

Nepriaznivé vplyvy nesymetrie napätia na elektrické zariadenia a možnosti ich eliminácie

Úvod

V súčasnosti sa kladú požiadavky nielen na kvantitu vyrábaných produktov, ale čoraz viac sa vyžaduje ich vysoká kvalita. Elektrina sa tiež zaraďuje medzi produkty, hoci ako výrobok má veľmi špecifické vlastnosti. Napriek existujúcim špecifikám musí ako výsledný produkt spĺňať prísne kritériá kvality.

Medzi veličiny, ktoré treba sledovať na stanovenie, či má elektrická energia požadovanú kvalitu, patrí aj nesymetria napätia.

Napätová nesymetria sa považuje za problém týkajúci sa kvality. Hoci napätia na svorkách generátorov a v prenosovej sústave sú "prakticky" úplne symetrické, na úrovni distribučnej sústavy dochádza k nárastu nesymetrie predovšetkým vďaka odlišnej veľkosti impedancií jednotlivých fáz zariadení a existencii rôznych jednofázových spotrebičov.

Relatívne vysoká hodnota nesymetrie môže mať značný vplyv najmä na pripojené indukčné motory. Koeficient prúdovej nesymetrie zvyčajne dosahuje násobky napätovej nesymetrie. Výrazná nesymetria v prúdoch môže viesť k nadmerným stratám v statoroch a rotoroch motorov a môže spôsobiť deštrukciu, resp. vypnutie tepelne preťaženého motora.

Hoci sú indukčné motory navrhnuté tak, aby „tolerovali“ určitú nesymetriu, pri prekročení definovanej hranice je nutné znížiť záťaž motora, resp. daný motor odpojiť od napájacej siete. Životnosť motorov sa pri zvýšenej hladine nesymetrie napätia môže značne skrátiť. Ak je indukčný motor vzhľadom na daný typ aplikácie predimenzovaný, zaisťuje sa tým čiastočná úroveň ochrany, aj keď motor nepracuje najefektívnejšie.

Nesymetria napätia má tiež výrazný vplyv na pohony, ktoré sú riadené frekvenčnými meničmi. Netypické harmonické zložky prúdu, ktoré vznikajú pri existencii nesymetrie napájacieho napätia takého meniča, môžu viesť k nepredpokladaným problémom napr. s kompenzáciou účinníka.

Aj keď nie je možné úplne eliminovať napätovú nesymetriu, môžeme ju udržať v rámci prijateľných hraníc.

Definície nesymetrie a spôsoby jej výpočtu

Amplitúdy napätí merané na svorkách generátorov sú takmer rovnaké a fázovo posunuté o 120° . Ak by boli impedancie jednotlivých fáz prvkov siete rovnaké a lineárne v každej fáze a ak by všetky záťaže boli symetrické a trojfázové, boli by aj napätia symetrické.

Aj keď sa možno zdá, že nesymetria a jej výpočet sú definované jednoznačne, existuje množstvo rozdielnych spôsobov jej výpočtu, pričom aj samotné vypočítané hodnoty nesymetrie sú rozdielne:

1. definícia - v trojfázovom systéme je stupeň napätovej nesymetrie vyjadrený pomerom medzi maximálnou odchýlkou troch fázových napätí od priemernej hodnoty fázových napätí k priemernej hodnote fázových napätí (tzv. IEEE definícia):

$$\text{Nesymetria napätia} = \frac{\text{maximálna odchýlka z 3 fázových napätí od priemernej hodnoty fázových napätí}}{\text{priemerná hodnota fázových napätí}} \cdot 100\%$$

2. definícia - obdobne ako prvá definícia, avšak pri výpočte sa uvažujú združené hodnoty napätí (tzv. NEMA definícia):

$$\text{Nesymetria napätia} = \frac{\text{maximálna odchýlka z 3 združených napätí od priemernej hodnoty fázových napätí}}{\text{priemerná hodnota fázových napätí}} \cdot 100\%$$

3. definícia - nazývaná aj tzv. "pravá" definícia. Určuje sa z pomeru spätnéj a súslednej zložky napätí. Vychádza z teórie rozloženia nesymetrického systému na symetrické zložky: súslednú, spätnú a netočivú.

$$\text{Nesymetria napätia} = \frac{\text{spätná zložka napätia}}{\text{súsledná zložka napätí}} \cdot 100\%$$

