

ANALÝZA A DÔSLEDKY NESYMETRICKÉHO ZAŤAŽENIA TROJFÁZOVEJ SIETE

ANALYSIS AND EFFECTS OF UNSYMMETRICALLY LOADED THREE-PHASE NETWORK

Michal Pokorný, Juraj Altus, Milan Novák, Alena Otčenášová

Katedra elektrickej trakcie a energetiky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita,
Veľký diel, 010 26 Žilina, Slovensko

Abstrakt V článku je analyzovaná prúdová a napätová nesymetria spôsobená rôznymi druhmi nesymetrických spotrebičov v sústavách vn a vvn. Poukazuje sa na rôzne definície nesymetrie v porovnaní s hodnotami udávanými prístrojmi na meranie kvality elektrickej energie. Vzhľadom na nesymetriu prúdov sú aj účinníky a výkony vo vedeniach odlišné od situácie pri súmerných trojfázových odberoch.

Summary The paper analyses current and voltage unbalance caused by various unsymmetric loads in MV and HV networks. It refers to a different unbalance definitions and compares them with the values measured by apparatus dedicated to the power quality measurements. If the current unbalance exists, power factors and powers in the electrical lines are not the same as for the symmetrical three-phase loads.

1. ÚVOD

Napätová nesymetria v sústavách vn a vvn v súčasnosti nespôsobuje problémy, pretože aj nesymetrické spotrebiče nevyvolávajú napätovú nesymetriu, ktorej veľkosť (posudzovaná podľa súčiniteľa napätovej nesymetrie ρ_U) by presahovala limitné úrovne. To je dané najmä veľkosťou impedancie siete v mieste spoločných napájacích bodov, v ktorých sú nesymetrické spotrebiče pripojené. Táto impedancia je vo väčšine prípadov relatívne malá, vzhľadom na dostatočne veľké skratové výkony siete v týchto bodoch. Medzné hodnoty napätovej nesymetrie stanovuje norma STN EN 50160 [4], kde je uvedené, že spätná zložka napätia nesmie presiahnuť 2 % zo súslednej zložky.

Prúdová nesymetria nie je podľa noriem kvalitatívnym parametrom elektrickej energie. Môže teda nadobúdať ľubovoľné hodnoty. Pri malých spotrebičoch ani veľká prúdová nesymetria nemá ďalšie negatívne vplyvy, veľké nesymetrické spotrebiče však už môžu negatívne ovplyvniť symetriu napätí.

Pri postupnom zavádzaní nových noriem STN zameraných na kvalitatívne parametre elektrickej energie (napr. [4], [5]) sa výrobcovia, distributéri i spotrebitelia elektrickej energie čoraz častejšie zaoberajú meraním týchto parametrov. Nesymetrické spotrebiče môžu v niektorých prípadoch spôsobovať určité problémy najmä pri interpretácii polohy fázorov prúdov, toku výkonov a podobne.

2. DEFINÍCIE NESYMETRIE

Pri trojfázových sústavách sa za nesymetrické (aj podľa noriem, napr. STN IEC 50 (161), [3]) vo všeobecnosti považujú také tri fázory, ktorých veľkosti nie sú rovnaké a/alebo ich vzájomné natočenie

v komplexnej rovine nie je rovnaké, t. j. 120° („klasická“ definícia nesymetrie). To platí pre napätia i pre prúdy. Ak posudzujeme sústavu napätí a prúdov, potom k podmienkam symetrie (rovnaké veľkosti a vzájomné natočenia fázorov) pristupuje ešte **podmienka rovnakého sledu fáz** napätí a prúdov.

Väčšinou sa pri meraní a určovaní limitných hodnôt nesymetrie vychádza zo súčiniteľov nesymetrie, ktoré sa určujú po rozklade nesymetrickej sústavy fázorov na súmerné zložkové sústavy súslednú a spätnú a nulovú (netočivú) sústavu, ako pomer absolútnych hodnôt spätnej a súslednej zložky, napr. pre prúdy

