

ANALÝZA, VLASTNOSTI A POUŽITIE POHONOV S PÄŤFÁZOVÝM INDUKČNÝM MOTOROM

THE ANALYSIS, ADVANTAGES AND USES OF FIVE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVES

doc. Ing. Ján Kaňuch, PhD.

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická Univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

ABSTRAKT

Päťfázové motory v posledných rokoch priťahujú veľkú pozornosť kvôli niektorým výhodám, ktoré ponúkajú v porovnaní s pohonmi s trojfázovými motormi. Dostupný výkon siete je v súčasnosti obmedzený iba na tri fázy. Preto na elektrické pohony s premenlivou rýchlosťou sa používajú predovšetkým trojfázové stroje. Avšak pri napájaní z meniča nie je potrebný pevný počet fáz. Napájanie viacfázových motorov je vždy zabezpečené výkonovými elektronickými meničmi. Pretože sa na napájanie striedavým prúdom používa výkonový elektronický menič, tak počet fáz meniča (teda tiež elektrického stroja) nie je v zásade obmedzený. Článok predstavuje podstatné výhody, vlastnosti a použitie päťfázových indukčných motorov pre pohony s napájaním výkonovým elektronickým meničom.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Viacfázový indukčný motor, päťfázový indukčný motor, päťfázový pohonný systém.

ABSTRACT

Five-phase motors have attracted much attention in recent years due to some advantages which they offer when compared to the three-phase motor drive system. Presently, the grid power available is only limited to three-phase. Electric drives with variable speed are predominately utilized with three-phase machines. However, when fed by a converter, there is no need for a fixed number of phases. The supply to multi-phase motors is invariably provided from power electronic converters. Since used for AC supply is the power electronic converter, the number of converter phases (thus also of electric machine) is essentially not limited. The paper presents the inherent advantages, properties and uses of five-phase induction motor drives with the power electronic converter supplied.

KEYWORDS

Multiphase induction motor, five-phase induction motor, five-phase drive system.

1 ÚVOD

Trojfázové indukčné motory (s kliečkou nakrátko) sú známe svojou jednoduchou konštrukciou a nízkymi nákladmi na údržbu a prevádzku. Regulácia rýchlostí asynchrónneho motora je síce komplikovaná, avšak vďaka vývoju výkonových elektronických meničov sa riadenie otáčok asynchrónneho motora zjednodušilo. Vývoj polovodičových meničov

a radiaciach algoritmov otvoril nový rozsah aplikácií pre indukčné stroje vo viacerých oblastiach (napr. aj tam, kde v minulosti dominovali DC stroje) a počet fáz sa stal konštrukčným parametrom. Výhodnejší je vyšší počet fáz.

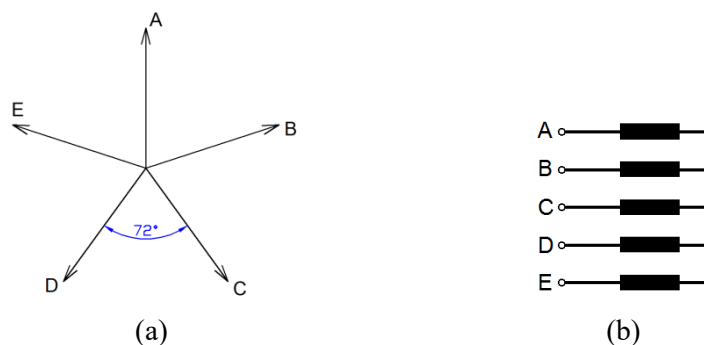
Viacfázový indukčný motor má oproti konvenčnému trojfázovému stroju niekoľko výhod, ako je napríklad znížená pulzácia krútiaceho momentu [1], znížený harmonický prúd rotora na fázu, vysoká spoľahlivosť a vysoká tolerancia porúch [2, 3]. Ward a Harrer prvýkrát predstavili už v roku 1969 predbežnú analýzu päťfázového indukčného motora napájaného z meniča a navrhli, že amplitúda pulzácie krútiaceho momentu by sa mohla znížiť zvýšením počtu fáz [4].

