

Tiesiaieigio asinchroninio variklio nesimetrinių dinaminų stabdymo režimų tyrimas

R. Rinkevičienė, S. Lisauskas

Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

Naugarduko g. 41, LT-03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2744763, el. p. saulius.lisauskas @el.vtu.lt

Įvadas

Šiuolaikinėse mechatroninėse sistemose, kai reikalingas slenkamasis judesys, dažnai naudojamos tiesiaieigės elektros pavaros, leidžiančios išvengti papildomų mechaninių grandžių. Tiesiaieigio asinchroninio variklio idėja kilo maždaug prieš 100 metų. Septintajame dešimtmetyje Eric Laithwaite paskelbė keletą straipsnių apie plokščių trifazių asinchroninių variklių teoriją ir taikymą. Dar apie 20 metų prirėkė, kad atsirastų poreikis konstruoti ir gaminti tiesiaieigius variklius ir išryškinti jų teigiamybes [1]. Kuriant tiesiaieiges pavaras buvo įrodyta, kad tokios sistemos su tiesiaieigiais asinchroniniais varikliais (TAV) dažnai veikia ekonomiškiau negu hidraulinės arba elektromechaninės.

Šiuo metu TAV taikomi konteinerių transportavimo sistemose [2], pašto rūšiavimo įrenginiuose [3], tekstilės pramonės mechanizmuose, staklių pavarose, jungtuvų, sklendžių, stūmiklių pavarose [4], liftų kėlimo ir durų pavarose [5].

Kiekvienas technologinis procesas kelia specifinius reikalavimus tiesiaieigiai mechatroninei sistemai. Kadangi tiesiaieigio variklio energetinės charakteristikos prastesnės negu sukiojo, tai tiesiaieigės mechatroninės sistemos pranašumai atsiskleidžia tik tuo atveju, jei jis yra projektuojamas konkrečiam įrenginiui ir tampa neatsiejama jo dalimi. [1] pabrėžiama, kad dinaminės tiesiaieigės pavaros savybės visuomet būna geresnės negu sukiosios, nes tiesiaieigės pavaros judančių dalių inercija yra mažesnė už sukiosios pavaros besisukančių dalių inerciją. Be to, tiesiaieigės pavaros neturi reduktorių, todėl sistemoje išvengiama laisvumo. Kadangi tiesiaieigė pavara turi mažiau mechaninių grandžių, todėl ji ne tokia tamprai kaip sukioji. Dėl šių savybių tiesiaieigių pavarų dinamikos rodikliai yra geresni.

Kuriant TAV turi būti analizuojami jo valdymo klausimai. Pagrindiniai TAV valdymo parametrai yra jo greitis ir kuriama jėga. Jei technologinio proceso metu nereikia keisti ar palaikyti pastovaus TAV greičio, tai TAV pagrindiniu projektavimo parametru tampa variklio poliaus žingsnis, kuris nusako jo sinchroninį greitį v_0 :

$$v_0 = 2\tau f; \quad (1)$$

čia τ – poliaus žingsnis; f – maitinimo įtampos dažnis.

Kai greitį reikia keisti ar palaikyti pastovų, taikomas dažninis [6, 7] arba impulsinis valdymas [8].

Kai kurie technologiniai procesai reikalauja tiksliai pozicionuoti vykdymo elemento judamąją dalį. Pozicionuojant didelę reikšmę turi tiesiaieigio variklio stabdymas. Kartais stabdymo metu reikia palaikyti pastovų stabdymo pagreitį, pavyzdžiui, liftuose [5], arba nustatytą stabdymo trukmę.

Tais atvejais, kai technologinis procesas reikalauja stabdymo metu riboti pagreitį ar keisti stabdymo proceso trukmę, reikia nagrinėti ne tik statinius, bet ir dinaminis elektrinio stabdymo režimus. Tiesiaieigių pavarų dinaminiai stabdymo režimai nėra kaip reikiant iširti.

Tiesiaieigio asinchroninio variklio stacionariųjų stabdymo režimų tyrimas, paremtas elektromagnetinio lauko teorija, leido nustatyti įvairių stabdymo būdų efektyvumą ir sukurti naujus stabdymo būdus ir schemas [9].

