

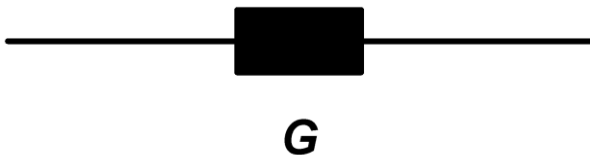
Symetrizace 1f a 3f spotřebičů

Symetrizace 1f a 3f spotřebičů

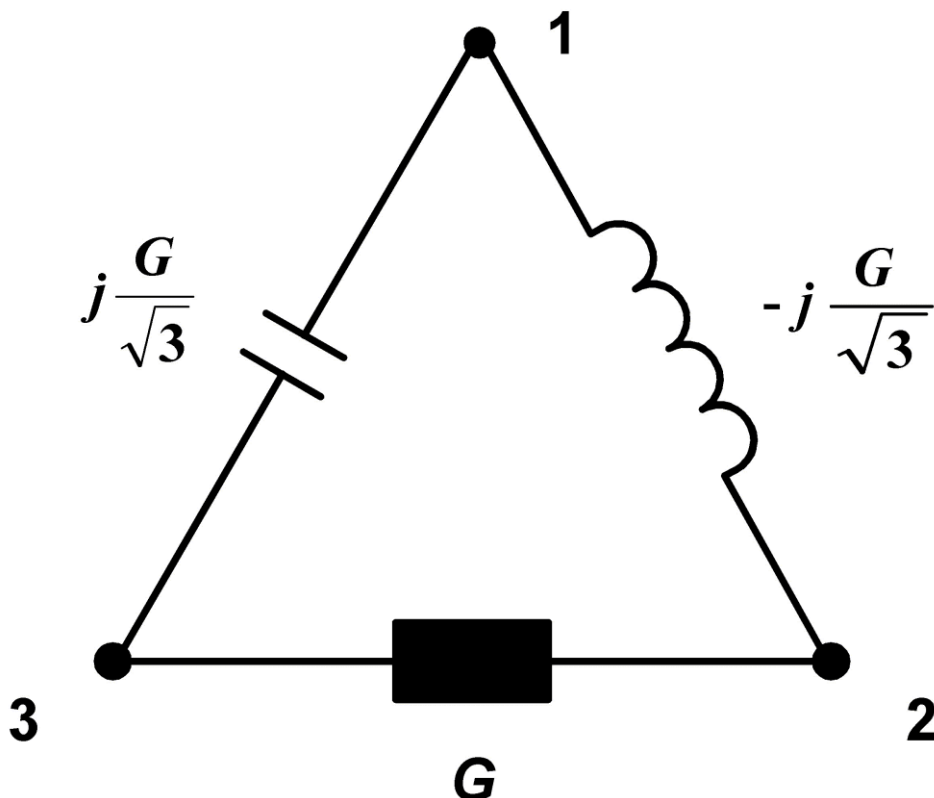
5.10.2002

V mnoha průmyslových aplikacích se setkáváme s velkými zařízeními připojenými na síť elektrické energie. Tyto spotřebiče by měly být symetrické, neboť přenos výkonu v tomto stavu způsobuje nejnižší činné ztráty. Proto provádíme tzv. symetrizaci spotřebiče, t.j. naším cílem je vytvořit celek, který bude zatěžovat všechny fáze rovnoměrně; samozřejmým požadavkem je, aby se procesem symetrizace nezvýšil dosavadní činný výkon spotřebiče. To, jak uvidíme dále, se nám podaří vhodnou kombinací indukčnosti a kapacity, které připojíme mezi jednotlivé fáze našeho spotřebiče. Symetrizace se může provádět nejen u stávajících 3f zařízení, ale i u 1f zařízení, které je nutno napájet třemi fázemi. To se využívá hlavně pro napájení energetických zařízení velkých výkonů - nad 500 kW.