V porovnaní s trojfázovými asynchrónnymi motormi môže byť vyššie odolnosť voči poruchám najzaujímavejšou vlastnosťou viacfázových indukčných motorov, pretože umožňuje pohonu pracovať aj po výskyte poruchy. Prevádzka indukčných strojov s kotvou nakrátko odolná voči poruchám bola popísaná v [5-8]. Analýza štandardných symetrických viacfázových indukčných strojov je uvedená v niekoľkých prácach [9-13].

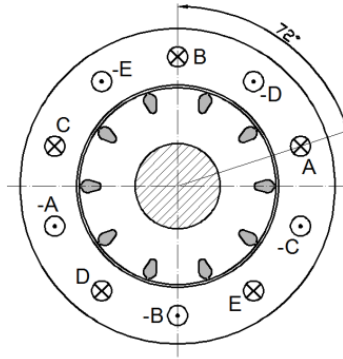
Metódy riadenia pre päťfázové indukčné stroje sú v zásade rovnaké ako pre trojfázové stroje. Ukázalo sa, že dynamika, ktorú je možné dosiahnuť pomocou päťfázového indukčného stroja s vektorovým riadením, je v podstate identická s dynamikou dosiahnuteľnou pomocou trojfázového pohonu [14]. Štúdie v literatúre ukázali, že pohon pomocou päťfázových indukčných strojov pracuje uspokojivo, keď je napájaný z meniča s pulzno šírkovou moduláciou (PWM) [15, 16].

2 ANALÝZA A MATEMATICKÝ POPIS 5-FÁZOVÉHO INDUKČNÉHO MOTORA

Viacfázové motory s najmenším používaným počtom fáz sú päťfázové. Vinutie statora päťfázového indukčného motora je napájané päťfázovým striedavým napätím, ktoré je priestorovo a časovo posunuté o 72° (obr. 1). Magnetické pole statora rotuje synchronnou rýchlosťou. V rotorovej kľetke sa indukuje elektromotorické napätie a v dôsledku toho tečie vo vodiči rotora prúd, ktorý vytvára vlastné magnetické pole. V dôsledku interakcie týchto dvoch magnetických polí sa vytvára krútiaci moment motora [13]. Statorové vinutie päťfázového stroja je navrhnuté tak, aby priestorový posun medzi po sebe nasledujúcimi fázami statora bol 72 stupňov, ako je znázornené na obr. 2 [17].



Obr. 1. Fázorový diagram napätí pre 5-fázový napájací zdroj (a) a zapojenie vinutia statora motora do hviezdy (b)



Obr. 2. Päťfázový indukčný motor s koncentrovaným vinutím

Napät'ové rovnice jednotlivých fáz (A až E) päťfázového indukčného stroja sú:

$$\begin{aligned}
 v_A &= \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t) \\
 v_B &= \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t - 2\pi / 5) \\
 v_C &= \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t - 4\pi / 5) \\
 v_D &= \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t + 4\pi / 5) \\
 v_E &= \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega t + 2\pi / 5)
 \end{aligned} \tag{1}$$

kde V je fázové napätie (rms).

Napät'ové rovnice, ktorá popisujú dynamické správanie päťfázového indukčného motora, sa menia v čase. Riešenie napät'ových rovníc je v takomto tvare zložitost' a preto pre zjednodušenie riešenia sa urobí transformácia fázových veličín ABCDE do fiktívnej, vzťahnej sústavy s dvoma na seba kolmými osami. Týmto prístupom sa môže päťfázové vinutie redukovať na sústavu dvojfázového vinutia. Premenné statora a rotora indukčného stroja sa prenášajú do vzťahnej sústavy, ktorá sa môže buď otáčať uhlovou rýchlosťou alebo zostane nehybná. Vyšetrovanie vlastností stroja v tejto sústave bude jednoduchšie, lebo sa znižuje počet rovníc, čo je pri riešení sústav rovníc nie zanedbateľná výhoda.