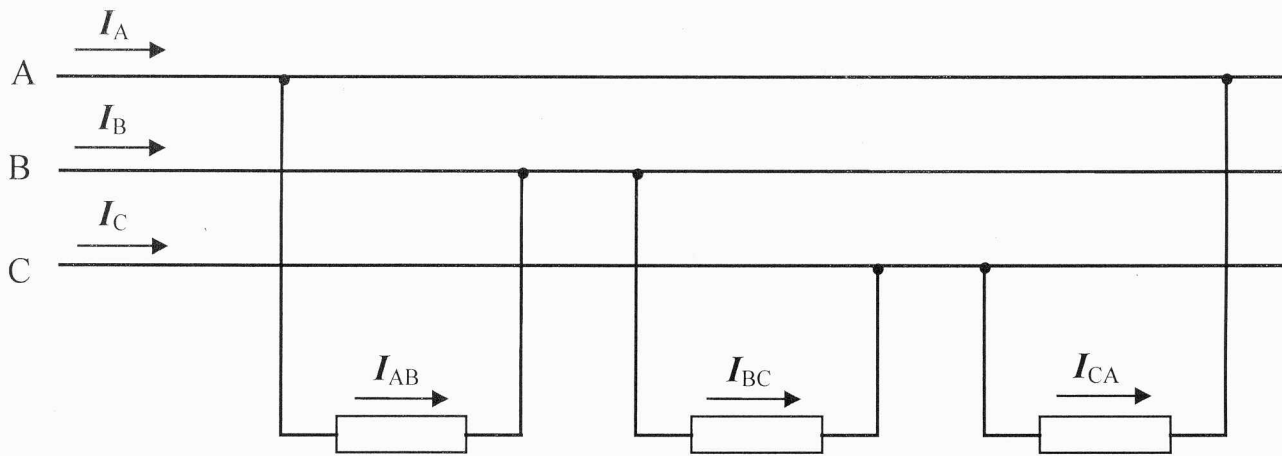
$$\rho_i = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100 \quad (\%), \quad (1)$$

kde je I_- a I_+ absolútna hodnota spätnej, resp. súslednej zložky prúdu. Podobný vzťah platí aj pre napätia. Tu sa **za symetrické považujú také tri fázory, ktoré pri rozklade na súmerné zložky nevytvoria spätnú zložkovú sústavu a súčiniteľ nesymetrie má nulovú hodnotu.**

Táto druhá definícia symetrie však nie vo všetkých prípadoch vyžaduje splnenie rovnakej veľkosti fázorov a fázových posunov medzi nimi ako bolo uvedené vyššie. Najprv sa presvedčíme, že výpočet súčiniteľa nesymetrie pre spotrebič zapojený do trojuholníka je možné vykonať z prúdov spotrebiča I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} , s rovnakým výsledkom, ako pri výpočte z prúdov vo fázach prívodného vedenia I_A , I_B , I_C - pozri obr. 1. Pri výpočte z prúdov spotrebiča

$$\rho_i = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100 = \frac{|I_{AB} + a^2 \cdot I_{BC} + a \cdot I_{CA}|}{|I_{AB} + a \cdot I_{BC} + a^2 \cdot I_{CA}|} \cdot 100, \quad (2)$$

kde a je komplexný jednotkový operátor, $a = 1 \angle 120^\circ$.



Obr. 1. Prúdy spotrebiča a prúdy v prívodnom vedení.
Fig. 1. Appliance and supply line currents.

Z prúdov vo fázach vedenia určíme tú istú veličinu podobne

$$\rho_i = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100 = \frac{|I_A + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C|}{|I_A + a \cdot I_C + a^2 \cdot I_B|} \cdot 100 \quad (3)$$

Ak do vzťahu (3) dosadíme nasledovné vzťahy medzi prúdmi spotrebiča a prúdmi vo fázach vedenia

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}, \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}, \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}, \quad (4)$$

dostaneme po úprave

$$\rho_i = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100 = \frac{|(-1) \cdot (a^2 \cdot I_{AB} + a \cdot I_{BC} + I_{CA})|}{|I_{AB} + a \cdot I_{BC} + a^2 \cdot I_{CA}|} \cdot 100 \quad (5)$$

Menovateľ vzťahu (5) je totožný s menovateľom vzťahu (2) a pre čitateľ platí:

- hodnota (-1) nemá vplyv na veľkosť absolútnej hodnoty,
- natáčanie jednotlivých fázorov jednotkovým operátorom a , resp. a^2 je periodicky posunuté voči vzťahu (2), výsledná veľkosť súčtu natočených fázorov ale bude rovnaká ako v číta-teli vzťahu (2).

Výpočet súčiniteľa prúdovej nesymetrie ρ_i podľa vzťahov (2) a (3) vedie k rovnakému výsledku.

Tu sa stretávame so známou skutočnosťou, že z prúdov spotrebiča vždy vieme určiť prúdy vo fázach vedenia, ale naopak to nie je jednoznačne možné. Rovnaké prúdy vo fázach vedenia môžu byť spôsobené rôznymi kombináciami prúdov spotrebiča zapojeného do trojuholníka. Ak sú prúdy vo vedení symetrické (t. j. podľa klasickej definície symetrie majú rovnakú veľkosť, rovnaký vzájomný fázový posun 120° a správny sled fáz), súčiniteľ prúdovej nesymetrie má hodnotu $\rho_i = 0$. Aj pri výpočte z prúdov spotrebiča vyjde nulová hodnota

súčiniteľa prúdovej nesymetrie a to aj v tom prípade, keď prúdy spotrebiča nespĺňajú klasickú definíciu symetrie.