Začneme však nejprve reálnou admitancí, například $G = 5 \text{ S}$:

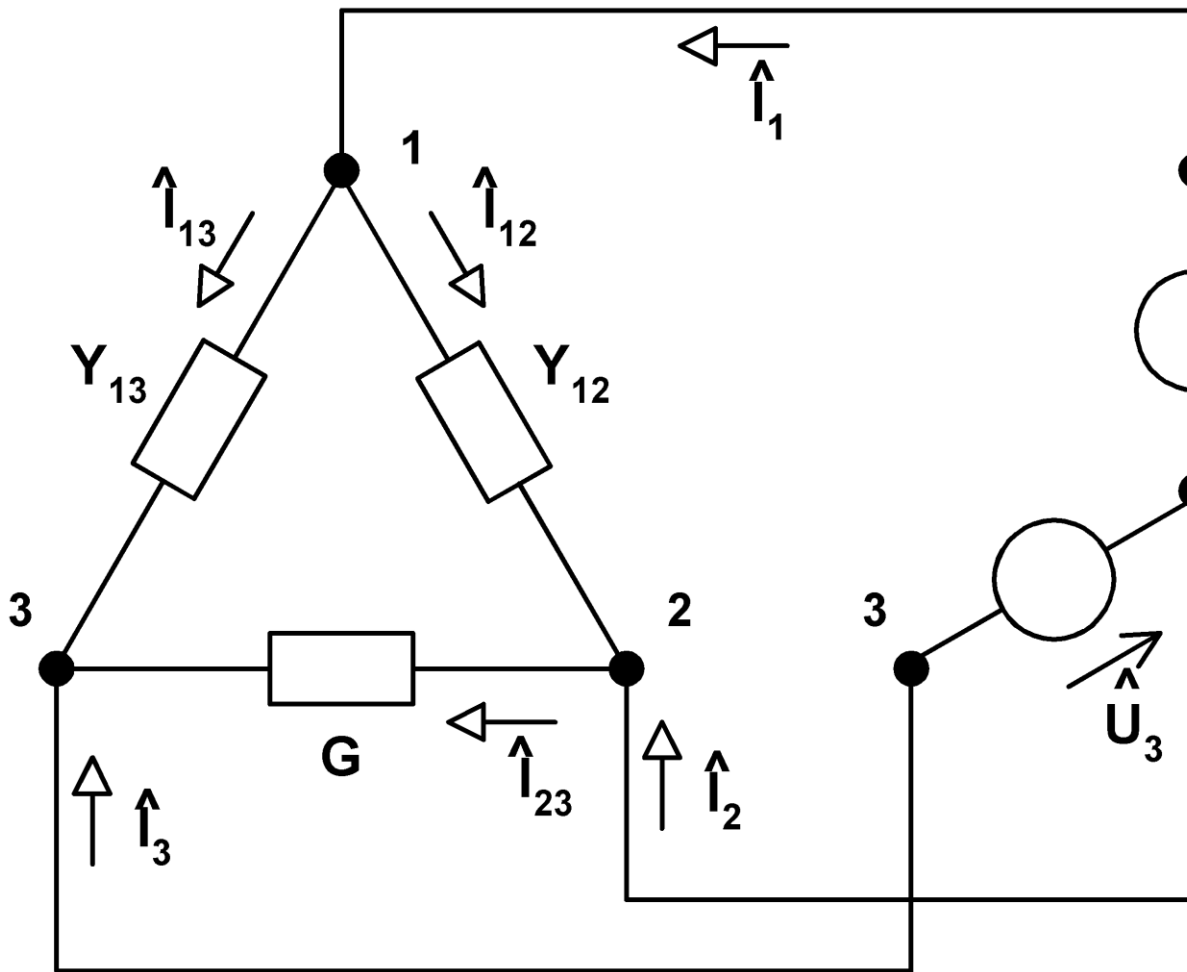


Z ní uděláme symetrickou 3-fázovou reálnou zátěž takto:



Odvození:

Uvažme zapojení obvodových prvků, označení a orientaci obvodových veličin podle schematu:



