

4. TROJFÁZOVÉ OBVODY

4.1 Úvod

4.2 Trojfázová soustava

4.3 Spojení fází do hvězdy

4.4 Spojení fází do trojúhelníka

4.5 Výkon v trojfázových souměrných soustavách

4.6 Nesouměrné trojfázové soustavy

4.1 Úvod

Pro přenos elektrické energie v elektrických sítích se většinou používá střídavá trojfázová soustava. Trojfázová soustava je zvláštní případ střídavého obvodu.

Trojfázové soustavy (obvody) mají oproti jednofázovým soustavám (obvodům) některé výhody:

- Umožňují lepší (hospodárnější) využití rozvodů el. energie, zdrojů a transformátorů.
To znamená, že jeden trojfázový generátor je levnější a má menší hmotnost (rozměry), než tři jednofázové generátory, které by měly v součtu stejný výkon. Totéž by platilo při srovnání trojfázového transformátoru a tří jednofázových transformátorů.
- Také při přenosu energie trojfázovým vedením dochází k menším ztrátám, než při přenosu stejného výkonu jednofázovým vedením (při použití vodičů, které mají v součtu stejné množství materiálu).
- Umožňují vznik točivého magnetického pole, které se využívá v trojfázových asynchronních motorech.
Tyto motory jsou v průmyslu velmi rozšířené, jsou relativně jednoduché, levné a nenáročné na údržbu.

Kromě trojfázových soustav mohou existovat i vícefázové soustavy, ale trojfázové soustavy jsou v praxi nejrozšířenější.

4.2 Vznik trojfázové soustavy

V souměrném trojfázovém generátoru se otáčením magnetu (nebo elektromagnetu) indukují tři střídavá napětí, která tvoří **souměrnou trojfázovou soustavu napětí**. Napětí všech fází mají stejnou velikost (amplitudu) U_m a jsou vůči sobě posunuty o $1/3$ doby kmitu, to je $2\pi/3$ nebo 120° .

Když uvažujeme, že napětí první fáze má nulový počáteční fázový posuv, tak platí:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_m \cdot \sin(\omega t) \\ u_2 &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_3 &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Maximální hodnota napětí $U_m = \sqrt{2} \cdot U$, kde U je efektivní hodnota napětí (např. v naší síti 230V).

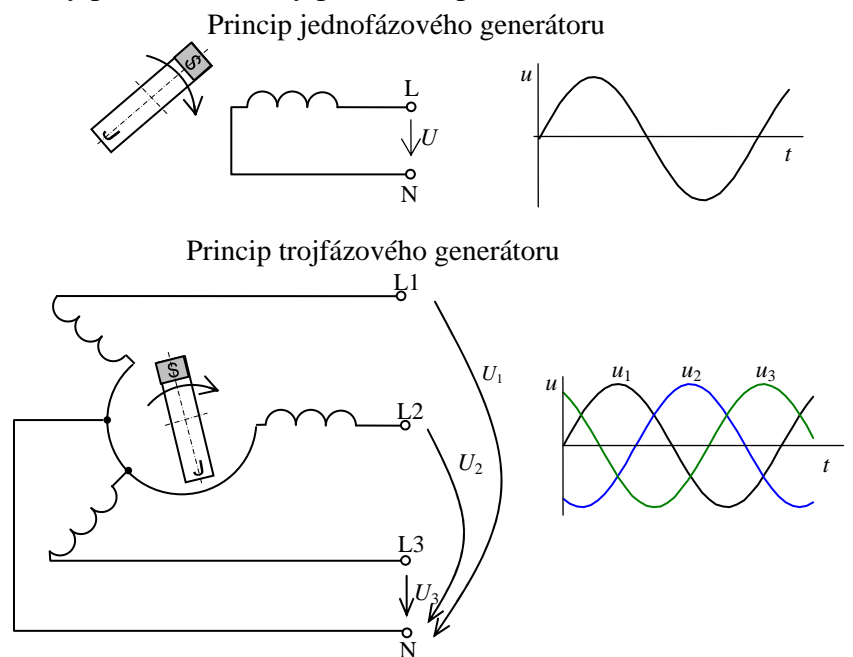
Na obrázku 1 je naznačeno, jak se otáčením magnetu (nebo elektromagnetu) v generátoru indukují střídavé napětí.