Súsledná a spätná zložka sa získajú rozložením nesymetrických napätí \dot{U}_{L1} , \dot{U}_{L2} a \dot{U}_{L3} na 2 symetrické zložky U_1 a U_2 . Tieto symetrické zložky sú dané takto:

$$U_1 = \frac{\dot{U}_{L1} + \dot{a} \cdot \dot{U}_{L2} + (\dot{a})^2 \cdot \dot{U}_{L3}}{3} \quad U_2 = \frac{\dot{U}_{L1} + (\dot{a})^2 \cdot \dot{U}_{L2} + \dot{a} \cdot \dot{U}_{L3}}{3}$$

pričom

$$\dot{a} = 1 \angle 120^\circ$$

a

$$\dot{a}^2 = 1 \angle 240^\circ$$

Keďže prvá a druhá definícia uvažujú iba veľkosti fázorov napätí a nepočítajú s možným rozdielnym uhlom natočenia medzi jednotlivými fázormi napätí, sú "neúplné a nepresné". Tretia definícia počíta aj s rozdielnou amplitúdou, aj s uhlom medzi fázormi.

Ak sa nesymetria počíta podľa tretej definície pod hodnotou 5 %, potom maximálny rozdiel medzi týmto výpočtom a zvyšnými dvoma výpočtami je pod hodnotou 0,8 %. No pri vyšších hodnotách nesymetrie môže tento rozdiel značne narásť.

Výhoda prvej a druhej definície však spočíva predovšetkým v jednoduchosťi ich aplikácie, keďže potrebujeme poznať iba amplitúdy napätí, ktoré jednoducho môžeme odčítať z inštalovaných voltmetro.

Aby nebolo potrebné realizovať výpočty nesymetrie s komplexnými číslami (výpočet pomocou definície č. 3), možno "s určitou nepresnosťou" na tento výpočet použiť približný vzťah:

$$\text{Nesymetria napätia} = \frac{82 \cdot \sqrt{U_{L1L2p}^2 + U_{L2L3p}^2 + U_{L3L1p}^2}}{\text{priemerné združené napätie}} \cdot 100\%$$

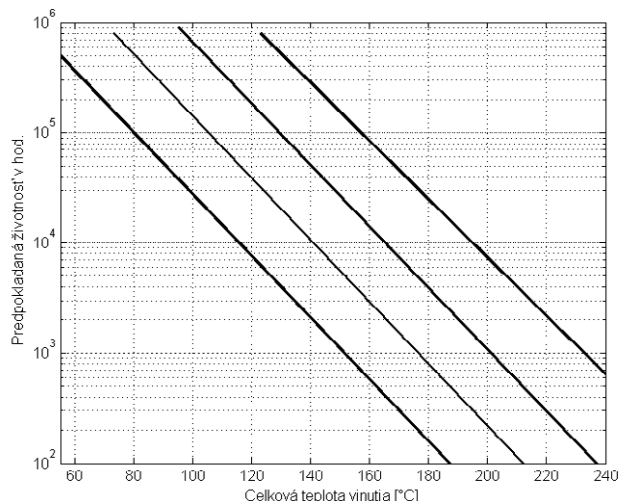
pričom U_{L1L2p} je rozdiel medzi združeným napätím U_{L1L2} a priemerným združeným napätím (to isté platí pre zvyšné napätia). Aplikovaním tohto výpočtu (potrebujeme vedieť iba veľkosti fázorov napätí!) vypočítame hodnotu koeficientu nesymetrie presnejšie ako metódami č. 1 a 2.

Vplyv napätovej nesymetrie na zariadenia

Určité typy zariadení sú značne citlivé na nesymetriu napájacieho napätia. Napríklad, v prípade 3-fázových asynchrónnych motorov nastáva v dôsledku nesymetrie napätia prehrievanie statorového a rotorového vinutia. Rôzne usmerňovače a striadače môžu v prípade ich napájania nesymetrickým napätím generovať pre ne netypické harmonické.