Päťfázový indukčný motor teda môže byť reprezentovaný ako model v sústave súradníc d-q-x-y-0 [6]. Zložky d-q zodpovedajú výkonu, krútiacemu moment a toku. Zložky x-y zodpovedajú stratám v stroji. Nulová zložka zodpovedá invariantnosti výkonu po transformácii. Transformačná matica A_S pre stator je:

$$A_S = \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \begin{vmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \alpha) & \cos(\theta_s - 2\alpha) & \cos(\theta_s + 2\alpha) & \cos(\theta_s + \alpha) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \alpha) & -\sin(\theta_s - 2\alpha) & -\sin(\theta_s + 2\alpha) & -\sin(\theta_s + \alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(2\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & -\sin(4\alpha) & -\sin(2\alpha) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \tag{2}$$

kde θ_s je okamžitá uhlová poloha osi d spoločnej vzťahnej sústavy vzhľadom na magnetickú os statorovej fázy „A“ a $\alpha = 2\pi/5$.

Transformačná matica pre rotorové premenné A_R v princípe je rovnaká ako pre stator, ale uhol θ_s je nahradený uhlom β :

$$A_R = \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \begin{vmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \alpha) & \cos(\beta - 2\alpha) & \cos(\beta + 2\alpha) & \cos(\beta + \alpha) \\ -\sin(\beta) & -\sin(\beta - \alpha) & -\sin(\beta - 2\alpha) & -\sin(\beta + 2\alpha) & -\sin(\beta + \alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(2\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & -\sin(4\alpha) & -\sin(2\alpha) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (3)$$

kde β je okamžitá uhlová poloha osi d spoločnej vzťažnej sústavy vzhľadom na magnetickú os rotorovej fázy „A“.

Transformačné uhly pre statorové a rotorové veličiny súvisia s ľubovoľnou rýchlosťou zvolenej spoločnej vzťažnej sústavy a platí:

$$\theta_s = \int \omega_a \cdot dt \quad (4)$$

$$\beta = \theta_s - \theta = \int (\omega_a - \omega) \cdot dt \quad (5)$$

kde ω_a je uhlová rýchlosť rotácie vzťažnej sústavy a ω je okamžitá elektrická uhlová rýchlosť rotácie rotora.

Za predpokladu, že rovnice stroja sa transformujú do vzťažnej sústavy otáčajúcej sa uhlovou rýchlosťou ω_a , pre matematický model päťfázového indukčného stroja na strane statora vo vzťažnej sústave d-q-x-y-0 použijeme nasledujúce napäťové rovnice:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - \omega_a \cdot \psi_{qs} + p \cdot \psi_{ds} \\ v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega_a \cdot \psi_{ds} + p \cdot \psi_{qs} \\ v_{xs} &= R_s \cdot i_{xs} + p \cdot \psi_{xs} \\ v_{ys} &= R_s \cdot i_{ys} + p \cdot \psi_{ys} \\ v_{0s} &= R_s \cdot i_{0s} + p \cdot \psi_{0s}. \end{aligned} \quad (6)$$

Napäťové rovnice rotora vo vzťažnej sústave d-q-x-y-0 sú:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} - (\omega_a - \omega) \cdot \psi_{qr} + p \cdot \psi_{dr} \\ v_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + (\omega_a - \omega) \cdot \psi_{dr} + p \cdot \psi_{qr} \\ v_{xr} &= R_r \cdot i_{xr} + p \cdot \psi_{xr} \\ v_{yr} &= R_r \cdot i_{yr} + p \cdot \psi_{yr} \\ v_{0r} &= R_r \cdot i_{0r} + p \cdot \psi_{0r}. \end{aligned} \quad (7)$$

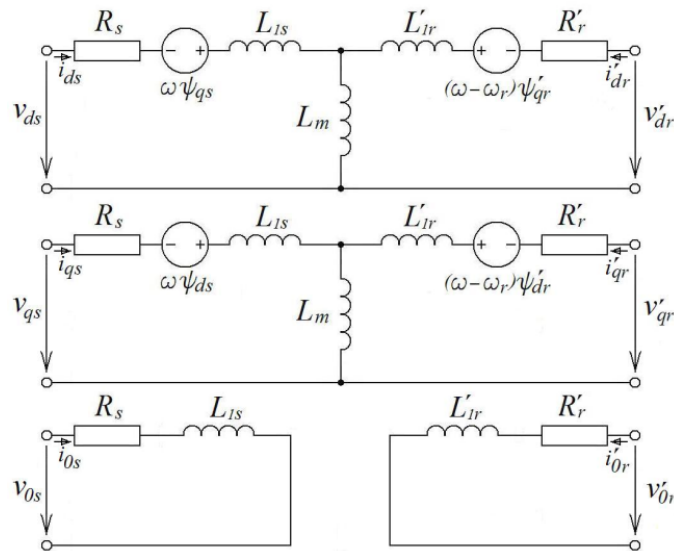
Rovnice pre magnetický tok statora vo vzťažnej sústave d-q-x-y-0 sú:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= (L_{1s} + L_m) \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} &= (L_{1s} + L_m) \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \psi_{xs} &= L_{1s} \cdot i_{xs} \\ \psi_{ys} &= L_{1s} \cdot i_{ys} \\ \psi_{0s} &= L_{1s} \cdot i_{0s}. \end{aligned} \quad (8)$$