Vodič který vychází ze středu (uzlu) cívek generátoru se nazývá nulový vodič a značí se písmenem N (dříve se nazýval střední). Vodiče které vychází z konců cívek generátoru se nazývají fázové vodiče a značí se písmeny L1, L2 a L3.

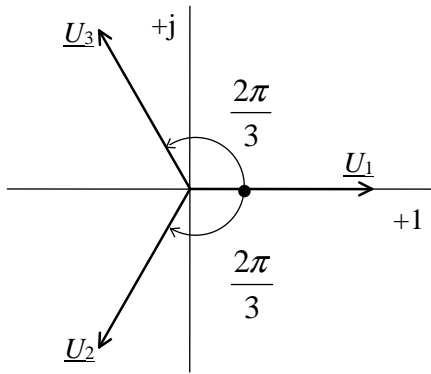
Nulový vodič nemusí být v každé trojfázové soustavě. Pokud v trojfázové soustavě nulový vodič je, nazýváme ji čtyřvodičovou soustavou (častější případ) a pokud není, nazýváme ji třívodičovou soustavou.

V komplexním tvaru můžeme zapsat souměrná trojfázová napětí takto:

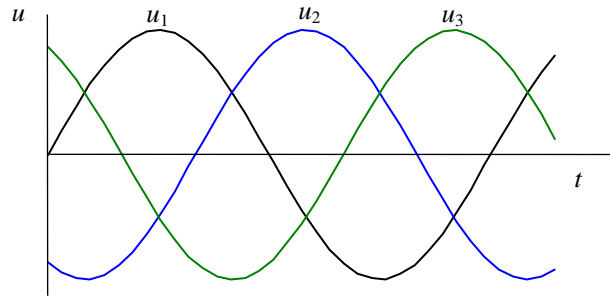
zápis ve verzorovém tvaru	zápis v exponenciálním tvaru	
$\underline{U}_1 = U \mid 0$	$\underline{U}_1 = U \cdot e^{j0}$	
$\underline{U}_2 = U \mid -\frac{2}{3}\pi$	$\underline{U}_2 = U \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi}$	(4.2.)
$\underline{U}_3 = U \mid -\frac{4}{3}\pi = U \mid \frac{2}{3}\pi$	$\underline{U}_3 = U \cdot e^{-j\frac{4}{3}\pi} = U \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi}$	



Obr. 1 Princip výroby střídavého napětí v točivých generátorech



Obr. 2 Fázorový diagram napětí v trojfázové soustavě (v komplexí Gaussově rovině)



Obr. 3 Časový průběh napětí jednotlivých fází

Napětí první fáze může být proti počátku posunuto. Potom se ve vztazích 4.1 a 4.2 přičte ke všem úhlům tento fázový posun. Posunou se i fázory na obr. 2 a sinusovky na obr. 3.

Většina trojfázových obvodů je souměrných. To znamená, že ve všech fázích jsou zapojeny stejné impedance:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (4.3)$$

Proudy v jednotlivých fázích lze pak vypočítat:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}} \quad (4.4)$$

Proudy v jednotlivých fázích mají stejnou hodnotu, stejný fázový posun φ vzhledem k napětí příslušných fází a jsou vzájemně posunuty o $2\pi/3$ (viz obr. 4.3). Tvoří tedy souměrnou trojfázovou soustavu proudů, podobně jako soustava napětí. Pro proudy budou platit obdobné vztahy jako 4.1 a 4.2 pro napětí:

$$i_1 = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

$$i_2 = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right)$$

(4.5)

$$\underline{I}_1 = I \angle -\varphi$$

$$\underline{I}_2 = I \angle -\varphi - \frac{2}{3}\pi$$

$$\underline{I}_3 = I \angle -\varphi - \frac{4}{3}\pi = I \angle -\varphi + \frac{2}{3}\pi$$

