

PÄŤFÁZOVÝ IM V ZAPOJENÍ DO PENTAGONU PRI STRATE NAPÁJACEJ FÁZY

FIVE-PHASE PENTAGON CONNECTED IM OPERATED UNDER ONE-PHASE FAULT

Pavel Záskalický

Katedra elektrotechniky a mechatronky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Slovensko.

Abstrakt: Predkladaný príspevok pojednáva o vlastnostiach päťfázového indukčného motora (IM), ktorého statorové vinutie je zapojené do Pentagonu. Predpokladáme, že motor je napájaný z frekvenčného meniča s ideálnym výstupným harmonickým napájacím napätím. Pre prípad straty napájania jednej fázy vyvolanej poruchou napájacieho meniča sú za pomoci teórie priestorového fázora vypočítané elektrické ako aj elektromechanické parametre stroja. Skrat na meniči sa neuvažuje, pretože takáto porucha je vo väčšine prípadov deštruktívna pre celý pohon. V závere je uvedená jedna z možností zníženia zvlňenia elektromagnetického momentu v poruchovej prevádzke.

Kľúčové slová: Indukčný motor, päťfázový motor, porucha napájania, priestorový fázor.

Abstract: The present paper deals with the behavior of the five-phase induction motor (IM), whose stator winding is connected to a Pentagon. We assume that the motor is supplied from a frequency converter with an ideal harmonic output voltage. For the case of a one-phase supply fault caused by a failure of the power converter components, the electrical and electromechanical quantities of the machine were calculated, using the space phasor theory. A short circuit fault on the converter is not considered in this paper. As such a fault is in the most cases destructive to the entire drive. Finally, one of the possibilities of reducing the electromagnetic torque ripple in fault operation is presented.

Keywords: induction motor, five-phase motor, one phase fault, space phasor.

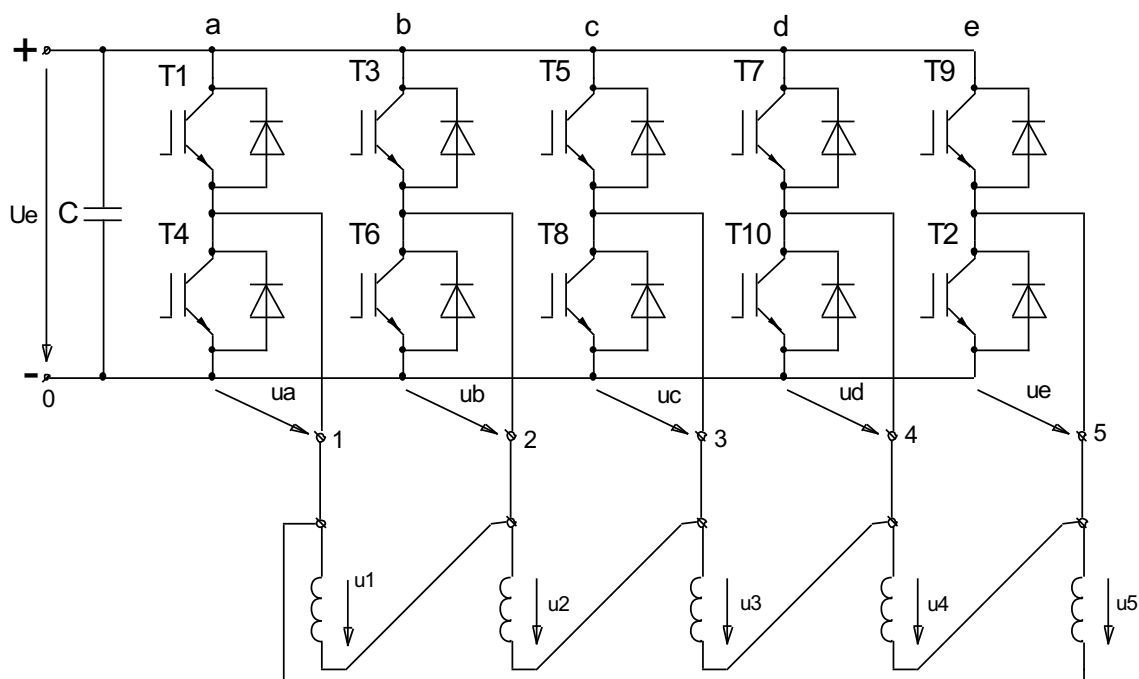
1. Úvod.

