



ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

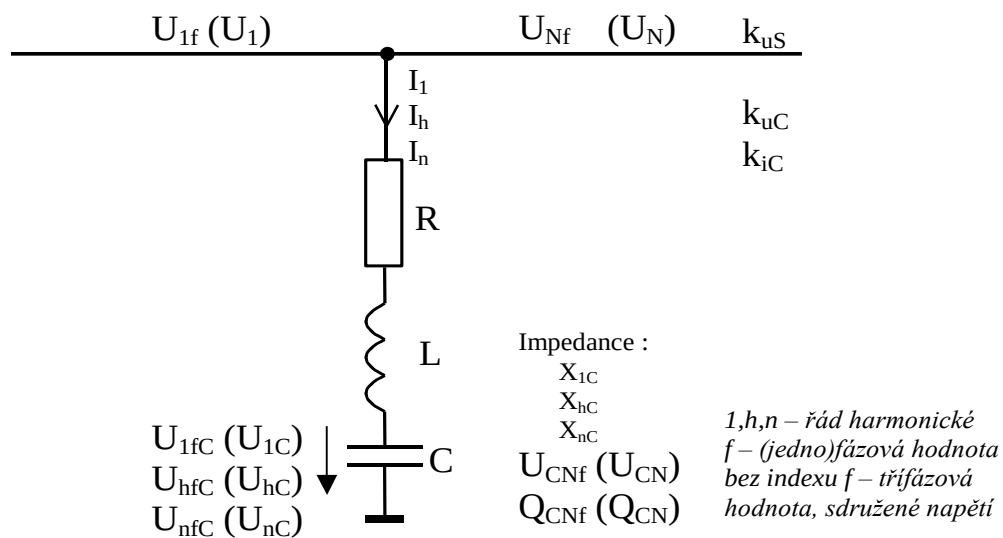
4. FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ

Požadavky na filtry

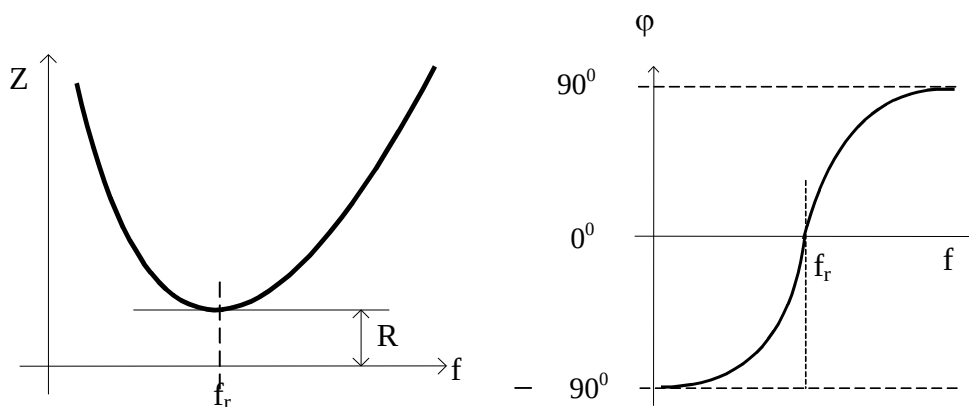
Od filtračně kompenzačního zařízení je požadováno:

- a) filtrovat harmonické proudy vyšších řádů, které se v síti vyskytují. Jedná se většinou o charakteristické harmonické (tj. obvykle řady 5,7,11,13...), případně o harmonické s nejvyšší hodnotou proudu (např. u obloukových pecí se jedná o řady 2,3,4, ...),
- b) kompenzovat induktivní jalový výkon odebíraný ze sítě.