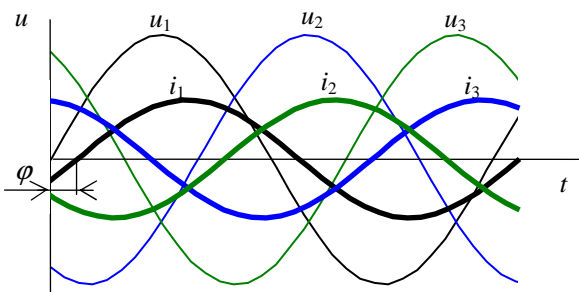
$$\underline{U}_1 = U \cdot e^{-j\varphi}$$

$$\underline{U}_2 = U \cdot e^{-j\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right)}$$

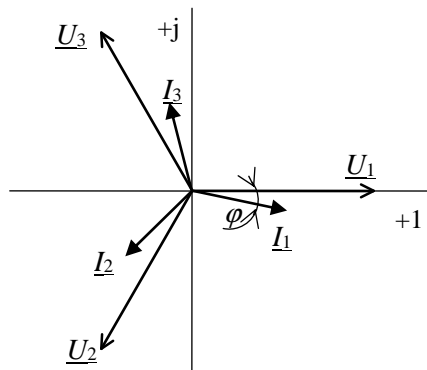
$$\underline{U}_3 = U \cdot e^{-j\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right)} = U \cdot e^{j\left(\frac{2}{3}\pi - \varphi\right)}$$

(4.6)

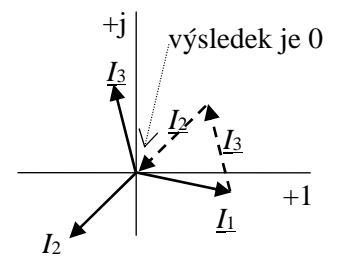
Výše uvedené vztahy vypadají velmi složitě, grafické vyjádření na obrázku 4 je názornější. Tři sinusovky napětí vzájemně posunuté o 120° a tři sinusovky proudů také vzájemně posunuté o 120° . Mezi příslušným napětím a proudem je vždy fázový posun φ . Ještě názornější je zobrazení pomocí fázorů na



Obr. 4 Časové průběhy proudů a napětí v souměrné trojfázové soustavě



Obr. 5 Fázorový diagram proudů a napětí v souměrné trojfázové soustavě



Obr. 6 Fázorový součet proudů v souměrné 3 fázové soustavě obr. 5.

V souměrné trojfázové soustavě je součet všech tří proudů v každém okamžiku roven nule (4.7). Totéž platí i pro napětí. Grafický fázorový součet proudů, jehož výsledkem je 0 je nakreslen na obrázku 6.