Ďalej je možné dokázať, že tri fázory nevytvoria spätnú zložkovú sústavu, ak ich koncové body ležia vo vrchoch rovnostranného trojuholníka. To platí pre prúdy spotrebiča i pre prúdy vo fázach vedenia. Podmienka nulovej spätnej zložky pre prúdy vo fázach vedenia:

$$I_- = \frac{1}{3} \cdot (I_A + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C) = 0 \quad (6)$$

Ak naozaj ležia koncové body fázorov I_A , I_B a I_C vo vrchoch rovnostranného trojuholníka, musia mať všetky strany tohto trojuholníka rovnakú veľkosť. To je možné zapísať napr. nasledovne:

$$|I_A - I_B| = |I_B - I_C| = |I_C - I_A| \quad (7)$$

Ak zo vzťahu (6) vyjadríme prúd I_A a dosadíme do prvej časti rovnosti (7) dostávame

$$|-a^2 \cdot I_B - a \cdot I_C - I_B|$$

a po úprave

$$|-a^2 \cdot I_B - a \cdot I_C - I_B| = |-(a^2 + 1) \cdot I_B - a \cdot I_C| = |a \cdot I_B - a \cdot I_C| = |a \cdot (I_B - I_C)| = 1 \cdot |I_B - I_C|$$

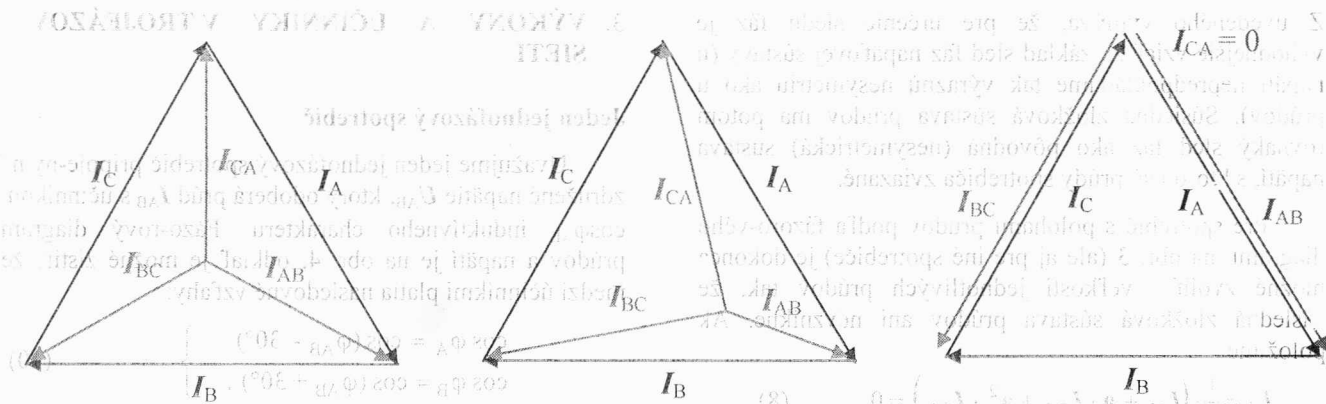
Pretože všetky tri časti rovnosti (7)

$$|I_C + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C| = |(1 + a) \cdot I_C + a^2 \cdot I_B| = |-a^2 \cdot I_C + a^2 \cdot I_B| = |a^2 \cdot (I_B - I_C)| = 1 \cdot |I_B - I_C|$$

Pretože všetky tri časti rovnosti (7) sú rovnaké a skúmané tri fázory tvoria súmernú sústavu (nevytvárajú spätnú zložku), je vyššie uvedený predpoklad o podmienkach symetrie splnený.

Je teda možné konštatovať, že **tri fázory nevytvárajú spätnú zložkovú sústavu, ak majú správny sled fáz a ich koncové body ležia vo vrchoch rovnostranného trojuholníka.**

Príklady fázorových diagramov prúdov rôznych spotrebičov v zapojení do trojuholníka, ktoré pôsobia ako symetrické spotrebiče (nevytvárajú spätnú zložkovú

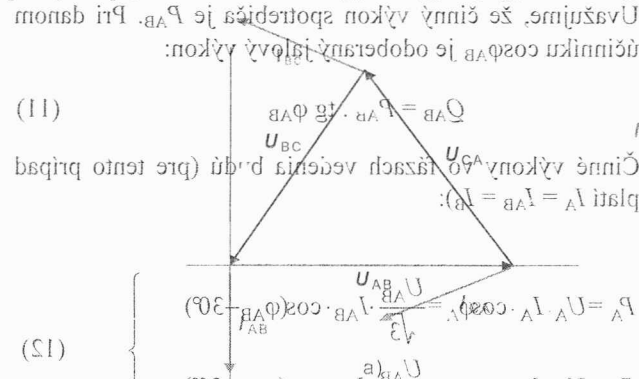


Obr. 2. Príklady prúdov spotrebiča v zapojení do trojuholníka kedy nevzniká spätná zložka: a) súmerné prúdy spotrebiča, b) „nesúmerné“ prúdy spotrebiča, c) spotrebič s jednou chýbajúcou vetvou.
 Fig. 2. Examples of delta connected appliance currents with zero negative sequence: a) appliance with symmetrical currents, b) appliance with „unsymmetrical“ currents, c) appliance with one branch missing.