Rovnice pre magnetický tok rotora vo vzťažnej sústave d-q-x-y-0 sú:

$$\begin{aligned}\psi_{dr} &= (L_{1r} + L_m) \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \psi_{qr} &= (L_{1r} + L_m) \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\ \psi_{xr} &= L_{1r} \cdot i_{xr} \\ \psi_{yr} &= L_{1r} \cdot i_{yr} \\ \psi_{0r} &= L_{1r} \cdot i_{0r}.\end{aligned}\tag{9}$$

V rovniciach (6) - (9) indexy s a r identifikujú premenné (parametre) statora a rotora. Symboly R a L znamenajú odpor a indukčnosť a symboly v , i a ψ označujú napätie, prúd a magnetický tok. V rovniciach (8) a (9) je $L_m = (5/2) M$ a M je maximálna hodnota vzájomnej indukčnosti statora a rotora v modeli motora. Náhradná schéma päťfázového indukčného motora je znázornená na obr. 3.



Obr.3 Náhradná schéma päťfázového indukčného motora v sústave d-q-0.

Z vyššie uvedených rovníc (6) - (9) môžu byť krútiaci moment motora T_e a rýchlosť rotora ω určené ako:

$$T_e = \frac{5}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} + \psi_{qs} \cdot i_{ds})\tag{8}$$

$$T_e = \frac{5}{2} \cdot P \cdot M \cdot (i_{dr} \cdot i_{qs} + i_{ds} \cdot i_{qr})\tag{9}$$

$$\omega = \frac{P}{2 \cdot J} \cdot \int (T_e - T_L)\tag{10}$$

kde P je počet pólov, J je moment zotrvačnosti rotora, T_L je záťažný moment, T_e je elektro-mechanický moment motora a ω je uhlová rýchlosť otáčania rotora.

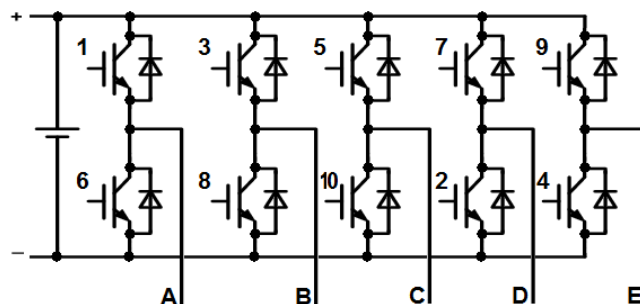
Model v ustálenom stave a náhradná schéma päťfázového indukčného motora sú vhodné na modelovanie prevádzkových stavov stroja v ustálenom stave.

3 TOPOLOGIA PÄTFÁZOVÉHO STRIEDAČA

Multifázové indukčné motory majú niektoré podstatné nevýhody a preto sa tieto indukčné motory začali používať aj v niektorých priemyselných aplikáciách. Výroba viacfázového napájania pre viacfázové indukčné motory je náročná, pretože prakticky nie je k dispozícii viac ako 3-fázová napájacia sieť. Preto pre napájanie multifázových indukčných motorov musí byť pre ich napájanie vyrobený aj multifázový napäťový menič. Vzhľadom na to, sa tu zaoberáme päťfázovým prípadom, tak je popísaný päťfázový menič ako napäťový zdroj pre motor.