Mezi uzly 2 a 3 nechť je zapojena reálná zátěž o vodivosti G (S). Požadujeme, aby po připojení admittancí Y_{12} (S) a Y_{13} (S) byla zátěž reálná a symetrická; dalším požadavkem je, aby činný výkon odebíraný zátěží zůstal nezměněn, matematizujme tyto požadavky:

- # zachování činného výkonu: Y_{12} a Y_{13} jsou ryze imaginární,
- # výsledné zapojení neodebírá jalový výkon: $Y_{12} = -Y_{13}$; položme $Y_{12} = j \cdot Y$, $Y_{13} = -j \cdot Y$,
- # symetrie odebíraných proudů: $I_1 = k \cdot U_1$, $I_2 = k \cdot U_2$, $I_3 = k \cdot U_3$.

Zavedme označení fázových napětí v elektroenergetice obvyklým způsobem:

$U_1 = U$, $U_2 = U \cdot a^2$, $U_3 = U \cdot a$, kde $a = e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot j}{3}}$ je operátor otočení v komplexní rovině o $\frac{2 \cdot \pi}{3}$ proti směru hodinových ručiček, přestože to řešení nevyžaduje, je výhodné položit $U \in \mathbb{R}^1$, což jistě můžeme, znamená to jen volbu počátku měření času při přechodu od fázorů do časové oblasti. S uvažováním těchto podmínek platí:

$$I_1 = I_{12} + I_{13} = j \cdot Y \cdot (U_1 - U_2) - j \cdot Y \cdot (U_1 - U_3) = j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a^2) - j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U_1 = k \cdot U$$

$$I_2 = I_{23} - I_{12} = G \cdot (U_2 - U_3) - j \cdot Y \cdot (U_1 - U_2) = G \cdot U \cdot (a^2 - a) - j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U_2 = k \cdot U \cdot a^2$$

$$I_3 = -I_{23} - I_{13} = -G \cdot (U_2 - U_3) - (-j \cdot Y) \cdot (U_1 - U_3) = -G \cdot U \cdot (a^2 - a) + j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U_3 = k \cdot U \cdot a$$

U , a , G jsou zadané veličiny, Y , k neznámé. Máme tedy 3 rovnice pro 2 neznámé, rovnice jsou ovšem lineárně závislé: součet levých stran je nulový na první pohled a pro součet pravých stran platí:

$$k \cdot U \cdot (1 + a^2 + a) = 0, \text{ neboť platí } 1 + a^2 + a = 0.$$

Řešení soustavy je ve formě [notebooku](#), výsledkem je: $k = G$ a $Y = -G / \sqrt{3}$.

Vidíme, že úloha je splněna: proudy jsou G násobkem příslušných fázových napětí, navíc -podle předpokladu- $U \in \mathbb{R}^1$. Celkový činný výkon je:

$$P = \operatorname{Re}\{U \cdot G \cdot U\} + \operatorname{Re}\{a^2 \cdot U \cdot (a^2 \cdot U \cdot G)^*\} = U^2$$

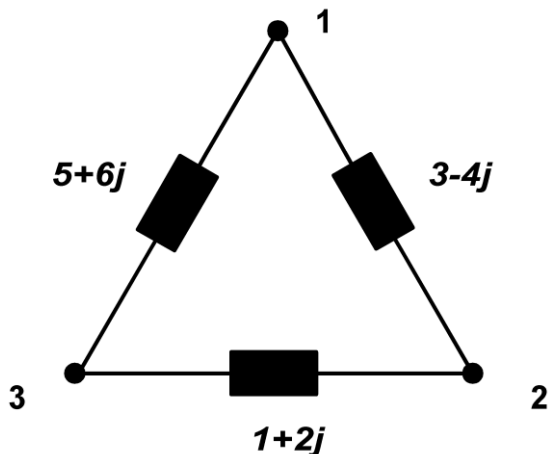
$$G \cdot (1 + a^2 \cdot (a^2)^* + a \cdot a^*) = U^2 \cdot G \cdot (1 + |a|^2 + |a|^2) = U^2 \cdot G \cdot (1 + 1 + 1) = 3 \cdot U^2 \cdot G$$

Činný výkon původního zapojení před připojením symetrizačních členů byl: $P = G \cdot (\sqrt{3} \cdot U)^2 = 3 \cdot U^2 \cdot G$.