sústavu), sú na obr. 2. V prípade c) je fázor prúdu I_{CA} síce nulový, ale môžeme uvažovať, že jeho koncový bod je totožný s počiatočným a leží v počiatku zvyšných dvoch fázorov I_{AB} a I_{BC} .

Situácia s nesymetriou, aká bola popísaná pre prúdy, je podobná i pre napätia, kde fázové napätia nevytvoria spätnú zložkovú sústavu i keď nie sú rovnako veľké a nie je medzi ich fázormi rovnaký uhol. Opäť stačí, ak koncové body ich fázorov ležia vo vrcholoch rovnostranného trojuholníka. **Meracie prístroje v týchto prípadoch posudzujú nesymetriu ako veľmi dobrú, pričom fázory fázových napätí nemusia vyhovovať klasickej definícii nesymetrie.**

Poznámka k sledu fáz. Obvykle sa pri nesúmerných sústavách hovorí, že súsledná zložková sústava má rovnaký sled fáz ako pôvodná nesymetrická sústava. To ale neplatí pre všetky prípady vidieť napr. obr. 3c, kde súsledná zložková sústava a pôvodná sústava majú opačný sled fáz. Fázory v tomto prípade sú obrátené. Platí to pre všetky prípady, keď je $\rho_i > 100\%$. Ak je $\rho_i < 100\%$, fázory sú v rovnakom smere. Uvažujeme, že činný výkon spotrebiča je P_{AB} . Pri danom



Obr. 3. Fázorové diagramy nesúmernej sústavy prúdov: a) napätia a prúdy b) nesúmerné prúdy c) súsledná zložková sústava prúdov.
 Fig. 3. Phasor diagrams of unsymmetrical currents: a) currents and voltages, b) unsymmetrical currents, c) positive sequence currents.

môžeme vypočítať veľkosť a polohu súslednej zložky pre fázy A-B

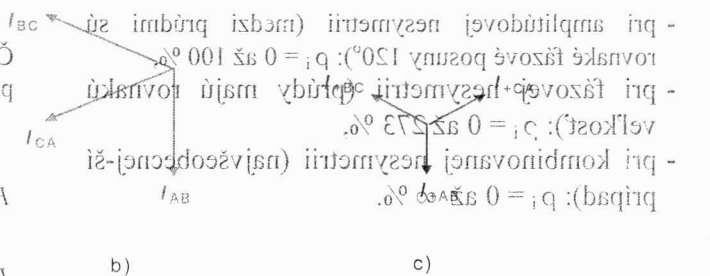
Pre splnenie týchto podmienok musíme nájsť veľkosť a polohu súslednej zložky pre fázy A-B a znázorniť fázory súslednej zložkovej sústavy na obr. 3c. Podobne môžeme určiť aj spätnú zložku prúdov:

$$I_{AB} = 66,67 \text{ A} \angle -30^\circ$$

a vyčíslit súčiniteľ prúdovej nesymetrie $\rho_i = \frac{I_{AB}}{I_{CA}} = \frac{66,67}{100} = 0,6667 = 66,67\%$

ktorý je v tomto prípade väčší ako 100%. Pre prípad rovnakej veľkosti všetkých troch fázorov (existuje len fázová nesymetria), sú dáta vo všetkých prípadoch ukázať, že pre:

- $\rho_i < 100\%$ je sled fáz pôvodnej nesymetrickej sústavy a súslednej zložkovej sústavy zhodný
- $\rho_i > 100\%$ je sled fáz pôvodnej nesymetrickej sústavy a súslednej zložkovej sústavy opačný



Z uvedeného vyplýva, že pre určenie sledu fáz je výhodnejšie vziať za základ sled fáz napäťovej sústavy (u napätí nepredpokladáme tak výraznú nesymetriu ako u prúdov). Súsledná zložková sústava prúdov má potom rovnaký sled fáz ako pôvodná (nesymetrická) sústava napätí, s ktorou sú prúdy spotrebiča zviazané.