V päťfázovom striedači existujú dve rôzne výstupné sieťové napätia (susediace a nesusediace). Výstupné napätie meniča medzi dvoma po sebe nasledujúcimi fázami je známe ako susediace sieťové napätie. Výstupné napätie striedača medzi dvoma po sebe nenasledujúcimi fázami sa nazýva nesusediace sieťové napätie. Za fázové napätie sa považuje napätie medzi výstupnou svorkou striedača a nulovou hodnotou napätia záťaže napojenej do hviezdy. Ak sa päťfázový systém popíše ako „A, B, C, D, E“, tak fázové napätia sa označujú ako v_A, v_B, v_C, v_D, v_E , susediace sieťové napätia sú označené ako $v_{AB}, v_{BC}, v_{CA}, v_{DE}, v_{EA}$ a nesusediace sieťové napätia sú označené ako $v_{AC}, v_{BD}, v_{CE}, v_{DA}$ a v_{EB} .

Počet výstupných fáz v striedači sa rovná počtu vetiev a preto päťfázový striedač pozostáva z piatich paralelných vetiev. V každej vetve sú dva spínače. Ako spínač sa môže použiť ktorékoľvek z výkonových polovodičových zariadení používaných v súčasných meničoch (napr. IGBT, MOSFET atď.). Výhodou je, že sa používajú spínače, ktoré sa bežne používajú v trojfázových striedačoch. K týmto spínačom je pripojená antiparalelná dióda (obr. 4). Kvalita výstupného napätia je hlavnou prioritou meniča.



Obr. 4 Topológia päťfázového striedača.

Spravidla, päťfázový striedač musí mať tieto základné charakteristiky:

- THD (%) výstupného napätia musí byť čo najmenšie,
- základná zložka výstupného fázového napätia by mala byť čo najvyššia,
- obvod striedača by mal byť jednoduchý,
- počet komponentov použitých v striedači by mal byť čo najnižší.

Spínače (napr. IGBT) v jednej vetve striedača v plnom vodivom cykle musia viesť striedavo, aby sa predišlo skratu. Jeden spínač v jednej vetve by mal viesť 180° , pretože plné vedenie je 360° . Priestorové posunutie medzi dvoma fázami v piatich fázach je 72° a používa sa ako oneskorenie medzi dvoma po sebe nasledujúcimi fázami.

Pre pohony s viacfázovými motormi s premenlivou rýchlosťou otáčania sa používa PWM metóda na riadenie výstupného napätia striedača. Pri pohone s päťfázovým indukčným motorom sú súčasne zopnuté tri spínače v hornej časti a dva spínače v spodnej časti a naopak. Spínacie postupnosti jednotlivých spínačov (podľa obr. 4) počas jednej otáčky rotora sú uvedené v tabuľke 1.

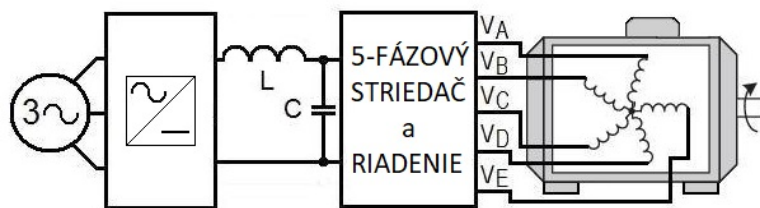
Tabuľka 1 Spínacia postupnosť pre päťfázový striedač

Mód	Zopnuté spínače	Uhol natočenia rotora [°]
9.	1,7,8,9,10	36
10.	8,9,10,1,2,	72
1.	9,10, 1,2,3	108
2.	10,1,2,3,4	144
3.	1,2,3,4,5	180
4.	2,3,4,5,6	216
5.	3,4,5,6,7	252
6.	4,5,6,7,8	288
7.	5,6,7,8,9	324
8.	6,7,8,9,10	360

Päťfázový striedač je skonštruovaný pomocou 10 IGBT spínačov (päť paralelných vetiev s dvoma spínačmi) a je zobrazený na obrázku 4. Spínacie signály pre spínače 1-10 sú generované generátormi impulzov. Spínače 1-10 sa zapínajú na dobu 180 ° vodivého režimu so 72° fázovým posunom pre každú fázovú vetvu. Požadované výstupné napätie striedača sa získa vhodným zapnutím a vypnutím jednotlivých IGBT spínačov. Na generovanie impulzov pre výkonové IGBT spínače sa používa technika sínusovej modulácie šírky impulzu (SPWM). Pri tejto metóde sa nosná vlna porovnáva so sínusovkou (sínusovým signálom).