Konec **odvození**.

Stačí tedy zapojit mezi uzly 1-3 ideální kapacitu o velikosti admitance $5 / \sqrt{3}$ S (Siemens) a mezi uzly 1-2 ideální indukčnost o velikosti admitance $5 / \sqrt{3}$ S, a dostaneme z jednofázového spotřebiče trojfázový symetrický spotřebič.

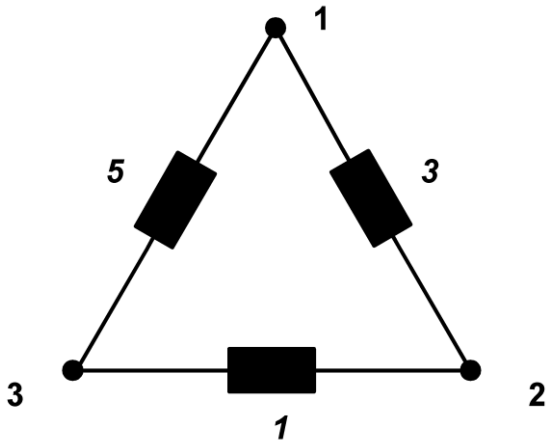
Nyní se však podívejme na obecnou 3f nesymetrickou zátěž. Zesymetrizujeme ji obdobným postupem jako u jedné reálné admitance (viz výše), a to tak, že postupně budeme aplikovat stejný postup symetrizace pro jednotlivé větve zvlášť. Využijeme skutečnosti, že paralelní spojení trojfázových symetrických reálných zátěží se chová jako symetrická reálná trojfázová zátěž. Navíc označení fází čísla 1,2,3 je libovolné při zachování jejich sledu, můžeme tedy při myšleném přečíslování fází postupovat u každé mezifázové zátěže obdobně, jak je uvedeno výše. Vše si nejlépe vysvětlíme na příkladu. Máme takový případ:



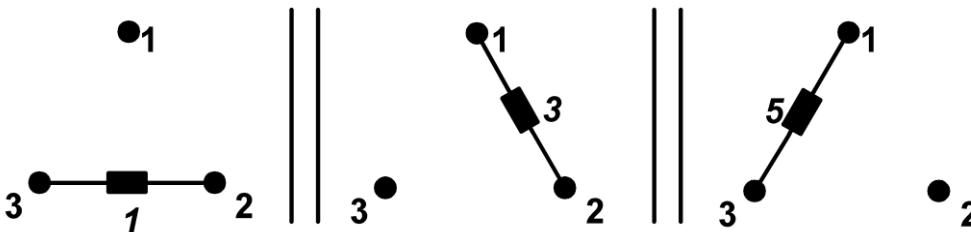
Nejprve dosáhneme reálné zátěže mezi jednotlivými uzly, t.j. mezi uzly 1 a 2 připojíme admitanci $4j$ S, mezi uzly 2 a 3 admitanci $-2j$ S a mezi uzly 3 a 1 admitanci $-6j$ S. Vše přehledně zapíšeme do tabulky.

větev 1-2	větev 2-3	větev 3-1	
$4j$	$-2j$	$-6j$	vykompenzováno

Nyní je obvod vykompenzován, ale ještě ne zesymetrizován:



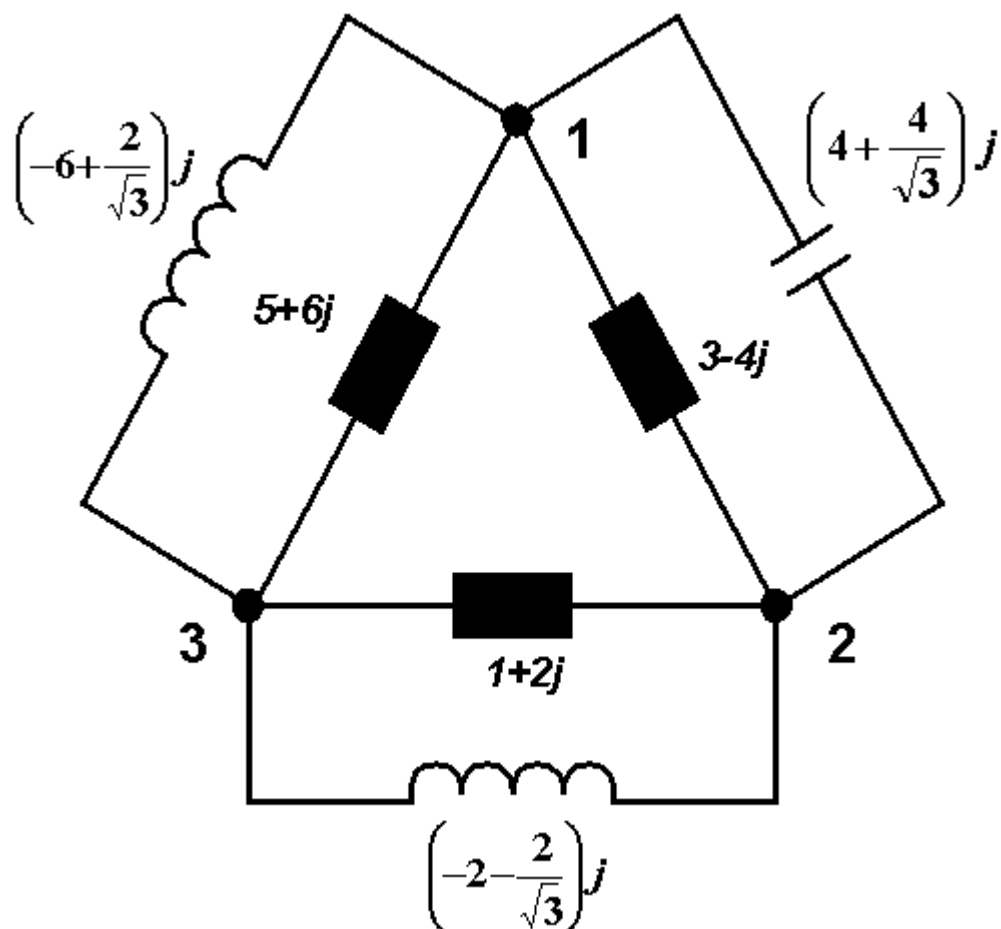
Postupme dále. Tento vykompenzovaný obvod považujeme za paralelní spojení třech jednoduchých jednofázových spotřebičů (jsou ale pokaždé mezi dvěma různými uzly),



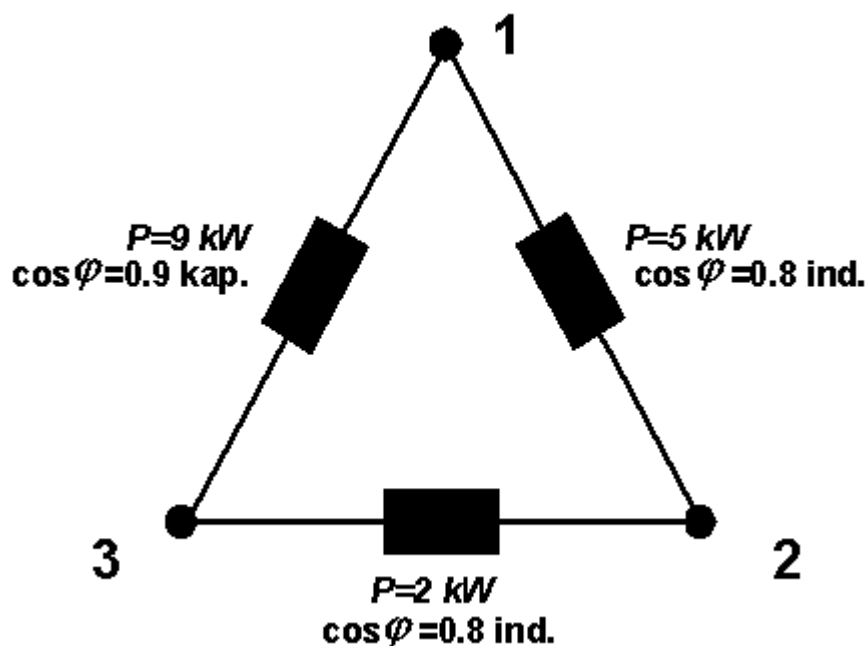
a s těmito oddělenými jednoduchými admitancemi provedeme symetrizaci, jako na začátku, každou admitanci zesymetrizujeme zvlášť. Pokud provádíme symetrizaci spotřebiče mezi uzly 1-2, pak mezi uzly 2-3 bude kapacita o velikosti admitance $3/\sqrt{3}$ a mezi uzly 3-1 bude indukčnost o velikosti admitance $3/\sqrt{3}$. Pro symetrizaci spotřebiče, který je zapojen mezi uzly 3-1, platí analogický postup. Zkráceně řečeno, **schema** natáčíme vždy tak, aby se admitance G kryla s požadovanou admitancí z **paralelní kombinace**, kterou právě symetrizujeme, a zbývající větve dopočítáme podle **schematu**. Natočení totiž nemění sled fází. Pokračujeme dále v tabulce:

větev 1-2	větev 2-3	větev 3-1	
$4j$	$-2j$	$-6j$	vykompenzováno
$-1j/\sqrt{3}$		$1j/\sqrt{3}$	příspěvky větví ze schematu
	$3j/\sqrt{3}$	$-3j/\sqrt{3}$	příspěvky větví ze schematu
$5j /$	$-5j/\sqrt{3}$		příspěvky větví ze schematu
----	----	----	----
$j(4 + 4/\sqrt{3})$	$j(-2 - 2/\sqrt{3})$	$j(-6 + 2/\sqrt{3})$	suma sloupců

V tabulce je důležitý poslední řádek, který je součtem všech příspěvků v dané větvi. Tyto hodnoty nám určují typ prvku a jeho velikost, který připojíme paralelně k odpovídající větvi. Jelikož uvažujeme obvod s jednou frekvencí napětí a proudů, je možno vždy nahradit paralelní kombinaci indukčnosti a kapacity jedním prvkem, indukčností či kapacitou podle výsledného znaménka admitance. Upozorníme, že velikosti admitancí jsou funkcemi frekvence, pro obecný obvod s obecným napájením tato náhrada možná není. Například k větvi mezi uzly 3-1 připojíme kondenzátor o velikosti admitance $j(4 + 4/\sqrt{3})$ S (kondenzátor, protože výraz je kladný). Výsledkem je tedy schema:



Symetrizace byla provedena. Výsledné zařízení odebírá reálný výkon ze sítě. Z libovolné admittance lze tedy vytvořit symetrickou zátěž.
 V praxi se ale s explicitním vyjádřením admittance příliš často nesetkáváme. Daleko častější je způsob zadání například:



Pro získání explicitního vyjádření, na které jsme zvyklí, použijeme následující vzorec, který je ilustrován výpočtem:

$$Y = \frac{P}{U^2} (1 - j \operatorname{tg} \varphi) \quad \begin{array}{l} \varphi > 0 \text{ ind.} \\ \varphi < 0 \text{ kap.} \end{array}$$

$$Y_{12} = \frac{5 \cdot 10^3}{400^2} (1 - j \operatorname{tg} \arccos 0.8) = (31.3 - j 23.5) \text{ mS}$$

$$Y_{23} = \frac{2 \cdot 10^3}{400^2} (1 - j \operatorname{tg} \arccos 0.8) = (12.5 - j 9.4) \text{ mS}$$

$$Y_{31} = \frac{9 \cdot 10^3}{400^2} (1 + j \operatorname{tg} \arccos 0.9) = (56.3 + j 27.2) \text{ mS}$$

Dostali jsme explicitní vyjádření admitance. S těmito hodnotami dále nakládáme, jako v předchozím příkladě.