Pre spotrebič s polohami prúdov podľa fázoro-vého diagramu na obr. 3 (ale aj pre iné spotrebiče) je dokonca možné zvoliť veľkosti jednotlivých prúdov tak, že súsledná zložková sústava prúdov ani nevznikne. Ak položíme

$$I_+ = \frac{1}{3} \cdot (I_{AB} + a \cdot I_{BC} + a^2 \cdot I_{CA}) = 0, \quad (8)$$

pričom podľa obr. 3 sú polohy prúdov

$$I_{AB} = I_{AB} \angle -90^\circ, I_{BC} = I_{AB} \angle 150^\circ, I_{CA} = I_{CA} \angle -150^\circ,$$

čo po dosadení do vzťahu (8) dáva

$$I_{AB} \angle -90^\circ + I_{AB} \angle -90^\circ + I_{CA} \angle 90^\circ = 0.$$

Pre splnenie tejto podmienky musí byť reálna aj imaginárna časť výrazu nulová:

Re: $0 + 0 + 0 = 0$...platí pre všetky hodnoty veľkostí prúdov,

$$\text{Im: } -I_{AB} - I_{BC} + I_{CA} = 0. \quad (9)$$

Ak zvolíme napr. $I_{AB} = 100$ A, $I_{BC} = 50$ A, môžeme zo vzťahu (9) určiť $I_{CA} = 150$ A. Pre tieto veľkosti prúdov bude $I_- = 0$ a súčiniteľ prúdovej nesymetrie $\rho_i \rightarrow \infty$.

Hodnoty súčiniteľa prúdovej nesymetrie môžu nadobúdať rôznu veľkosť, ktorá je [2]:

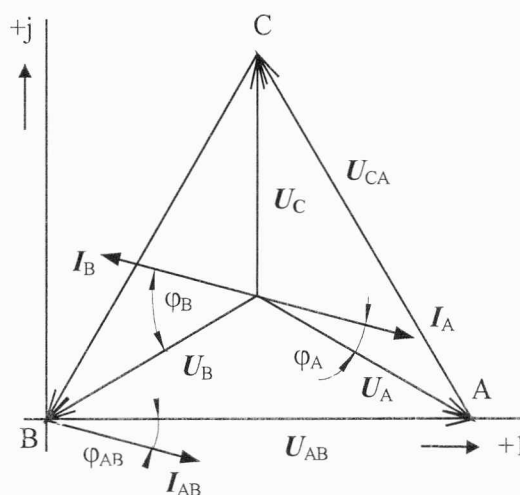
- Pre jeden spotrebič pripojený na združené napätie:
 - $\rho_i = 100\%$, bez ohľadu na veľkosť odoberaného prúdu a účinník odberu.
- Pre dva spotrebiče, pripojené na dve rôzne združené napätia:
 - oba spotrebiče sú rovnaké: $\rho_i = 50\%$,
 - spotrebiče s účinníkmi induktívneho charakteru: $\rho_i = 0$ až 137% ,
 - ľubovoľná kombinácia spotrebičov: $\rho_i = 0$ až $\infty\%$,
- Pre trojfázový nesymetrický spotrebič:
 - pri amplitúdovej nesymetrii (medzi prúdmi sú rovnaké fázové posuny 120°): $\rho_i = 0$ až 100% ,
 - pri fázovej nesymetrii (prúdy majú rovnakú veľkosť): $\rho_i = 0$ až 273% ,
 - pri kombinovanej nesymetrii (najvšeobecnejší prípad): $\rho_i = 0$ až $\infty\%$.

3. VÝKONY A ÚČINNÍKY V TROJFÁZOVEJ SIETI

Jeden jednofázový spotrebič

Uvažujme jeden jednofázový spotrebič pripojený na združené napätie U_{AB} , ktorý odoberá prúd I_{AB} s účinníkom $\cos\varphi_{AB}$ induktívneho charakteru. Fázorový diagram prúdov a napätí je na obr. 4, odkiaľ je možné zistiť, že medzi účinníkmi platia nasledovné vzťahy:

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_B &= \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$



Obr. 4. Fázorový diagram napätí a prúdov pre jeden spotrebič.

Fig. 4. Phasor diagram of voltages and currents for single appliance.

Z týchto vzťahov vyplýva, že pri zisťovaní účinníkov vo vedení je možné v niektorej fáze namerať kapacitný charakter účinníka a v inej fáze zasa pomerne nízke hodnoty účinníka induktívneho charakteru a to aj v tom prípade, že účinník jednofázového spotrebiča je v pásme $0,95$ až $1,00$. Ak sa pozrieme na dané spojenie z hľadiska výkonov, vopred vieme, že bilancia činných i jalových výkonov na spotrebiči a vo vedení musí byť totožná. Uvažujme, že činný výkon spotrebiča je P_{AB} . Pri danom účinníku $\cos\varphi_{AB}$ je odoberaný jalový výkon:

$$Q_{AB} = P_{AB} \cdot \text{tg}\varphi_{AB} \quad (11)$$

Činné výkony vo fázach vedenia budú (pre tento prípad platí $I_A = I_{AB} = I_B$):

$$\left. \begin{aligned} P_A &= U_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ P_B &= U_B \cdot I_B \cdot \cos\varphi_B = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Ich súčtom a úpravou dostaneme

$$P_A + P_B = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot [\cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) + \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ)] = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \cos \varphi_{AB} \quad (13)$$