4 POHON S PÄŤFÁZOVÝM INDUKČNÝM MOTOROM

Trojfázové striedavé napätie sa prevádza na jednosmerné napätie pomocou neriadeného alebo riadeného usmerňovača. Zvlnenie DC napätia na vstupe DC-AC striedača sa odstráni pomocou LC filtra. Použitím metódy sínusovej modulácie šírky impulzu (SPWM) je na výstupe striedača vhodnou reguláciou vygenerované výstupné päťfázové sínusové napätie. Výstupné napätie striedača napája päťfázový indukčný stroj. Kompletné usporiadanie blokovej schémy päťfázového pohonného systému je znázornené na obr. 5.



Obr. 5. Bloková schéma pohonu s 5-fázovým indukčným motorom

5 CHARAKTERISTIKA A POUŽITIE PÄŤFÁZOVÉHO INDUKČNÉHO MOTORA

Pri pohonoch s vysokou odolnosťou proti poruchám je dôležité zvoliť taký motor, ktorý má tiež vysokú vlastnú odolnosť voči poruchám. Pre aplikácie odolné voči poruchám sú veľmi vhodné motory s oddeleným vinutím v drážkach a s neprekrývajúcimi sa cievkami [18]. Viacfázové indukčné motory umožňujú fyzické oddelenie medzi fázami, čo obmedzuje ďalšie šírenie sa poruchy. Okrem toho vhodná kombinácia drážok a pólov vedie k veľmi nízkemu vzájomnému spojeniu medzi fázami, takže keď sa vyskytne porucha na jednej fáze stroja, nie je prenášaná navzájom do druhej fázy. Päťfázové indukčné motory sa vyznačujú vysokou samoindukciou potrebnou na obmedzenie skratového prúdu. Pre lepšie charakteristiky motora by vzájomné spojenie medzi fázami malo byť čo najmenšie. Vinutie päťfázového indukčného motora, ktoré je najčastejšie umiestnené v statore motora, je napájané z päťfázového meniča.

Elektromagnetické pole statora v päťfázovom indukčnom motore vytvorené napájacím napätím má nižší obsah harmonických ako je v trojfázovom stroji. Účinnosť päťfázového indukčného motora je vyššia ako je účinnosť trojfázového stroja. Päťfázový indukčný motor má taktiež aj väčšiu odolnosť proti poruchám ako trojfázový. Ak sa jedna fáza trojfázového motora preruší (nastane porucha), tak motor ďalej pracuje ako jednofázový. Môže síce pokračovať v prevádzke (s nižším výkonom), ale po jeho zastavení jeho znovu spustenie si vyžaduje určité externé prostriedky. V prípade päťfázového motora, ak sa jedna fáza preruší, tak prevádzka ja taktiež možná síce tiež pri nižšom výkone, ale nie je tu problém s jeho opätovným spustením. Päťfázové indukčné motory sú menej citlivé na vyššie harmonické v časovom priebehu napájacieho napätia. Vyššie harmonické vytvárajú nežiaduce pulzujúce krútiace momenty, dokonca s násobkom základnej napájacej frekvencie [18].

Výhody päťfázových motorov, ktoré boli uznané odborníkmi z oblasti elektrických strojov sú tieto: vysoký krútiaci moment motora, znížené zvlnenie krútiaceho momentu a harmonické prúdy, lepší prechodný a ustálený výkon a robustnejšie riadenie harmonickým prúdom. Výhody a nevýhody pohonu s päťfázovým indukčným motorom sú nasledujúce:

- Hlavnou výhodou použitia päťfázového motorového pohonu je jeho spoľahlivosť správne fungovať aj v podmienkach pri poruche motora. Päťfázové pohony s indukčnými motormi môžu pracovať s jednou alebo aj s dvoma prerušenými fázami (tzv. fázové poruchy), čo dáva pohonu vysokú mieru tolerancie k poruchám. Fázové poruchy sú tie, pri ktorých fázy s poruchou (max. dve) sú odpojené, zatiaľ čo ostatné fázy zostávajú v prevádzke ako v bežných pracovných podmienkach pri trojfázovom napájaní.