V poslednej dobe sa vo svetových vedeckých časopisoch stále viac a viac objavujú príspevky, ktoré pojednávajú o päťfázových strojoch, či už synchronných alebo indukčných. V prípade elektrického pohonu s napájaním cez frekvenčný menič je počet fáz motora nepodstatný. Avšak päťfázové motory majú oproti trojfázovým viaceré výhody. Päťfázové motory majú dokázateľne vyššiu účinnosť a sú menej hlučné, čo je ich výhodou pri použití v mestských aglomeráciách, hoteloch či nemocniciach. Pri päťfázových motoroch sa výkon motora rozloží do viacerých fáz, čím sa zníži prúdové zaťaženie polovodičových prvkov jednotlivých fáz meniča. Tento parameter má veľký význam pri pohonoch veľkých výkonov, kde pri trojfázových motoroch skôr narazíme na strop dovoleného prúdového zaťaženia meniča ako v prípade päťfázových.

Nezanedbateľnou výhodou pohonu s päťfázovým motorom je, že je schopný pokračovať v prevádzke aj pri poruche napájania jednej fázy (štvorfázová prevádzka). V prípade pohonu s trojfázovým motorom takáto prevádzka nie je možná. Uvedená vlastnosť je veľmi vítaná pre pohony, kde porucha a následné jeho vyradenie z činnosti prináša so sebou materiálne škody prípadne veľké prevádzkové komplikácie. Jedná sa hlavne o pohony výťahov vysokých budov, prípadne nemocníc, ale aj banského priemyslu či jadrových elektrární. Je predpoklad ich

nasadzovania aj do koľajových vozidiel mestskej dopravy, kde porucha jednej električky znamená zastavenie prevádzky na celej trati.

Päťfázový motor býva napájaný cez klasický päťfázový napäťový striedač, tak ako je to uvedené na Obr.1. Tento pozostáva z piatich tranzistorových vetiev (a, b, ..., e), obvykle osadených výkonovými IGBT tranzistormi zapojenými do série a premostenými rekuperačnými diódami. Výstupné svorky meniča tvoria uzly jednotlivých vetiev tranzistorov, ktoré sú číslované (1, 2, ..., 5). Striedač je napájaný z jednosmerného napäťového obvodu meniča jednosmerným napätím U_e . Tranzistory sú riadené šírko impulzovou moduláciou (PWM) tak, aby sa na výstupných svorkách objavil symetrický systém päťfázových napätí požadovanej hodnoty. Statorové cievky motora sú zapojené pentagonálne. Fázové napätia motora sú označené $u_1, u_2, \dots, u_5$.



Obr.1. Striedač päťfázového napätia.

2. Matematický model striedača.

Pri stavbe matematického modelu striedača vychádzame z predpokladu že všetky polovodičové prvky sú ideálne a že kondenzátor na jednosmernej strane striedača je dostatočne veľký na to, aby vstupné jednosmerné napätie zostalo konštantné pre akékoľvek zaťaženie na výstupnej strane. Ďalej predpokladáme, že striedač je riadený šírko impulzovou moduláciou (PWM) s vysokou modulačnou frekvenciou ($f_m \geq 10 \text{ kHz}$) tak, aby sme mohli považovať výstupné napätia striedača za harmonické.

Výstupné napätie prvej vetvy striedača (napätie medzi výstupnou svorkou a zápornou svorkou vstupného jednosmerného napätia) môžeme matematicky vyjadriť v tvare:

$$u_a = u_{dc} + u_{01} = \frac{U_e}{2} + r \frac{U_e}{2} e^{j\omega t} \quad (1)$$

Kde: u_{dc} je jednosmerná zložka, u_{01} je striedavá zložka napätia. r je koeficient riadenia $\langle 0;1 \rangle$, $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvencia napätia.

Výstupné napätia ostatných vetiev sú voči sebe posunuté o uhol $\frac{2\pi}{5}$, čo je možné matematicky vyjadriť koeficientom posunutia $\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{5}}$.