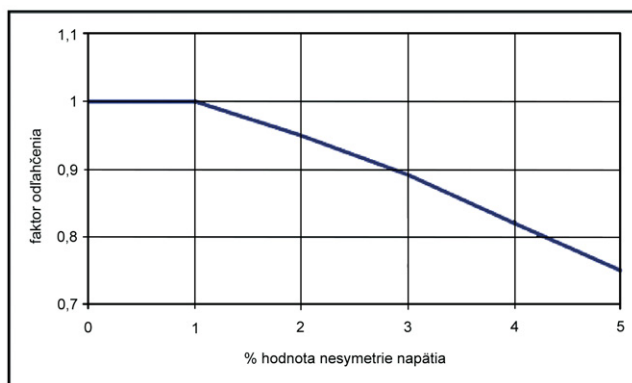
Ak je asynchrónny motor zaťažený menovitým výkonom a napájacie napätie je nesymetrické, potom vinutiami statora a rotora potečú prúdy väčšie ako menovité. To povedie k zníženiu efektívnosti prevádzky motora, zatiaľ čo sa v dôsledku prehrievania bude skracovať jeho predpokladaná životnosť.

Tu treba spomenúť jednoduchú poučku, ktorá znie: "každým zvýšením teploty izolácie o 10 °C sa znižuje životnosť tejto izolácie približne na polovicu!" (Obr. 1).



Obr. 1: Graf závislosti zmeny životnosti izolácie od zmeny jej teploty

Ako bolo uvedené, v motore napájanom nesymetrickým napätím vznikajú "navyše" straty. Aby sa zabránilo jeho preťaženiu, bola navrhnutá tzv. krivka odlahčenia (Obr. 2). Z obrázka je evidentné, že pri 3 % nesymetrii napájacieho napätia treba daný motor odlahčiť približne na 90 % jeho menovitej záťaže, aby životnosť izolácie motora bola rovnaká ako v prípade nulovej nesymetrie napätia.



Obr. 2: Krivka odlahčenia indukčného motora

Ak poznáme hodnotu nesymetrie napätia, vieme výpočtom odhadnúť približný percentuálny nárast teploty izolácie podľa vzťahu (platí pre teplotu udávanú v stupňoch Celzia):

$$\text{Nárast teploty} = 2 \cdot (\text{percentuálna hodnota nesymetrie})^2$$

Teda ak sa nesymetria napätia rovná napr. 3 %, bude hodnota nárastu teploty izolácie približne:

$$2^2 \cdot 3 = 18 \%$$

Takže pre motor, ktorého menovitá prevádzková teplota je 60 °C, bude teplotný nárast približne 18 %. Výsledná teplota bude:

$$60 \text{ °C} \cdot 1,18 = 70,8 \text{ °C}$$

V tomto prípade je výsledná teplota izolácie motora vyššia o približne 10 °C oproti menovitej prevádzkovej teplote, čím sa skrátí životnosť tejto izolácie približne o polovicu!

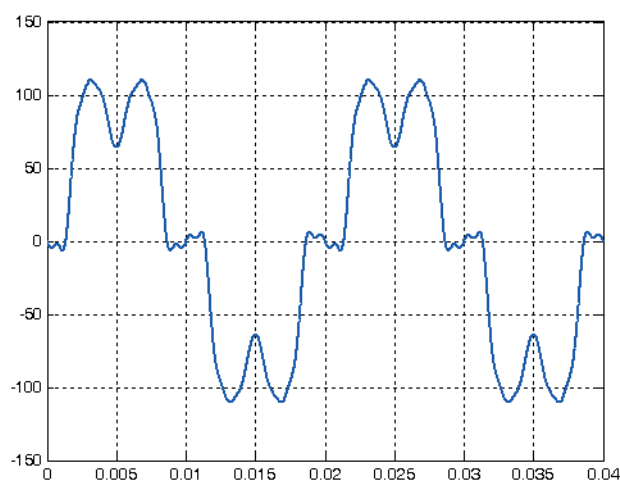
Okrem toho, že dôjde k zníženiu efektívnosti, nadmernému prehrievaniu a skráteniu životnosti, indukčné motory napájané nesymetrickým napätím budú hlučnejšie z dôvodu zmien momentu a pulzovania rýchlosti.

Trojfázové usmerňovače sú základnou súčasťou riadených pohonov a zdrojov nepretržitého napájania – UPS. Tieto usmerňovače generujú deformovaný tvar prúdovej vlny. Ak je napätie napájania symetrické, prúdová vlna zvyčajne nadobúda tvar „dvojitého pulzu na polvlnu“ (Obr. 3). Charakteristické harmonické prúdy tohto priebehu možno vyjadriť pomocou vzťahu:

$$h = 6 \cdot k \pm 1$$

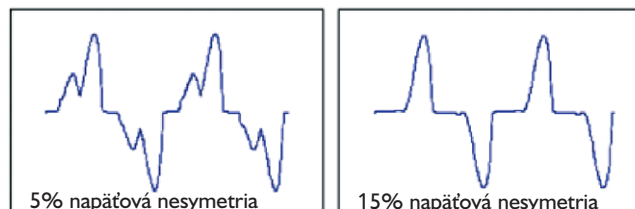
pričom h je rád harmonikovej a $k = 1, 2, 3, \dots$

Na základe tohto vzorca sú charakteristické harmonické: 5., 7., 11., 13., ...