- V prípade poruchy je ale potrebná správna stratégia riadenia meniča, resp. napájacieho prúdu motora z meniča, aby sa maximálne obmedzilo zvlnenie výsledného krútiaceho

momentu, čo by malo byť základnou požiadavkou pri aplikáciách pohonov s päťfázovými motormi.

- Plechy pre statorový a rotorový magnetický obvod pre konkrétny päťfázový indukčný motor musia byť vždy projektované a vyrazené na zákazku.
- Na napájanie konkrétneho motora je potrebný neštandardný päťfázový menič so špeciálnym riadením a funkciami.

Päťfázový motor sa používa hlavne v aplikáciách kritických z hľadiska bezpečnosti, ktoré vyžadujú široké možnosti odolnosti voči chybám a vysokú spoľahlivosť.

Hlavné aplikácie päťfázového motora sú: kompresory, čerpadlá, elektrické lode, hybridné vozidlá a elektrické lietadlá. Napríklad pre námorné elektrické lode je nutnosťou vysoká dostupnosť a teda aj spoľahlivosť motora [15] a pre aplikácie v elektrických lietadlách je dôležitá hlavne bezporuchovosť.

Päťfázové indukčné motory majú výkon rozdelený na päť fáz. Takže v prípade päťfázového motora sú znížené aj menovité hodnoty fázového napätia (výstupného napätia meniča), čo je veľmi žiaduca výhoda v aplikáciách vysokého napätia [16].

6 ZÁVER

Päťfázové (prípadne viacfázové) pohony získali v súčasnosti osobitný význam pre ich použitie v aplikáciách, kde sa vyžaduje vysoká celková spoľahlivosť systému a zníženie celkového výkonu na fázu (napr. v elektrických lodiach, elektrických vozidlách a vlakoch, elektrické lietadlá atď.).

Výskum sa nedávno sústredil na návrh päťfázových motorov a vplyv zapojenia vinutia statora [19, 20] na vlastnosti motora, na topológiu výkonových meničov a na nové schémy ich riadenia [21].

Zlepšenie schopnosti odolávať poruchám je dôležitou témou v realizácii päťfázových pohonov s indukčnými motormi. Aj keď sa môžu vyskytnúť rôzne typy porúch, najzávažnejšia z nich je prerušená fáza, ktorá vedie k zníženiu počtu aktívnych fáz v päťfázovom pohone [22].

Dôležitou požiadavkou pri poruche jednej fázy je napríklad hodnota statorových prúdov, ktorá sa musí upraviť tak, aby sa zachovala základná zložka magnetického poľa vzduchovej medzery, ktorá je odlišná po poruche (napr. na zníženie strát medi alebo zabezpečenie maximálneho krútiaceho momentu). V literatúre sú opísané dve základné koncepcie päťfázového elektrického stroja [1], [17]:

- Prvá koncepcia päťfázového motora je založená na sínusovom rozložení magneto-motorickej sily. Tento päťfázový motor je napájaný len sínusovým napätím, keď na vstupe do stroja sú aj nežiaduce vyššie harmonické nižších radov.
- Druhá koncepcia päťfázového motora je založená na konštrukcii s koncentrovanými vinutiami na statore. V tomto prípade sa zvyšuje vytváraný krútiaci moment pomocou vyšších harmonických prúdov statora. Na tento účel sa môže využiť najmä tretia harmonická v referenčnom napätí.

Prediktívna regulácia magnetického toku v päťfázovom indukčnom motore sa považuje za účinnú alternatívu k priamej regulácii krútiaceho momentu s výhodou zníženia zvlňenia krútiaceho momentu, toku a prúdu motora.

Článok prezentuje vlastnosti, výhody a použitie pohonov s päťfázovým indukčným motorom, ktorý je napájaný výkonovým elektronickým meničom.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-16-0270.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0210.