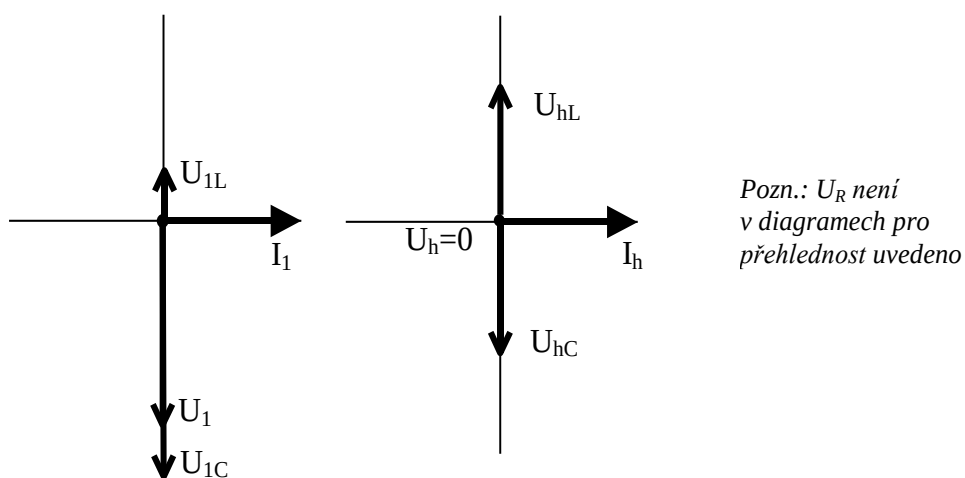
Základem filtru je sériový RLC rezonanční obvod, připojený do určitého vhodného místa v el. rozvodech. Filtr je obvykle konstruován jako jednoduchý laděný filtr. Činný odpor je určen vinutím tlumivky. Základní schéma jednoduchého filtru je na obrázku 1. V obrázku je uvedeno značení, použité v této kapitole. Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika filtru jsou na obrázku 2. Z obrázku vyplývá, že pro frekvence blízké základní frekvenci (50 Hz) je charakter obvodu téměř kapacitní – filtr tedy působí jako kompenzátor. Pro frekvence v oblasti rezonance se jeví filtr téměř jako zkrat, omezený pouze odporem cívky. Proto název filtračně kompenzační zařízení. Účinek nelze rozdělit, návrhem parametrů filtru lze pouze některý účinek zvýšit a druhý potlačit.



obr. 0. – Schéma jednoduchého filtru a použitá základní symbolika



2 - Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika jednoduchého filtru



obr. 1 –Fázorový diagram filtru pro základní a rezonanční frekvenc

Základní vztahy pro návrh filtru

Cílem návrhu je:

- a) dosáhnout odpovídajícího potlačení harmonických,
- b) dodat požadovaný jalový výkon základní frekvence,
- c) návrh provést při minimální ceně.

Filtračně kompenzační zařízení je sestaveno z jednotlivých filtračních členů. V praxi není obvykle instalován pouze jediný filtr. Jednotlivé filtry jsou pak laděny na různé frekvence (harmonické). Abychom mohli formulovat jednoduché a přehledné matematické vztahy, budeme předpokládat:

- a) jednotlivé filtry jsou složeny z ideálních indukčností a z ideálních kapacit,
- b) činné odpory R pro základní odvození zanedbáme,
- c) filtry jsou zapojeny do třífázové hvězdy,
- d) filtry jsou připojeny na ideální zdroj harmonického napětí U_1 základní (první) harmonické a na paralelní ideální zdroj harmonického proudu řádu h .

Jako výchozí údaje pro návrh filtru je třeba znát:

- a) jednotlivé proudy harmonických, zejména řádů h , které chceme filtrovat,
- b) celkový potřebný kompenzační výkon Q_k , který má být filtry dodáván do sítě,
- c) jmenovité napětí v místě připojení filtrů – fázová hodnota je U_{1f} ,
- d) zkratový výkon S_k nebo impedanci sítě v místě připojení filtrů.

Mezi základní parametry, které musíme určit patří:

- a) jmenovité napětí U_{CN} a jmenovitý instalovaný výkon Q_{CN} kondenzátoru,
- b) proud a indukčnost tlumivky filtru,
- c) činný odpor R a činitel jakosti q tlumivky filtru.

Pro zajištění základní funkce (filtrace pro h -tou harmonickou) je třeba zajistit, aby výsledná reaktance filtru se rovnala nule. Rezonanční podmínka pro h -tou harmonickou je:

$$L = \frac{1}{h^2 \omega_1^2 C}$$

Za těchto předpokladů je fázové napětí 1. harmonické na kondenzátoru C pro filtr h-té harmonické:

$$U_{1fC} = I_1 \frac{1}{\omega_1 C} = \frac{U_{1f}}{\left(\omega_1 \frac{1}{h^2 \omega_1^2 C} - \frac{1}{\omega_1 C} \right)} \cdot \frac{1}{\omega_1 C} = \frac{U_{1f}}{1 - \frac{1}{h^2}}$$

$$U_{1fC} = U_{1f} \frac{h^2}{h^2 - 1}$$

Zavedeme-li koeficient zvýšení napětí 1. harmonické na kondenzátoru:

$$a_h = \frac{h^2}{h^2 - 1}$$

platí pro fázové (U_{1fC}) a sdružené (U_{1C}) napětí 1. harmonické kondenzátoru:

$$U_{1fC} = a_h U_{1f} \quad U_{1C} = a_h U_1 = a_h U_{1f} \sqrt{3}$$

Obvykle je charakterizována třífázová kondenzátorová baterie hodnotou jmenovitého výkonu Q_{CN} při jejím sdruženém napětí U_{CN} . Označíme:

$$U_{CN} = \sqrt{3} U_{CNf}$$

kde U_{CNf} je jmenovité napětí jednofázových kondenzátorových jednotek, ze kterých bude složena baterie zapojená do hvězdy. Potom pro třífázový jmenovitý výkon kondenzátorové baterie dostaneme:

$$Q_{CN} = \omega_1 C U_{CN}^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{X_{1C}} = \omega_1 C = \frac{Q_{CN}}{U_{CN}^2}$$