čo naozaj reprezentuje činný výkon spotrebiča. Tu sme však sčítali činné výkony s ohľadom na ich znamienko, čo je z matematického hľadiska v poriadku, ale z pohľadu vedenia sa musia činné výkony preniesť, a preto ich teraz budeme sčítat v absolútnych hodnotách. Potom výsledný prenášaný činný výkon vo vedení P_{SUM} určíme:

- Pre $\varphi_{AB} \in (0^\circ; 60^\circ)$: vzťah pre P_{SUM} je zhodný so vzťahom (13).
- Pre $\varphi_{AB} \in (60^\circ; 90^\circ)$:

$$P_{SUM} = |P_A| + |P_B| = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot [\cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) - \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ)] = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \frac{\sin \varphi_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Porovnaním vzťahov (13) a (14), keďže pre rozsah fázového posunu $\varphi_{AB} \in (60^\circ; 90^\circ)$ platí

$$\frac{\sin \varphi_{AB}}{\sqrt{3}} \geq \cos \varphi_{AB}, \quad (15)$$

zistíme, že vedením prenášaný činný výkon je väčší, ako je činný výkon odoberaný spotrebičom. To sa ale týka účinníkov $\cos \varphi_{AB} \in (0,5; 0)$, t. j. malého množstva jednofázových spotrebičov.

Podobné výsledky dostaneme aj pre jalové výkony:

$$Q_A + Q_B = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot [\sin(\varphi_{AB} - 30^\circ) + \sin(\varphi_{AB} + 30^\circ)] = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \sin \varphi_{AB} \quad (16)$$

Tu sme opäť sčítali jalové výkony s ohľadom na ich znamienko. Pri sčítaní v absolútnych hodnotách dostaneme výsledný prenášaný jalový výkon vo vedení Q_{SUM} :

- Pre $\varphi_{AB} \in (30^\circ; 90^\circ)$: vzťah pre Q_{SUM} je zhodný so vzťahom (16).
- Pre $\varphi_{AB} \in (0^\circ; 30^\circ)$:

$$Q_{SUM} = |Q_A| + |Q_B| = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_{AB} \cdot [-\sin(\varphi_{AB} - 30^\circ) + \sin(\varphi_{AB} + 30^\circ)] = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \frac{\cos \varphi_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

Porovnaním vzťahov (16) a (17), keďže pre rozsah fázového posunu $\varphi_{AB} \in (0; 30^\circ)$ platí

$$\frac{\cos \varphi_{AB}}{\sqrt{3}} \geq \sin \varphi_{AB}, \quad (18)$$

bude aj vedením prenášaný jalový výkon väčší, ako je jalový výkon odoberaný spotrebičom. To sa týka účinníkov $\cos \varphi_{AB} \in (0,866; 1)$, t. j. prevažnej väčšiny jednofázových spotrebičov.

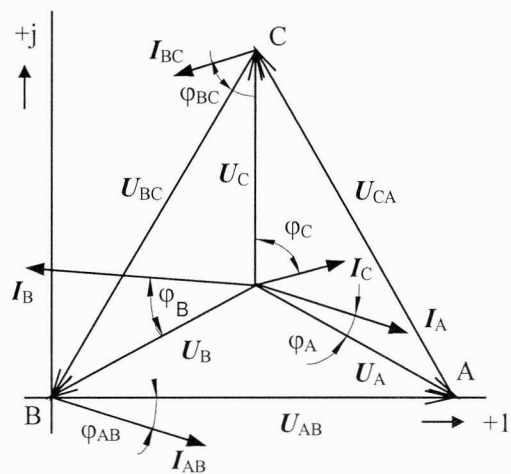
Pretože prúdy tečúce dvomi zaťaženými fázami majú rovnakú veľkosť, budú aj veľkosti zdanlivých výkonov vo fázach rovnaké. Súčet absolútnych hodnôt zdanlivých výkonov vo fázach zodpovedá zdanlivému výkonu spotrebiča len v prípade symetrického trojfázového spotrebiča a v prípade nesymetrického spotrebiča sa musí použiť súčet v komplexnej rovine.