Napätia ostatných vetiev je potom možné vyjadriť v tvare

$$\mathbf{u}_b = \mathbf{a}u_a; \quad \mathbf{u}_c = \mathbf{a}^2 u_a; \quad \mathbf{u}_d = \mathbf{a}^3 u_a; \quad \mathbf{u}_e = \mathbf{a}^4 u_a; \quad (2)$$

Fázové napätia motora sú dané rozdielom napätí dvoch susedných napätí vetiev striedača podľa rovníc

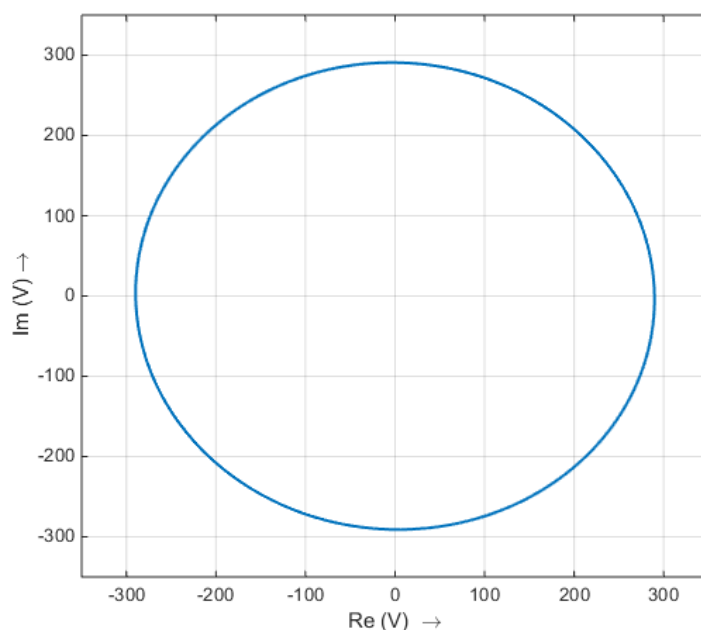
$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{u}_b - \mathbf{u}_a = (\mathbf{a} - 1)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_b = (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a})\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_3 &= \mathbf{u}_d - \mathbf{u}_c = (\mathbf{a}^3 - \mathbf{a}^2)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_4 &= \mathbf{u}_e - \mathbf{u}_d = (\mathbf{a}^4 - \mathbf{a}^3)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_5 &= \mathbf{u}_a - \mathbf{u}_e = (1 - \mathbf{a}^4)\mathbf{u}_{01} \end{aligned} \quad (3)$$

Pre zjednodušenie výpočtov päťfázovej sústavy sa s výhodou využíva teória priestorového fázora (vektora). Priestorový fázor päťfázového napäťového systému je definovaný vzťahom

$$\underline{\mathbf{u}} = \frac{2}{5} \left(\operatorname{Re}(\mathbf{u}_1) + \mathbf{a} \operatorname{Re}(\mathbf{u}_2) + \mathbf{a}^2 \operatorname{Re}(\mathbf{u}_3) + \mathbf{a}^3 \operatorname{Re}(\mathbf{u}_4) + \mathbf{a}^4 \operatorname{Re}(\mathbf{u}_5) \right) \quad (4)$$

Kde: $\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{5}}$ je koeficient priestorového posunutia. V prípade zapojenia do pentagonu je identický s napäťovým posunom.

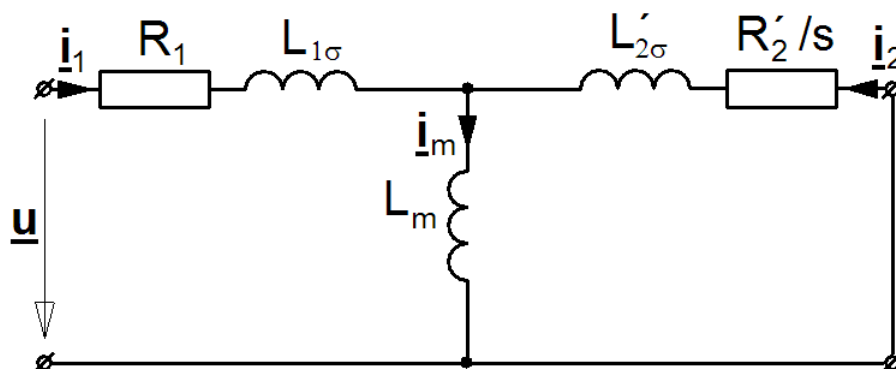
Na Obr.2. je uvedený výpočet trajektórie priestorového fázora päťfázového symetrického systému napätí. Pre symetrický systém je trajektóriou kružnica. Pri výpočte sme predpokladali vstupné jednosmerné napätie striedača $U_e = 550V$, napäťový koeficient $r = 1$ a frekvencia $f = 50Hz$.