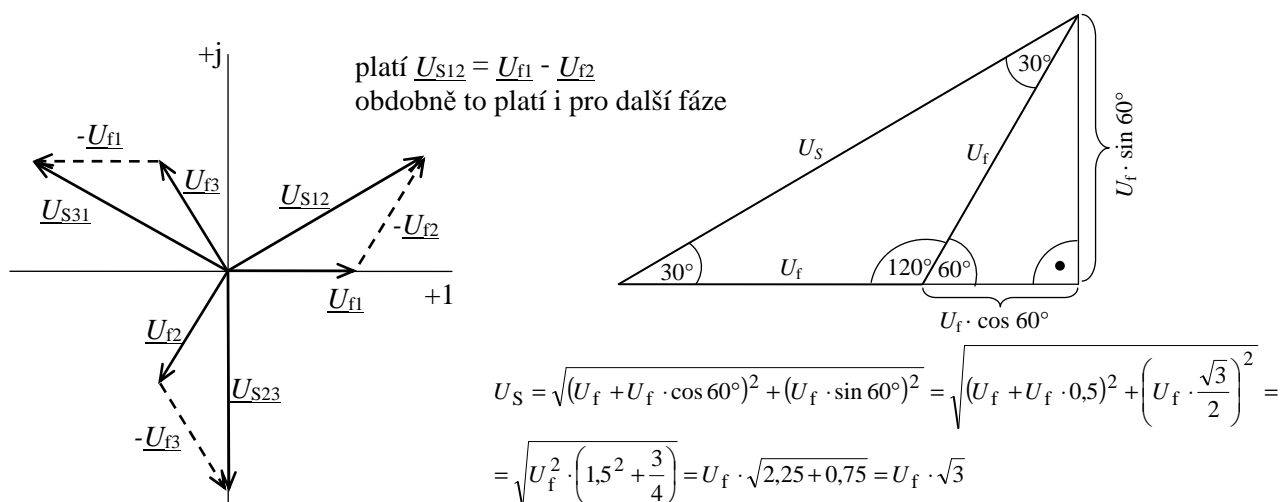
$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= 0 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.3 Fázové a sdružené napětí

Z trojfázové soustavy můžeme získat dvě velikosti napětí.

- Fázové napětí. Je to napětí mezi fázovým vodičem a nulovým vodičem. O tomto napětí jsme mluvili v minulé kapitole. V trojfázové soustavě máme tři fázová napětí, která jsou stejně velká a jsou vůči sobě fázově posunuta o 120° . Fázové napětí se označuje U_f . V naší síti nízkého napětí je fázové napětí 230V (zaokrouhleně).

- Sdružené napětí. Je to napětí mezi dvěma fázovými vodiči. Jeho velikost lze vypočítat jako fázorový rozdíl dvou fázových napětí, viz. obr. 7 a vztah 4.8. V trojfázové síti máme tři sdružená napětí, která jsou stejně velká a vzájemně fázově posunutá opět o 120° . Sdružené napětí se značí U_S . Platí že $U_S = \sqrt{3} \cdot U_f$. V naší síti nízkého napětí je hodnota sdruženého napětí 400V.



Obr. 7 Znárodnění vztahu mezi fázovým a sdruženým napětím ve fázorovém diagramu a odvození velikosti sdruženého napětí.

V trojfázových obvodech je velmi důležitý vztah mezi velikostí fázového a sdruženého napětí:

$$U_S = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (4.8)$$

4.4 Zapojení trojfázových spotřebičů a zdrojů do hvězdy - Y a trojúhelníka - D

Jak trojfázové zdroje, tak spotřebiče většinou obsahují v principu 3 prvky:

- rezistory - např. u tepelných spotřebičů jako jsou trojfázové elektrické pece a ohříváče,
- cívky - např. u trojfázových motorů a generátorů, nebo transformátorů,
- kondenzátory - např. u trojfázových zařízení pro kompenzaci jalového výkonu,
- nebo nějakou jejich kombinaci.

Tyto prvky mohou být zapojeny do hvězdy (označuje se písmenem Y), nebo do trojúhelníka (označuje se písmenem D). Každý tento prvek tvoří jednu fázi zdroje nebo spotřebiče.