Súhrnne je možné konštatovať, že jednofázový spotrebič pripojený na združené napätie spôsobuje v prívodnom vedení cirkuláciu výkonov:

- pre $\varphi_{AB} \in (0^\circ; 30^\circ)$, t. j. $\cos \varphi_{AB} \in (1; 0,866)$: vedením cirkuluje jalový výkon,
- pre $\varphi_{AB} \in (30^\circ; 60^\circ)$, t. j. $\cos \varphi_{AB} \in (0,866; 0,5)$: vedením necirkuluje výkon,
- pre $\varphi_{AB} \in (60^\circ; 90^\circ)$, t. j. $\cos \varphi_{AB} \in (0,5; 0)$: vedením cirkuluje činný výkon.

Príklady nesymetrických odberov

Uvažujme jednofázové spotrebiče s činným výkonom $P_{AB} = 5$ MW a rôznymi účinníkmi, pripojené na združené napätie $U_{AB} = 110$ kV. Výsledky výpočtov výkonov vo vedení sú uvedené v tab. 1.



Obr. 5. Fázorový diagram napätí a prúdov pre dva spotrebiče.

Fig. 5. Phasor diagram of voltages and currents for two appliances.

V prípade merania vo fázach vedenia by sa teda pre jednofázový spotrebič zistilo, že činný i jalový výkon nie je na dve zaťažené fázy rozdelený rovnomerne a pri niektorých hodnotách účinníka záťaže sa vedením paradoxne prenáša väčší jalový alebo činný výkon (sčítaný v absolútnych hodnotách) ako odoberá spotrebič.

Tab. 1. Príklady jednofázového spotrebiča 5 MW.
Table 1. Examples of single-phase appliance 5 MW.

Účinník $\cos\varphi_{AB}$		0,95	0,6	0,4
Prúd spotrebiča I_{AB} (A)		47,85	75,76	113,64
Jalový výkon spotrebiča Q_{AB} (Mvar)		1,64	6,67	11,46
Zdanlivý výkon spotrebiča S_{AB} (MV.A)		5,26	8,33	12,50
Činné výkony vo vedení (MW)	Fáza A P_A	2,97	4,42	5,81
	Fáza B P_B	2,03	0,58	-0,81
	Celkový P_{SUM}	5	5	6,62
Jalové výkony vo vedení (Mvar)	Fáza A Q_A	-0,62	1,89	4,28
	Fáza B Q_B	2,27	4,78	7,18
	Celkový Q_{SUM}	2,89	6,67	11,46
Výkon cirkulujúci vo vedení	Činný (MW)	-	-	0,81
	Jalový (Mvar)	0,63	-	-

Dva jednofázové spotrebiče

Uvažujme teraz dva jednofázové spotrebiče pripojené na združené napätia U_{AB} , resp. U_{BC} , ktoré odoberajú prúdy I_{AB} , resp. I_{BC} s účinníkmi $\cos\varphi_{AB}$, resp. $\cos\varphi_{BC}$ induktívneho charakteru. Fázorový diagram prúdov a napätí je na obr. 5, odkiaľ je možné zistiť, že medzi účinníkmi vo fázach A a C platia rovnaké vzťahy ako v prípade jedného spotrebiča

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_C &= \cos(\varphi_{BC} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Pre fázový posun medzi napätím a prúdom v prostrednej fáze B sa dá odvodiť vzťah [2]

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \cos\varphi_{BC} - k \cdot \sin\varphi_{BC} - 2 \cdot \sin\varphi_{AB}}{k \cdot \cos\varphi_{BC} + \sqrt{3} \cdot k \cdot \sin\varphi_{BC} + 2 \cdot \cos\varphi_{AB}}\right) \quad (20)$$

kde pomer veľkostí prúdov oboch spotrebičov $k = I_{BC}/I_{AB}$.

V prípade, že oba spotrebiče majú rovnaké veľkosti prúdov

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} - 2 \cdot \sin(\varphi_{AB} + \varphi_{BC})}{1 + 2 \cdot \cos(\varphi_{AB} + \varphi_{BC})}\right) \quad (21)$$

a v prípade, že oba spotrebiče sú úplne rovnaké, správa sa prostredná fáza B ako pri symetrickom trojfázovom spotrebiči, čiže $\varphi_B = \varphi_{AB}$.

Aj v tomto prípade dvoch spotrebičov môžu po napájanom vedení cirkulovať výkony. Niekoľko príkladov:

- Spotrebiče odoberajú len činný výkon, vo vedení však tečie aj výkon jalový. Pre rovnaké spotrebiče: $I_{AB} = I_{BC} = 100$ A, $\cos\varphi_{AB} = \cos\varphi_{BC} = 1$ sú jalové výkony vo fázach vedenia:

$$\begin{aligned} Q_A &= -3,175 \text{ Mvar,} \\ Q_B &= 0, \\ Q_C &= 3,175 \text{ Mvar.} \end{aligned}$$