Obr.2. Trajektória priestorového fázora napätia.

3. Výpočet prúdov motora.

Pri výpočte prúdov motora vychádzame z jednofázovej náhradnej schémy indukčného stroja, tak ako je to uvedené na Obr.3. Parametre náhradnej schémy boli namerané na reálnom päťfázovom motore a sú uvedené v Prílohe.



Obr.3. Náhradná schéma indukčného stroja.

Z náhradnej schémy pre priestorový fázor prúdu statora vyplýva vzťah

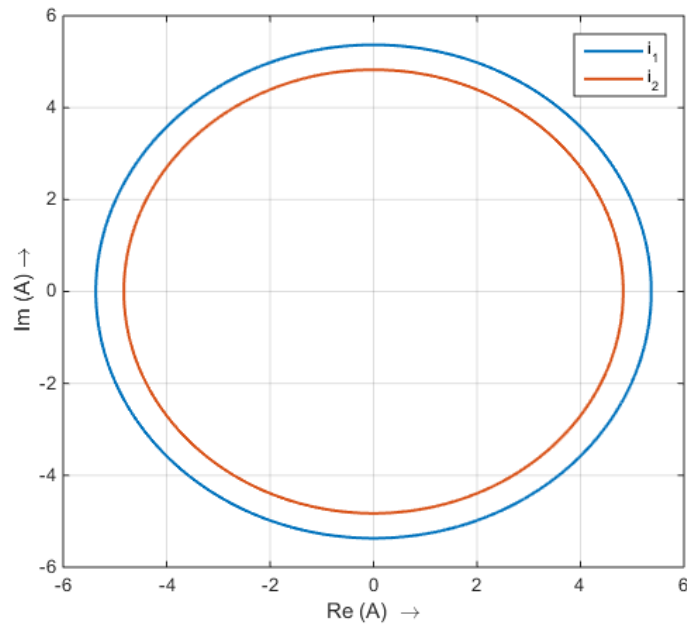
$$\underline{i}_1 = \frac{\underline{u}}{R_1 + \left[j\omega L_{1\sigma} + \frac{j\omega L_m \left(\frac{R'_2}{s} + j\omega L'_{2\sigma} \right)}{\frac{R'_2}{s} + j\omega (L_m + L'_{2\sigma})} \right]} \quad (5)$$

Kde: $s = \frac{\omega - p\omega_m}{\omega}$ je sklz motora. $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvencia napätia, ω_m je mechanická rýchlosť motora a p je počet magnetických párov stroja.

Priestorový fázor rotorového prúdu motora vypočítame použitím Theveninovho teorému

$$\underline{i}'_2 = \frac{\frac{U_{th}}{U_e} \underline{u}}{\frac{R'_2}{s} + R_{th} + j\omega (L_{th} + L'_{2\sigma})} \quad (6)$$

Kde: U_{th} je Theveninovo napätie, R_{th} , L_{th} Thevenova rezistencia a indukčnosť.

