_L \ll X_C$, takže:

$$X_L = -p \cdot X_C$$

Činitel ztlumení p se udává buď v poměných číslech [-], nebo v procentech [%].
Je lhostejné, zda kompenzační kondenzátory jsou ve spojení Y nebo D, je však výhodné veškeré úvahy provádět ve vztahu k napětí fázovému, a tedy počítat s

fázovými reaktancemi kondenzátoru (X_{CN}), fázovými reaktancemi tlumivek (jedna cívka X_{LN}) a fázovým napětím U_{FN} pro běžné veřejné sítě je $U_{FN} = 400 \cdot \sqrt{3} = 231 \text{ V}$.

Reaktance kompenzačního článku:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C$$

Reaktance kompenzačního článku (kondenzátoru s příslušnou ochrannou tlumivkou) je při $f < f_r$, vždy nižší než výchozí reaktance kondenzátoru.

Kompenzační kondenzátory se u nás obvykle optimalizují na kmitočet $f_N = 50 \text{ Hz}$ a napětí $U_{CN} = 440 \text{ V}$, čímž se respektuje i zvýšení napětí vlivem reaktance předřazených tlumivek nebo sítě. Hodnotu reaktance určíme z udané hodnoty reaktivního výkonu pro všechny fáze:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C}$$

Výkon kondenzátoru při jiném fázovém napětí:

$$Q_C = 3 \cdot U_F^2 \cdot \frac{1}{X_C}$$

a při jiném kmitočtu ω_2 a jiném napětí (U_2):

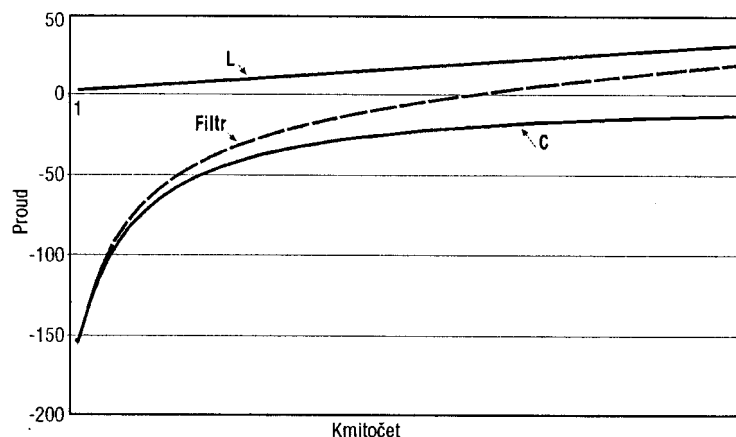
$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{U_2^2 \cdot \omega_2}{U_1^2 \cdot \omega_1} = Q_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{f_2}{f_1}$$

Tento vztah je možno použít např. při přepočtu kompenzačního výkonu kondenzátoru, jehož jmenovitá hodnota napětí je jiná než napětí sítě.

2.3. Kompenzační filtry

Pro potřeby filtrace harmonických proudů a současně pro kompenzaci účinníku se užívají výkonové sériové LC filtry. Takovýto kompenzační filtr tvoří sériový rezonanční obvod **RLC** (obr. 4). Tlumivka L a kondenzátor C jsou čistě reaktivní části, zatímco ohmická, a tím i ztrátová složka představuje sériový odpor R . Impedance tohoto obvodu je dána vztahem:

$$Z = R + j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)$$



Obr. 7

Kmitočtové charakteristiky L, C a LC filtru

Typická kmitočtová charakteristika reaktance tlumivky $X_L = \omega \cdot L$, kondenzátoru $X_C = 1/(\omega \cdot C)$ a výsledného sériového LC obvodu $X_L + X_C$, kde průsečík s osou kmitočtu je rezonanční kmitočet filtru, jsou znázorněny na obr. 7. Z něj je zřejmé, že kompenzační filtr se chová pro kmitočty menší než ω_r jako kondenzátor (má kapacitní charakter), např. pro 1. harmonickou kompenzuje jalový výkon. Pro harmonickou, na kterou je naladěný, představuje v ideálním případě zkrat a pro kmitočty větší než ω_r se chová kompenzační filtr jako tlumivka (má induktivní charakter).