LITERATÚRA

- [1] Levi E.: „Multiphase electric machines for variable-speed applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no.5, pp. 1893–1909, May 2008.
- [2] Bianchi, N., Bolognani, S., Pre, M. D.: „Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor,” *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 960–970, July/Aug. 2007
- [3] Singh, G. K., Pant, V.: „Analysis of multi-phase induction machine under fault condition in a phase redundant AC drive system”, *Elect. Mach. Power System*, vol. 28, no. 6, pp. 577–590, 2000.
- [4] Ward, E.E., Harer, H.: „Preliminary investigation of an inverter fed five-phase induction motor”, *Proc. IEE* 116 (6), 1969, pp. 980–984.
- [5] Fu J.R., Lipo T.A.: „Disturbance free operation of a multiphase current regulated motor drive with an opened phase”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, pp. 1267–1274, 1994.
- [6] Tani A., Mengoni M., Zarri L., Serra G, Casadei D.: „Control of Multi-Phase Induction Motors with an Odd Number of Phases Under Open-Circuit Phase Faults,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI: 10.1109/TPEL.2011. 2140334.
- [7] Schreier L., Bendl J., Chomat M.: „Operation of five-phase induction motor after loss of one phase of feeding source.” *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 1, pp. 9–18, 2017.
- [8] Schreier L., Bendl J., Chomat M.: „Comparison of Selected Properties of Three- and Fivephase Induction Motors.”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 88, pp 168–174, 2010.
- [9] Drozdowski, P.: „Multiphase cage induction motors for controlled drives”. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 93, pp 7–12, 2011.
- [10] Pieńkowski K.: „Analiza i sterowanie wielofazowego silnika indukcyjnego klatkowego.” *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 65, pp 305–319, 2011.
- [11] Listwan, J., Pieńkowski, K.: „Analiza układów sterowania wektorowego wielofazowym silnikiem indukcyjnym.”. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, pp 235–240, 2014.
- [12] Listwan, J., Pieńkowski, K.: „Analysis of sliding-mode control of multi-phase induction motor.” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 4, pp 107–112, 2015.

- [13] Barcaro, M., Bianchi, N., Fornasiero, E., Magnussen, F.: „*Experimental comparison between two fault-tolerant fractional-slot multiphase motor drives.*” Proc. ISIE, pp. 2160–2165, 2010.
- [14]. Rizwan Khan, M., Iqbal, A., Ahmad, M.: „RNN-Based Sensorless Control of A Five-Phase Induction Motor Drive”, *Journal on Electrical Engineering*, 1(1), Jul-Sep 2007, ISSN 0973-8835, pp. 16-24.
- [15] Pavithrank, N., Parimelalagan, R. Krishnamurthy, M. R. : „Studies on Inverter-Fed Five-Phase Induction Motor Drive”, *IEEE Power Elec.* 3 No. 2 (Apr 1988), pp. 224–235.
- [16] Toliyat, H. A., Huangsheng, X. U.: „A Novel Direct Torque Control (DTC) Method for Five-Phase Induction Machines”, *IEEE Trans.. Applied Power Electronics Conference and Exposition 01* (2000), pp.162–168.
- [17] Levi E., Bojoi E., Profumo F., Toliyat H., Williamson S.: „Multiphase induction motor drives – a technology status review”, *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 4, pp. 489–516, 2007.
- [18] Jahns, T. M.: „Improved reliability in solid state a.c. drives by means of multiple independent phase–drive units”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA–16, no. 3, pp. 321–331, May 1980.
- [19] Abdel-Khalik, A.S., Ahmed,S., Elserougi, A.A., Massoud, A.M.: „Effect of Stator Winding Connection of Five-Phase Induction Machines on Torque Ripples Under Open Line Condition”, *Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 580-593, 2015.
- [20] Abdel-Khalik, A.S., Elgenedy, M.A., Ahmed, S., Massoud, A.M.: „Improved Fault-Tolerant Five-Phase Induction Machine Using a Combined Star/ Pentagon Single Layer Stator Winding Connection”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 618-628, 2016.
- [21] Darijevic, M., M. Jones, M., Levi, E.: „An Open-End Winding Four-Level Five-Phase Drive”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 538-549, 2016.
- [22] Duran, M., Barrero, F.: „Recent Advances in the Design, Modeling and Control of Multiphase Machines – Part 2”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 459-468, 2016.