Pro proud 1. harmonické, protékající filtrem h-té harmonické platí:

$$I_1 = \frac{U_{1fC}}{X_C} = \frac{a_h U_{1f}}{X_C} = \frac{a_h \frac{U_1}{\sqrt{3}}}{X_C} = a_h \frac{U_1}{\sqrt{3}} \omega_1 C = a_h \frac{U_1}{\sqrt{3}} \frac{Q_{CN}}{U_{CN}^2}$$

Tento proud má kapacitní charakter a filtr h – té harmonické dodává do sítě kompenzační výkon

$$Q_k = \sqrt{3} U_1 I_1 = a_h \left(\frac{U_1}{U_{CN}} \right)^2 Q_{CN}$$

Za předpokladu, že filtrem protéká proud pouze 1. harmonické (vlivem kompenzačního účinku filtru) a proud h – té harmonické (vlivem filtračního účinku filtru), je výsledný efektivní proud filtru:

$$I_C = \sqrt{I_1^2 + I_h^2}$$

Na tento výsledný proud je nutné dimenzovat jak kondenzátor, tak i tlumivku.

Podmínky pro volbu kondenzátorové baterie

Dosud uvedené rovnice nedávají návod na dimenzování zařízení. Proud, procházející jednotlivými články filtru určuje proudové dimenzování částí filtru. Úbytky napětí na impedancích filtru, vyvolané tímto proudem společně se sítovým napětím, určují napěťové namáhání a tím dimenzování kondenzátorové baterie.

Pro snazší formulaci matematických vztahů budeme nyní předpokládat:

- a) Každým filtrem protéká jen kompenzační proud a proud řádu h , na který je filtr navržen.
- b) Napětí sítě může být trvale vyšší, než je jmenovité napětí. Zvýšené napětí může být trvale:

$$U_1 = k_{us} U_N$$

- c) Napětí na kondenzátoru může být trvale vyšší, než je jeho jmenovité napětí:

$$U_C = \kappa_u U_{CN}$$

- c) Proud kondenzátoru může být trvale větší, než je jeho jmenovitý proud:

$$I_C \leq \kappa_i I_{CN}$$

Na základě těchto předpokladů pak musíme zajistit, aby kondenzátor nebyl ani proudově ani napěťově přetížen. Musí vyhovovat proudové i napěťové podmínce řešení.

Proudová podmínka

Vyjdeme ze vztahu:

$$\sqrt{I_1^2 + I_h^2} \leq \kappa_i I_{CN}$$

Dalšími úpravami dostaneme minimální výkon kondenzátorové baterie:

$$[Q_{CN}]_i \geq [Q_{CN \min}]_i = \frac{\sqrt{3}U_{CN}I_h}{\sqrt{\kappa_i^2 - a_h^2 k_{us}^2 \left(\frac{U_N}{U_{CN}}\right)^2}}$$

Současně musí platit, že kondenzátory nesmí být napěťově přetíženy, tj. musí být splněno:

$$U_{CN} \geq a_h k_{us} U_N = a_h U_1$$

Napěťová podmínka

Obdobně jako v předchozí kapitole definujme napěťovou podmínku pro určení minimálního výkonu kondenzátorové baterie:

$$\sqrt{U_{1C}^2 + U_{hC}^2} \leq \kappa_u U_{CN}$$

pak

$$[Q_{CN}]_U \geq [Q_{CN \min}]_U = \frac{\sqrt{3}U_{CN}I_h}{h \sqrt{\kappa_u^2 - a_h^2 k_{us}^2 \left(\frac{U_N}{U_{CN}}\right)^2}}$$

Výpočet základních parametrů tlumivky filtru

Pro dimenzování tlumivky je třeba určit její indukčnost, procházející proud a jakost tlumivky. Hodnotu indukčnosti odvodíme pomocí vztahu pro rezonanci a vztahu pro výkon kondenzátorové baterie a dostaneme:

$$L_h = \frac{1}{h^2 \omega_1} \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}}$$