Obr. 3: Tvar prúdovej vlny 3-fázového usmerňovača - symetrické napájanie

Ak je napájanie nesymetrické, môže sa tvar vlny odchýliť od uvedeného tvaru vlny (Obr. 4). Vzniká tzv. jednoimpulzná vlna vedúca k necharakteristickým harmonickým (napr. vzniká 3. harmonická). V takomto prípade môže napätová nesymetria viesť k vypnutiu pohonu z dôvodu vysokých prúdov alebo "nízkeho" napätia v jednosmernom obvode pohonu. Zvýšenie nežiaducich harmonických prúdov netypických frekvencií môže tiež viesť k neželaným problémom s vyššími harmonickými v napájacom systéme - napríklad problém s kompenzáciou účinníka.



Obr. 4: Tvar prúdovej vlny 3-fázového usmerňovača – nesymetrické napájanie

V moderných pohonoch s impulzno-širokovou moduláciou spôsobuje nesymetria napájacieho napätia zvýšenie deformácie prúdov, generovanie 100 Hz zvlnenia napätia v jednosmernom obvode, ako aj zvýšenie odberu jalového výkonu.

Potlačenie nesymetrie

Vytvorenie "nulovej" nesymetrie napätia v napájacom systéme je takmer nemožné, a to pre:

- náhodné pripájanie a odpájanie jednofázových záťaží,
- nerovnomerné rozloženie jednofázových záťaží medzi tri fázy,
- prirodzenú nesymetriu elektrickej siete.

Napriek tomu existuje niekoľko možností, ako možno nesymetriu a jej vplyvy potlačiť.

Potlačenie nesymetrie na strane výrobcu/distribútora elektriny:

- prerozdelením jednofázových záťaží čo možno najrovnomernejšie medzi všetky tri fázy,
- znížením nesymetrie napájacieho systému, ktorá je spôsobená rozdielnymi impedanciami jednotlivých fáz siete, napr. pri vedeniach - aplikovanie transfigurácie vedení,
- použitím pasívnych LC prvkov upravujúcich parametre vedení alebo aktívnych elektronických zariadení, ako je SVC (Static Var Compensator). Oproti pasívnym prvkom vedú aktívne systémy dynamicky upravovať vzniknutú nesymetriu.

Potlačenie nesymetrie na strane spotrebiteľa:

- prerozdelením záťaží,
- použitím pasívnych LC prvkov alebo SVC,
- nepripájaním zariadení, ktoré sú citlivé na nesymetriu, na sieť, kde sú pripojené jednofázové záťaže,
- znížením vplyvu nesymetrie na riadené pohony inštalovaním tlmivky vhodnej veľkosti do jednosmerného obvodu pohonu.

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied grantami VEGA č. 1/4075/07 a VEGA č. 1/0166/10.

Použitá literatúra

1. V. J. Gosbell: Voltage Unbalance. In: Technical Note No. 6, October 2002, Power Quality Centre, Integral energy.
2. Motors and Generators, ANSI/NEMA Standard MG1-1993
3. Annette von Jouanne - Basudeb Banerjee: Assessment of voltage unbalance. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 782 - 790, Oct. 2001.
4. R. C. Dugan - M. F. McGranaghan - H. W. Beaty: Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 1996.
5. Austin H. Bonnett: Quality and Reliability of Energy-Efficient Motors. IEEE Industry Application Magazine, Vol. 3, No. 1, pp. 22 - 31, Jan./Feb. 1997.
6. Limits for Voltage Unbalance in the Electricity Supply System. Engineering Recommendation No.10 of the Electricity Distribution Code, Version 1.0, 30th November 2005.
7. Motor Protection Voltage Unbalance and Single-Phasing, Cooper Bussmann, 2003.

Ing. Peter Szathmáry, PhD.,

Ing. Martin Kanálik, PhD.

Power System Management, s. r. o.

Ing. Jozef Rusnák, PhD.

Ing. Marek Hvizdoš, PhD.

**FEI TU v Košiciach
Katedra elektroenergetiky
Mäsiarska 74, 040 01 Košice**