Pokud uvažujeme i odpor R , pak obvodem prochází proud závislý na kmitočtu.

$$I = \frac{U}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R} - \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \right)^2}}$$

Čistě ohmická složka proudu je

$$I_R = \frac{U}{R}$$

Je zřejmé, že pokud je výraz pod odmocninou z předchozího vztahu roven číslu 1, pak obvod RLC odebírá pouze činný proud I_R . K tomu dochází právě v **rezonanci**, kdy $\omega = \omega_r$ a tedy

$$\frac{\omega_r \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_r \cdot R \cdot C} = Q$$

Současně je takto definován činitel jakosti filtru. Po úpravě předchozích vztahů dostaneme závislost proudu filtru na kmitočtu a činiteli jakosti. Pokud ještě vztáhneme proud filtru k proudu při rezonanci, dostaneme následující vztah:

$$\frac{I}{I_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \cdot Q^2}}$$

kde výraz

$$F = \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}$$

je definován jako činitel rozladění. Kmitočtovou závislost LC filtru charakterizují kmitočty, při nichž poměr proudů klesne pod hodnotu $1/\sqrt{2}$. Tuto hodnotu splňují dvě hodnoty součinu $F \cdot Q = \pm 1$.

Při návrhu kompenzačních filtrů je nutno počítat s proudovým namáháním nejenom od 1. harmonické, na které se filtr chová jako kompenzátor, ale i s proudem harmonické, na kterou je filtr naladěný.

Kompenzační filtry jsou připojovány do sítí, v nichž je nutné účelně eliminovat harmonické proudy generované spotřebiči, jejichž výkon je v porovnání s ostatními spotřebiči dominantní.

V praxi je takové zařízení řešeno jako několik paralelních filtrů naladěných na jednotlivé harmonické.

Způsoby řízení kompenzačního výkonu

1. Stupňovitě řízené kompenzátory

U stupňovitého řízení výkonů je důležitou otázkou volba počtu a velikostí stupňů. Tato otázka platí jak pro kompenzátory kontaktní, tak pro bezkontaktní na hladinách nízkého i vysokého napětí. Volba počtu stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování, obvykle $\cos\varphi_0 \geq 0,95$, neboli $\operatorname{tg}\varphi_0 \leq 0,33$. Pak musí být v ideálním případě a pro stupně se stejným kompenzačním výkonem, splněn vztah:

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \operatorname{tg}\varphi_0$$

kde

Q_L ... jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu P ,

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

N ... počet stupňů.

Z předchozí nerovnosti je možno určit vztah pro počet stupňů kompenzátoru N :

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \operatorname{tg}\varphi_0}{Q_{C1}}$$

1.1. Kontaktní

Regulované kontaktní kompenzátory pracují na principu přímého připínání kondenzátorů nebo chráněných kompenzačních sekcí, popř. jejich skupin na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu.

Kontaktní kompenzátory s prostými výkonovými kondenzátory se běžně používají v sítích, kde se nevyskytují harmonické složky proudu a kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace.

Při použití klasických stykačů je jejich velkým nedostatkem možnost vzniku přechodových jevů při nedefinovaném kontaktním připojení kondenzátoru na síť. Velké proudové rázy mohou dosahovat až třicetinásobku hodnot jmenovitých proudů.

Další velkou nevýhodou kontaktních kompenzátorů způsobenou nesynchronním spínáním je vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv na napájecí síť. Často způsobují impulsní rušení citlivých elektronických zařízení, měřicí a regulační techniky, elektronických vah, výpočetní techniky atd. Tyto nevýhody jsou částečně eliminovány předřazením ochranných tlumivek a zejména použitím moderních spínacích kontaktních prvků.

1.2. Bezkontaktní

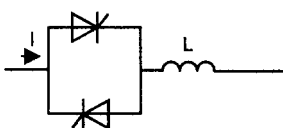
Tam, kde jsou kladeny vyšší nároky na rychlost změny jalového výkonu, je možno použít místo stykačů bezkontaktní spínače. Současně je nutno použít rychlejší regulátor jalového výkonu. Kondenzátorům se zde zpravidla předřazují ochranné tlumivky.