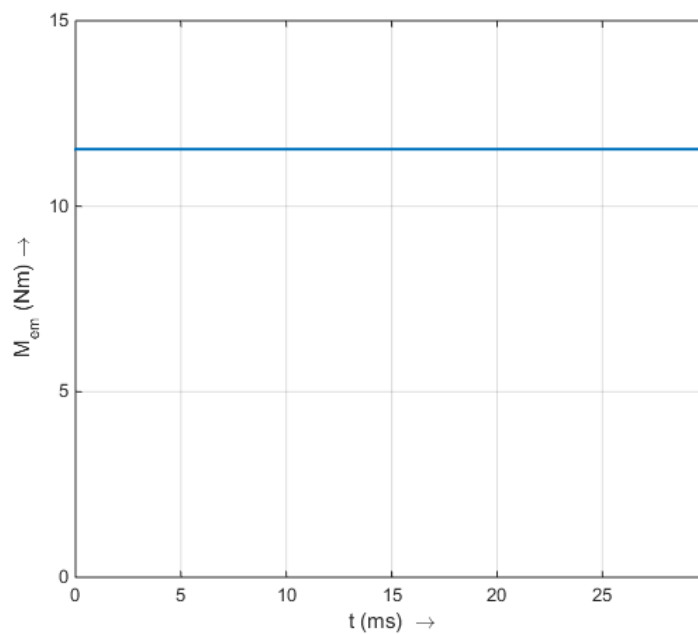


Obr.4. Trajektórie statorového a rotorového prúdu

Na Obr.4. sú uvedené trajektórie priestorových fázorov statorového a rotorového prúdu. Výpočet bol urobený pre nominálnu záťaž motora ($s = 0,04$).

Na základe priestorových fázorov prúdov je možné vypočítať priebeh elektromagnetického momentu motora podľa rovnice

$$M_{em} = \frac{5}{2} p L_m \operatorname{Im}(\underline{i}_1 \underline{i}_2'^*) \quad (7)$$



Obr.5. Priebeh elektromagnetického momentu motora.

Na Obr.5. je uvedený priebeh elektromagnetického momentu motora. Pre motor napájaný symetrickým systémom napätí je tento konštantný.

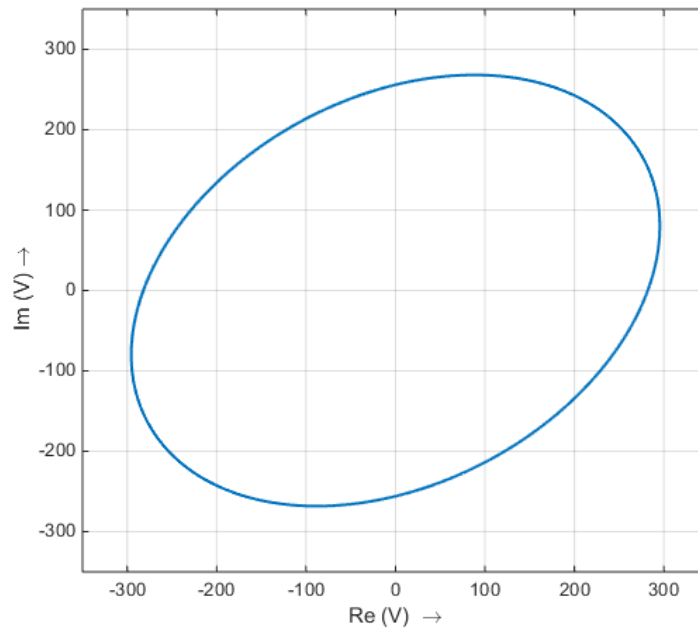
4. Strata napájania jednej fázy.

Predpokladajme poruchu napájania na svorke „2“, vetvové napätie $u_b = 0$. Následne sa na fázach „1“ a „2“ objaví napätie rovné rozdielu vetvových napätí u_a a u_c . Na základe symetrie vinutí jednotlivých fáz, predpokladáme symetrické rozloženia tohto napätia medzi fázy „1“ a „2“. Pre fázové napätia platí rovnica

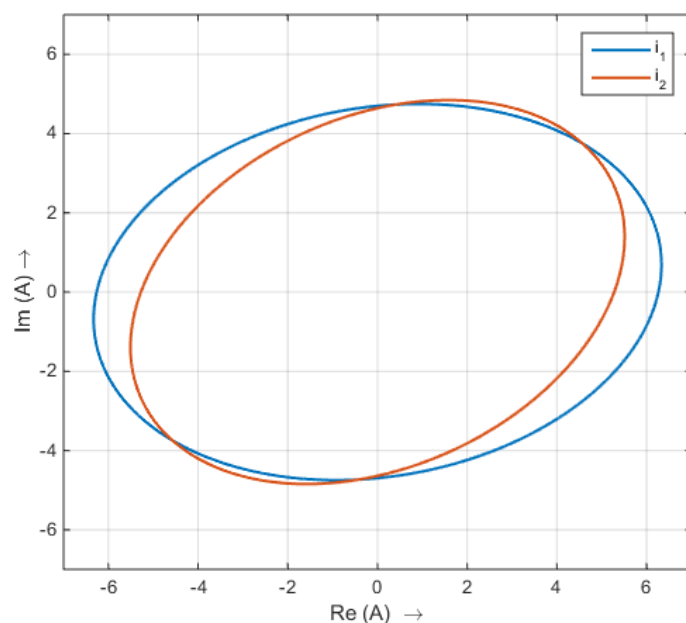
$$u_1 = u_2 = \frac{1}{2}(u_c - u_a) = \frac{1}{2}(\mathbf{a}^2 - 1)\mathbf{u}_{01} \quad (8)$$