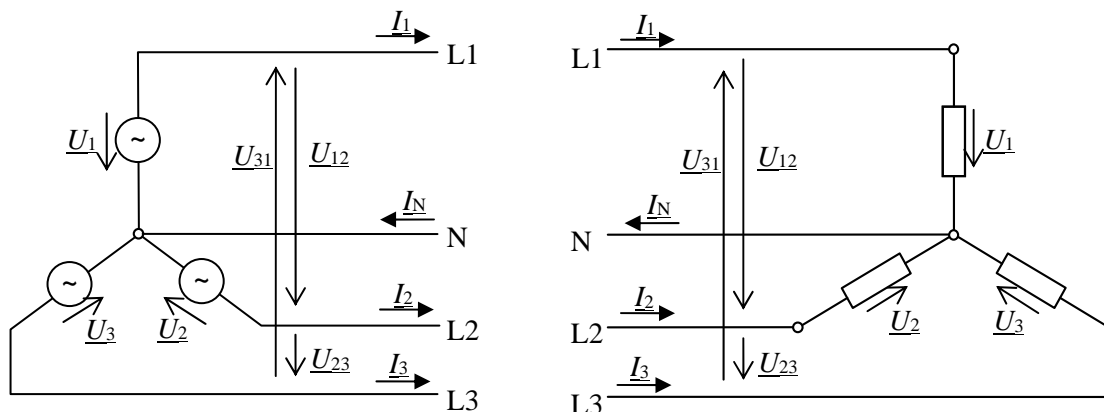
Zapojení do hvězdy Y

Zapojení zdroje a spotřebiče do hvězdy je na obrázku 8.

V zapojení do hvězdy je na jednotlivé fáze spotřebiče připojeno fázové napětí sítě (v naší síti nejčastěji 230V). Fázovými vodiči sítě protéká stejný proud jako fázemi spotřebiče – síťový proud $I = I_f$.

V případě, že je zdroj i spotřebič souměrný (fázová napětí přesně stejně velká a posunutá přesně o 120° ,

impedance všech fází spotřebiče stejné), jsou všechny tři proudy I_1 , I_2 a I_3 stejně velké a vzájemně posunuté o 120° . Jejich součet je nula (viz obr. 6) a nulovým vodičem pak neprotéká žádný proud $I_N = 0$.



Obr. 8 Zapojení trojfázového zdroje a spotřebiče do hvězdy

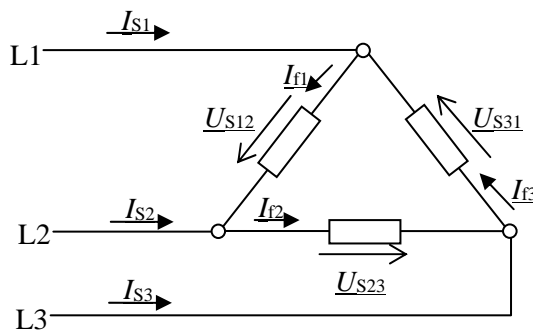
Zapojení do trojúhelníka D

Zapojení spotřebiče do trojúhelníka je na obrázku 9. (Zapojení zdroje do trojúhelníka by bylo obdobné.) V zapojení do trojúhelníka není nulový vodič. Jednotlivé fáze spotřebiče jsou připojeny na sdružené napětí sítě (v naší síti většinou 400V). Potom fázové napětí spotřebiče je rovno sdruženému napětí sítě, nebo také síťovému napětí. $U = U_S = U_{f\text{spotřebiče}}$

Praktická poznámka: Z toho plyne, že do trojúhelníka je možné zapojit pouze takový trojfázový spotřebič, který je na to dimenzován. To znamená že jeho fáze jsou navrženy na sdružené napětí. Pokud by byly fáze spotřebiče navrženy na fázové napětí (např. 230V), po přepojení do trojúhelníka by se na nich objevilo napětí sdružené (400V), spotřebič by se spálil. Při neodborném zapojování trojfázových motorů se to někdy stává.