Pre nerovnaké spotrebiče $I_{AB} = 100$ A, $I_{BC} = 50$ A, $\cos\varphi_{AB} = \cos\varphi_{BC} = 1$ sú jalové výkony vo fázach vedenia:

$$\begin{aligned} Q_A &= -3,175 \text{ Mvar,} \\ Q_B &= 1,588 \text{ Mvar,} \\ Q_C &= 1,588 \text{ Mvar.} \end{aligned}$$

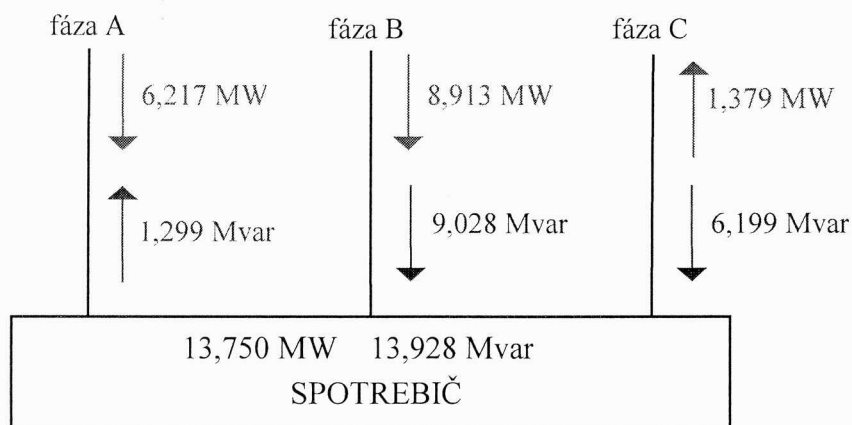
- Vedením cirkuluje aj činný výkon (celkový činný výkon prenášaný vedením je vyšší, ako činný výkon spotrebičov). K tomuto javu dochádza, ak účinník druhého spotrebiča má hodnotu menšiu ako 0,5, bez ohľadu na veľkosť prúdu a účinník prvého spotrebiča. Napr. pre výkony spotrebičov:

$$\begin{aligned} P_{AB} &= 10,450 \text{ MW, } Q_{AB} = 3,435 \text{ Mvar,} \\ P_{BC} &= 3,300 \text{ MW, } Q_{BC} = 10,493 \text{ Mvar,} \end{aligned}$$

t. j. pre $\cos\varphi_{AB} = 0,95$ a $\cos\varphi_{BC} = 0,3$, sú výkony vo fázach vedenia:

$$\begin{aligned} P_A &= 6,217 \text{ MW, } Q_A = -1,299 \text{ Mvar,} \\ P_B &= 8,913 \text{ MW, } Q_B = 9,028 \text{ Mvar,} \\ P_C &= -1,379 \text{ MW, } Q_C = 6,199 \text{ Mvar.} \end{aligned}$$

Vo fáze C sa činný výkon prenáša od spotrebiča do zdroja, t. j. opačne ako v ostatných dvoch fázach. Schéma toku výkonov medzi vedením a spotrebičom pre vyššie uvedený príklad je na obr. 6.



Obr. 6. Schéma toku výkonov.

Fig. 6. Power flow diagram.

4. ZÁVER

Veľké nesymetrické spotrebiče, medzi ktoré patria v prvom rade trakčné transformovne striedavých elektrických dráh a veľké elektrické pece, odoberajú nesymetrické prúdy, ktoré môžu aj v súmerných elektrických sieťach zapríčiniť vznik napäťovej nesymetrie. Nesymetrický spotrebič spôsobí, že po vedení, na ktoré je pripojený, sa prenášajú väčšie výkony než aké spotrebič odoberá (výkony vo vedení cirkulujú), v dôsledku toho ním tečú väčšie prúdy a vznikajú vyššie straty [1].

Pri meraní elektrických veličín vo vedeniach a spotrebičoch, v ktorých tečú nesymetrické prúdy, je potrebné jednotlivo analyzovať každý prípad tak, aby bolo možné namerané výsledky správne interpretovať.

LITERATÚRA

- [1] POKORNÝ, M. - PALEČEK, J.: *Asymmetry in 110 kV Networks Supplying Electric Railways 25 kV, 50 Hz*, XIX. Conference SPETO '96 Gliwice-Ustroň, pp. 397-399
- [2] POKORNÝ, M.: *Nesymetricky zaťažované vedenia vvn*, VŠDS Žilina, 1996
- [3] STN IEC 50 (161) *Medzinárodný elektro-technický slovník. Kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita*, 1993
- [4] STN EN 50160 *Napäťové charakteristiky elektrickej energie dodávanej verejnými rozvodnými sústavami*, 1998
- [5] STN IEC 1000-2-1 *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Časť 2: Prostredie. Oddiel 1: Popis prostredia - elektromagnetické prostredie pre nízkofrekvenčné rušenie šírené vedením a signálmi vo verejných rozvodných sieťach*, 1993