Na základe rovnice (4) je možné vypočítať priestorový fázor napätia pre tento poruchový stav. Z Obr.6 je zrejmé, že trajektória priestorového fázora pre nesymetrické napájanie už nie je kružnica, ale elipsa. To isté platí aj pre trajektórie priestorových fázorov statorových a rotorových prúdov. Tieto sú znázornené na Obr.7.

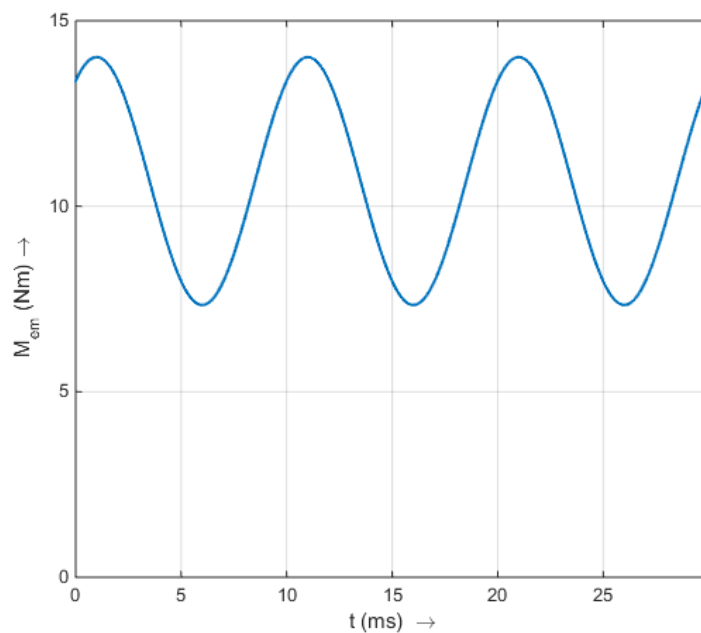
Obr.8. Ukazuje vypočítaný priebeh elektromagnetického momentu motora. Priebeh je pulzačný s dvojnásobnou frekvenciou napájacieho napätia. Výhodou je, že je stále kladný, takže motor je schopný ďalšej prevádzky aj v tomto poruchovom stave. Rýchlosť motora sa vplyvom nesymetrického napájania zníži. Motor pracuje pri nominálnom zaťažení so sklzom $s = 0,05$, čomu odpovedajú otáčky $n = 2850 \text{ ot} / \text{min}$.



Obr.6. Priestorový fázor napätia pri poruche jednej fázy.



Obr.7. Priestorové fázory prúdov motora.



Obr.8. Priebeh elektromagnetického momentu.

5. Možnosti zníženia zvlnenia elektromagnetického momentu.

Zvlnenie elektromagnetického momentu stroja pri strate jednej fázy je dosť nepríjemné z hľadiska hluku. Je viacero spôsobov, ako sa s týmto javom vysporiadať. Najjednoduchší spôsob je fázový posun v menič jednej zo susedných fáz poruchovej fázy tak, aby vznikol kvázi- symetrický štvorfázový systém napätí.

Predpokladajme, že riadením meniča posunieme napätie u_c fázovo o hodnotu $-\frac{2\pi}{10}$.

Zavedme koeficient poruchového posunu $\mathbf{a}_f = e^{-j\frac{2\pi}{20}}$.