V zapojení do trojúhelníka teče fázovými vodiči sítě sdružený proud, tedy síťový proud se rovná sdruženému proudu $I = I_S$. Odvození pro velikost fázového a sdruženého proudu pro souměrný spotřebič by bylo stejné jako pro fázové a sdružené napětí (obr. 7). Pro velikost sdruženého proudu platí:

$$I_S = \sqrt{3} \cdot I_f \quad (4.9)$$



Obr. 9 Zapojení trojfázového spotřebiče do trojúhelníka

Zdroj a k němu připojený spotřebič může, ale nemusí být zapojen stejně. Je možná kombinace, kdy zdroj je zapojen do hvězdy a spotřebič do trojúhelníka, nebo opačně zdroj do trojúhelníka a spotřebič do hvězdy. V tom případě ale nemůže být uzel spotřebiče připojen k nulovému vodiči, protože zdroj zapojený do trojúhelníka žádný nulový vodič nemá.

4.5 Výkony v trojfázových soustavách

Činný, jalový i zdánlivý výkon v trojfázové soustavě je dán součtem výkonů jednotlivých fází. Příklad uvedeme nejprve pro zdánlivé výkony: $S = S_1 + S_2 + S_3 = U_{f1} \cdot I_{f1} + U_{f2} \cdot I_{f2} + U_{f3} \cdot I_{f3}$

Výše uvedený vztah platí pro souměrnou i nesouměrnou trojfázovou soustavu.

Jsou-li zdroj i spotřebič souměrný, platí: $S = 3 \cdot U_f \cdot I_f$

Pokud nemůžeme měřit napětí a proudy uvnitř spotřebiče, ale jen na jeho svorkách (nemůžeme ho rozebrat), je nutné vyjádřit fázové napětí a proudy z hodnot na svorkách – z takzvaných síťových hodnot. Pro zapojení do trojúhelníka platí:

$$U = U_{f\text{spotřebice}} ; I = I_S = I_f \cdot \sqrt{3} \Rightarrow I_f = \frac{I}{\sqrt{3}} ; S = 3 \cdot U_f \cdot I_f = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Pro zapojení do hvězdy platí:

$$I = I_{f\text{spotřebice}} ; U = U_S = U_f \cdot \sqrt{3} \Rightarrow U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} ; S = 3 \cdot U_f \cdot I_f = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

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

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.10)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Je vidět že konečné vztahy jsou stejné, ať už je spotřebič zapojen do hvězdy nebo do trojúhelníka.

Vztahy pro činný a jalový výkon jsou obdobné jako pro zdánlivý, s tím že je v nich navíc $\cos \varphi$ a $\sin \varphi$.

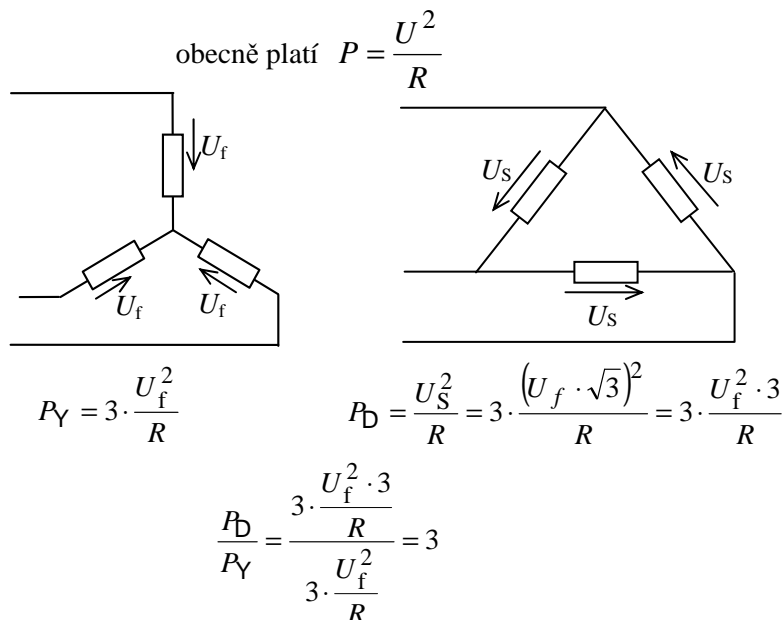
Vztah 4.10. platí pro souměrné trojfázové obvody a U a I jsou takzvané síťové hodnoty (napětí mezi fázovými vodiči a proud ve fázovém vodiči).