Rychlost regulace závisí na algoritmu, který používá regulátor jalového výkonu. V praxi je výhodné použít podobný regulační proces jako pro kompenzátory kontaktní. Připínání a odepírání jednotlivých stupňů kompenzátoru je pak podobné, pouze se děje podstatně rychleji.

2. Plynule řízené - pasivní

(S dekompenzačními členy)

Plynulé řízení jalového proudu je možné uskutečnit řízením proudu procházejícího tlumivkou. Použije-li se fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení, získáme základní zapojení výkonového obvodu dle obr. 8.

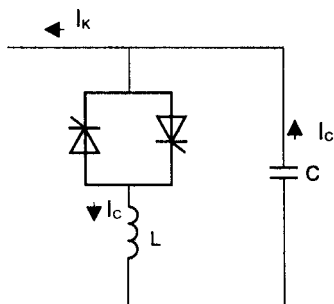


Obr. 8 Fázové řízení proudu při indukivní zátěži

Tento, pro jednoduchost jednofázový obvod umožňuje měnit čistě indukivní proud od nulové hodnoty až do plné hodnoty dané impedancí tlumivky L.

Chceme-li řídit kapacitní proud, nelze použít fázově řízený spínač a tlumivku pouze nahradit kondenzátorem. Problémem jsou přechodové jevy.

Řešení je však prosté, stačí když se paralelně k původnímu obvodu spínače a tlumivky připojí kondenzátor, jak znázorňuje obr. 9.



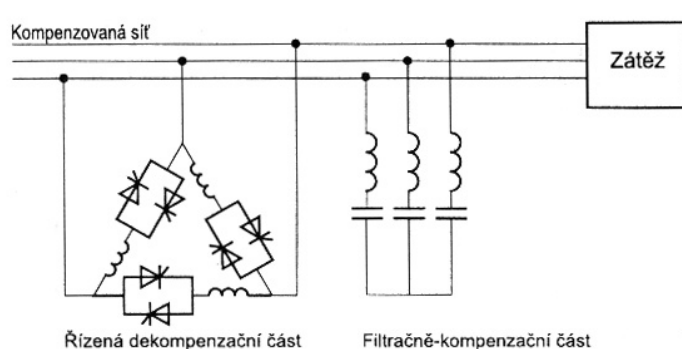
Obr. 9 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru

Je-li nyní $I_c > I_L$, potom výsledný kompenzační proud je

$$I_k = I_c - I_L$$

a má charakter kompenzačního proudu měnícího se v rozmezí $0 \leq I_k \leq I_L$.

Principiální zapojení výkonového obvodu trojfázového kompenzátoru s plynule řízeným kompenzačním výkonem na principu dekompenzace je na obr. 10. Ze znalosti produkce harmonických proudů dekompenzačního členu je možné řešit zapojení kondenzátorové baterie jako soustavu LC filtrů.



Obr. 10 Princip zapojení plynule řízeného kompenzátoru s dekompenzačním členem

Ty filtrují komponenty harmonických vlastního kompenzátoru a současně i soustavu, kterou kompenzují. Vhodné je použít v každé fázi kompenzační filtr na 5., 7. a dále na 11. a 13. harmonickou. Dimenzování filtrů a jejich poměrné rozdělení závisí zejména na charakteru kompenzované nelineární zátěže. Pro představu uvedme vhodné poměrné rozdělení kompenzačního výkonu pro řízený šestipulsní usměrňovač, které je pro filtry 5., 7., 11. a 13. harmonické v poměru 3 : 2 : 1 : 1.

Správné nadimenzování kompenzačního filtru u plynule řízeného kompenzátoru je velice důležité a má rozhodující vliv na funkčnost, spolehlivost a životnost celého kompenzátoru.

Plynule řízené pasivní kompenzátory se používají tam, kde dochází k velmi rychlé změně kompenzačního výkonu, např. u bodových svářecích automatů, řízených pohonů, odstředivek v cukrovarech, na vysokém napětí u pohonů válcovacích tratí nebo elektrických obloukových pecí atd.

Díky moderním aktivním filtrům ztrácejí tyto kompenzátory poslední dobou pro oblast nízkého napětí praktický význam.