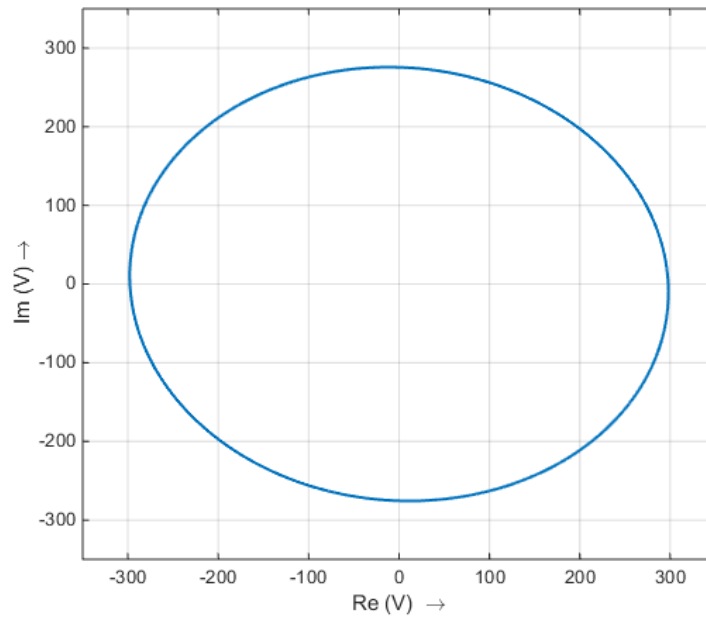
Potom môžeme pre fázové napätia stroja písať rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2 &= \frac{1}{2}(\mathbf{u}_c - \mathbf{u}_a) = \frac{1}{2}(\mathbf{a}_f \mathbf{a}^2 - 1)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_3 = \mathbf{u}_d - \mathbf{u}_c &= (\mathbf{a}^3 - \mathbf{a}_f \mathbf{a}^2)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_4 = \mathbf{u}_e - \mathbf{u}_d &= (\mathbf{a}^4 - \mathbf{a}^3)\mathbf{u}_{01} \\ \mathbf{u}_5 = \mathbf{u}_a - \mathbf{u}_e &= (1 - \mathbf{a}^4)\mathbf{u}_{01} \end{aligned} \quad (9)$$

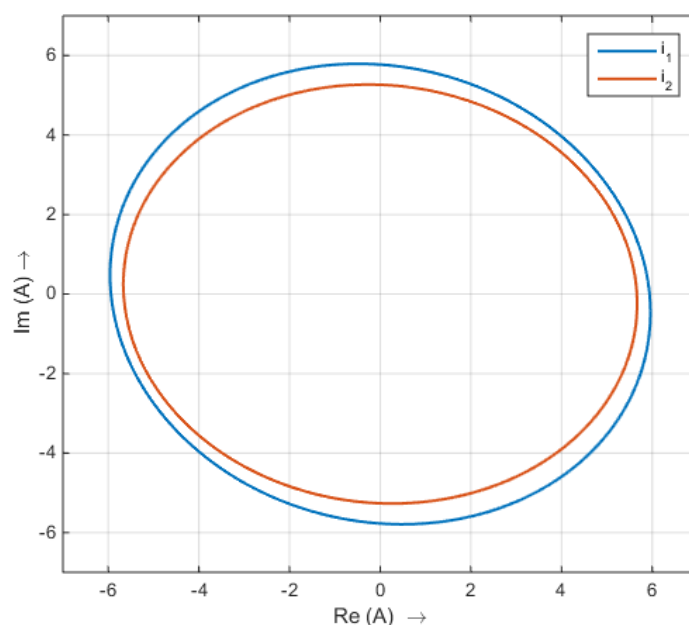
Zo rovníc (9) je zrejmé, že posunom napätia vo vetve „c“ sa zvýši napätie u_3 a tým následne aj prúd tejto fázy. Prúdové preťaženie však neprekročí 20% nominálnej hodnoty, takže pre poruchový stav je to prijateľná hodnota.

Na Obr.9 je uvedená trajektória priestorového fázora napätia s posunutím. Oproti Obr.6 sa viac približuje ku kružnici.