Pro praxi je důležité určit, jaký výkon má jeden a tentýž trojfázový spotřebič v zapojení do hvězdy a do trojúhelníka.

Na obr. 10 je to odvozeno pro spotřebič sestávající ze tří lineárních rezistorů.

Teoreticky je výkon při zapojení do trojúhelníka 3krát větší než při zapojení do hvězdy. V případě, že zátěž není lineární, tak tento poměr není přesně 3.

Změny výkonu spotřebiče při přepínání zapojení mezi hvězdou a trojúhelníkem se využívá při regulaci některých tepelných spotřebičů, nebo při spouštění trojfázových asynchronních motorů.



Obr. 10 Odvození výkonu v zapojení do hvězdy a do trojúhelníku

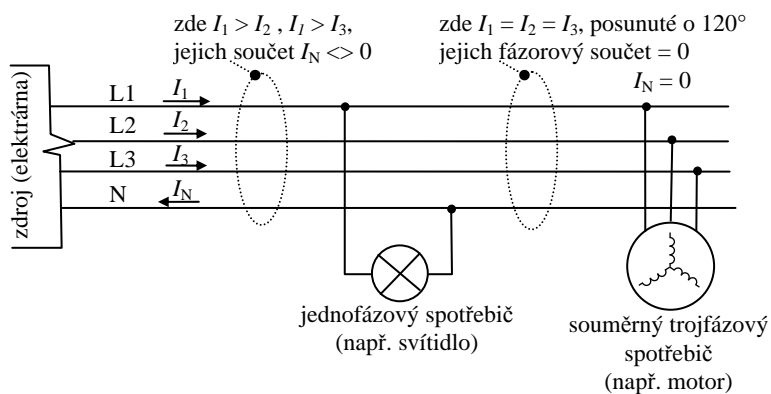
4.6 Nesouměrné (nesymetrické) trojfázové soustavy

Zdroje elektrické energie jsou v trojfázové elektrizační soustavě vždy souměrné (generátory v elektrárnách). Přenosové cesty (vedení a transformátory) jsou také přibližně souměrné. To co způsobuje nesouměrnost v trojfázových soustavách jsou tedy spotřebiče.

Trojčázové spotřebiče jsou většinou konstruovány jako souměrné, nesouměrnost pak způsobují jednofázové spotřebiče připojené do trojfázové sítě. Je to běžný způsob připojování elektrických spotřebičů do sítě, a je naznačen na obr. 11.

Nesouměrnost se projeví tím, že nulovým vodičem bude protékat proud, vznikne takzvaná proudová nesymetrie.

Teto proudová nesymetrie vyvolá následně i malou nesymetrii napětí. Protože více zatíženou fází (na obr. 11 je to fáze L1) teče větší proud než zbývajícími fázemi, bude ve fázi L1 větší i úbytek napětí mezi zdrojem a spotřebičem. Proto bude na konci vedení ve fázi L1 o trochu nižší napětí než ve zbývajících fázích – vznikne napětíová nesymetrie. V běžné elektrizační síti bývá napětíová nesymetrie velmi malá.



Obr. 11. Vznik nesymetrie vlivem jednofázového spotřebiče v trojfázové síti

Praktická poznámka: Jednofázové spotřebiče bývají běžně konstruovány na fázové napětí (u nás 230V) a zapojují se mezi fázový a nulový vodič. Jednofázové zásuvky jsou tedy jednofázovou odbočkou z trojfázové sítě, kde je vyvedena fáze a nulový vodič (a navíc ochranný vodič, o kterém jsme se zatím nezmiňovali).

Některé jednofázové spotřebiče mohou být výjimečně konstruovány na sdružené napětí, ale není to příliš časté.