3. Plynule řízené – aktivní

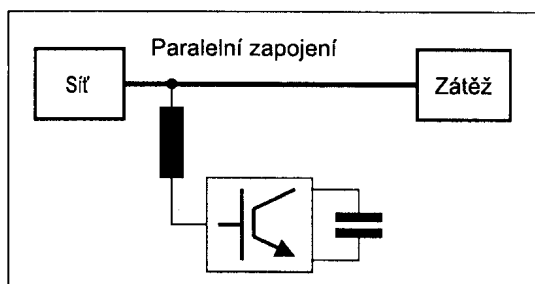
Aktivní filtry lze chápat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit na paralelní (derivační), sériové a kombinované.

3.1. Paralelní aktivní filtr

Paralelní aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Je schopen odstranit nežádoucí harmonické proudy tím způsobem, že generuje shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Výsledný proud je potom zbaven zvolených harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě, a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží. Takto je možné v každém okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických

složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci. Generováním jalové složky první harmonické proudu je paralelní aktivní filtr schopen provádět velmi rychlou kompenzaci jalového proudu, popřípadě pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze tyto vlastnosti libovolně kombinovat.

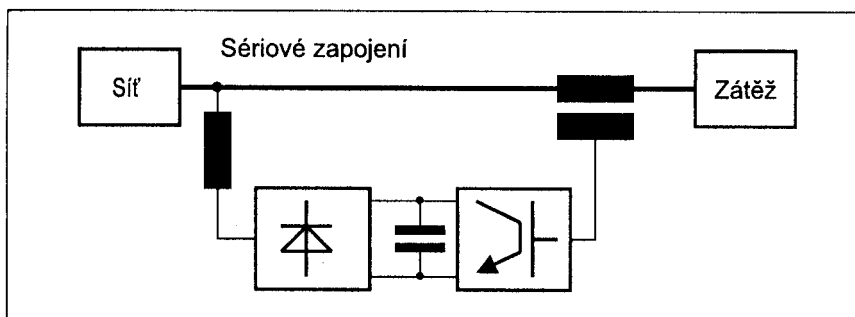
Generátor proudu či napětí může být tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT). Jedná se o shodné zapojení s můstkem střídače pro regulovaný pohon, tzn. že ve třífázovém provedení obsahuje šest spínačů a zdroj proudu či napětí. V praxi se však osvědčil typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátory. Vhodným spínáním tranzistorů můstku lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru. Tento proud však obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence (jednotky až desítky kHz). Proto je nutné zařadit mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr pracující jako dolní propust. Schematické zapojení a jeho připojení do sítě s nelineární zátěží je na obr. 11.



Obr. 11 Paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě

3.2.Sériové aktivní filtry

Aktivní sériový filtr je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče a je tvořen generátorem napětí. Tento filtr umožňuje upravit přiváděné napětí na požadovaný tvar. Schematické zapojení a jeho připojení do sítě s nelineární zátěží je na obr. 12.



Obr. 12 Sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě

Podobně jako upravuje paralelně zapojený filtr proud, je zde upravováno napětí. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, ale

také dodávat energii při výpadku napájecího napětí (za podmínky, že je filtr napájen nezávislým zdrojem).

Z popsaných vlastností obou způsobů zapojení je zřejmé, že derivační filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériové filtry upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči - dodávají zátěži kvalitnější napětí.

3.3.Kombinované aktivní filtry

Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek, čímž vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný odebíraný průběh proudu.

4.Kombinované

Předchozí uvedené principy kompenzátorů jalového výkonu je samozřejmě možné vhodným zapojením vzájemně kombinovat. V praxi se používá kombinace plynule řízeného pasivního kompenzátoru a stupňového bezkontaktního kompenzátoru. Tato sestava byla dříve u nás vyráběna pod označením PLYCOS + SYNCOS.

V současné době se nabízí kombinace kompenzátoru stupňového a aktivního filtru. Díky vlastnostem aktivního filtru by bylo možné použít kompenzátor pomalejší kontaktní s chráněnými sekcemi a výkon aktivního filtru použít hlavně pro vykompenzování deformačního výkonu.