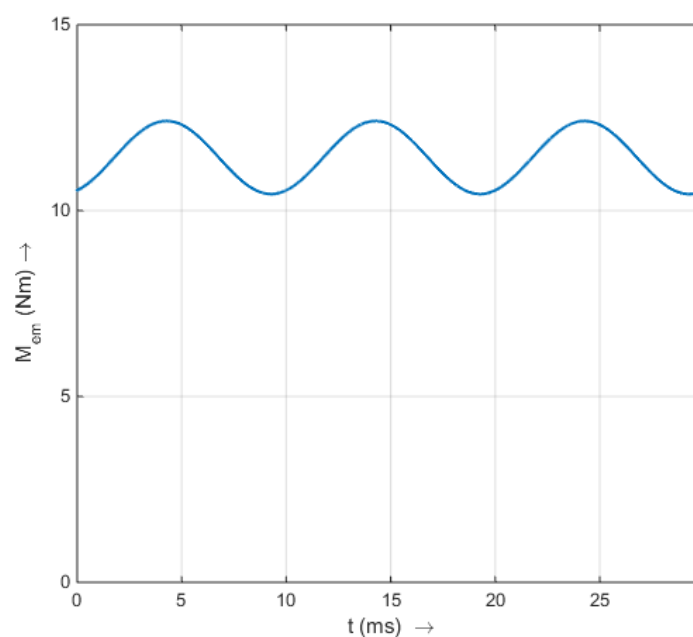
Obr.10 znázorňuje trajektórie priestorových fázorov prúdov motora. Obr.11 ukazuje priebeh elektromagnetického momentu stroja opäť pri nominálnom zaťažení. Zvlnenie sa podstatne znížilo, avšak rýchlosť stroja ďalej poklesla. Stroj pracuje so sklzom $s = 0,052$, čomu odpovedajú otáčky $n = 2844 \text{ ot} / \text{min}$.



Obr.9. Priestorový fázor napätia s posunutím.



Obr.10. Priestorové fázory prúdov motora s posunutím.



Obr.11. Pribeh elektromagnetického momentu s posunutím.

6. Záver.

V predkladanom príspevku sú uvedené vlastnosti päťfázového indukčného motora napájaného cez menič frekvencie ideálnym harmonickým päťfázovým systémom napätí pri poruche napájania jednej fázy. Matematické výpočty boli prevedené za pomoci teórie priestorového fázora v komplexnom tvare. Výpočty ukazujú, že stroj je schopný ďalšej prevádzky aj napriek výpadku napájania niektorej z fáz. Elektromagnetický moment je zvlnený s frekvenciou rovnou dvojnásobku frekvencie napájacieho napätia. Posunom jednej zo susedných fáz je možné znížiť zvlnenie elektromagnetického momentu, avšak za cenu zvýšeného napätia a prúdu v jednom z vinutí motora.

Príloha.

$$P_n = 3,5 kW; U_n = 5 \times 230 V / 50 Hz,$$

$$n_n = 2880 \text{ ot} / \text{min}; p = 1,$$

$$R_1 = 3,778 \Omega; R'_2 = 2,485 \Omega;$$

$$L_m = 0,436 H; L_{1\sigma} = 6,83 mH; L'_{2\sigma} = 6,83 mH;$$

Podakovanie.

Autor ďakuje Agentúre pre vedu a vývoj Slovenskej republiky za finančnú podporu. Príspevok vznikol v rámci vedeckého výskumu č. APVV -16-0270.

Použitá literatúra

- [1] J. Chatelain, *Machines électriques*, Vol. X, Edition Georgi, 1983
- [2] P. Zásalický, *Behavior of a Five-Phase Pentacle Connected IM Operated under One-Phase Fault*, ACEMP-OPTIM Conference, 27--29. august 2019, Istanbul, Turkey
- [3] H.M. Ryu, S.K. Sul, *Multiple d-q spaces concept for multi-phase AC motor drive*, ICPE--04, pp. 670-674, 2004
- [4] P. Zásalický, *Mathematical Model of a Five-phase Voltage-source PWM Controlled Inverter*, Electrical Engineering - Archiv fur Elektrotechnik, SPRINGER, No.99, pp.1179-1184, 2017
- [5] E. Levi, *Multiphase electric machines for variable--speed applications*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 55, No. 5, pp. 1893-1909, 2008
- [6] J.O. Estima, A.J. Marques Cardoso, *A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnostic in voltage-fed PWM motor drives by the reference currents errors*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol.28, No.5, pp.3496-3505, 2013