Nestacionaraus stabdymo režimo tyrimai atlikti atsižvelgiant į pagreičio įtaką variklio charakteristikoms, [10], kai aktyviųjų zonų skaičius yra lyginis. Tyrimų metu buvo priimta, kad pagreitis atskiruose laiko intervaluose yra pastovus. Iš tiesų pagreitis viso stabdymo proceso metu kinta. Todėl [11,12,13] nagrinėja tiesiaieigių pavarų dinaminis stabdymo režimus, esant įvairiems variklio apvijų jungimo būdams. [11,12] išnagrinėtas dinaminis stabdymas, o vienfazio stabdymo problemos nagrinėjamos [13].

Tiesiaieigės elektros pavaros nesimetrinių dinaminų stabdymo režimų modelis

Kai TAV yra maitinamas simetrine įtampa ir jo visos fazinės varžos yra vienodos, tai jo matematiniai ir kompiuteriniai modeliai, sudaryti x,y ir α, β koordinačių sistemose, pateikti [14]. Naudojant šiuos modelius galima tirti variklinį režimą ir priešinio jungimo stabdymo režimus. Stabdant vienfaziu ar dinaminio būdu, variklio apvijų sujungimo schemas [12, 13] rodo, kad variklis

maitinamas nesimetrine įtampa. Todėl tiriant šiuos režimus, reikia atsižvelgti į variklio apvijų jungimo būdą.

Nesimetriniams dinaminiais tiesiaiegių pavarų režimams tirti modelis sudaromas taikant simetrinių dedamųjų metodą, kuris yra pagrįstas bet kokios nesimetrinės sistemos išskaidymu į tris simetrines dedamąsias [11].

Modelį sudaro trys TAV modeliai, kurie atitinka simetrines tiesioginę, atvirkštinę ir nulinę variklio įtampos dedamąsias. Tiesioginės dedamosios modelio lygtys pateiktos [11]. Atvirkštinės dedamosios modelio lygtys gaunamos iš tiesioginės dedamosios lygtis vietoj slydimo s įrašant $2-s$.

Tuomet tiesioginės dedamosios lygtyse [14] esantis narys $v_0 - v$ pertvarkomas taip:

$$\frac{(v_0 - v) \cdot v_0}{v_0} = s \cdot v_0. \quad (2)$$

Todėl atvirkštinės dedamosios lygtyse daugiklis $v_0 - v$ bus:

$$(2 - s)v_0 = v + v_0. \quad (3)$$

Tuomet diferencialinių lygčių sistema, leidžianti apskaičiuoti atvirkštinės įtampos dedamosios kuriamą jėgą, yra tokia:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{x1}}{dt} = U_{1m} \cos \gamma - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_r \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{y1}; \\ \frac{d\Psi_{y1}}{dt} = U_{1m} \sin \gamma - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_r \Psi_{y2} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{x1}; \\ \frac{d\Psi_{x2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_s \Psi_{x1} - \frac{\pi}{\tau} (v_0 + v) \Psi_{y2}; \\ \frac{d\Psi_{y2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \Psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_s \Psi_{x1} - \frac{\pi}{\tau} (v_0 + v) \Psi_{x2}; \\ F = \frac{3}{2} \frac{\pi \omega_0 K_r}{\tau \alpha x_s} (\Psi_{x2} \Psi_{y1} - \Psi_{x1} \Psi_{y2}) \end{cases} \quad (4)$$

TAV induktoriaus srovės dedamosios apskaičiuojamos pagal lygtis

$$I_{x1} = \alpha'_s (\Psi_{x1} - \Psi_{x2} K_r) \frac{U_1}{r_1}, \quad (5)$$

$$I_{y1} = \alpha'_s (\Psi_{y1} - \Psi_{y2} K_r) \frac{U_1}{r_1},$$

o fazinė srovė randama taip:

$$I_A = I_{x1} \cos \omega_0 t - I_{y1} \sin \omega_0 t. \quad (6)$$

Lygčių sistema (4) sprendžiama kartu su pagrindine pavaros judesio lygtimi

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (F - F_s) \quad (7)$$

ir lygtimi nueitam keliui rasti:

$$\frac{dx}{dt} = v. \quad (8)$$

Lygtyse (4 – 6) pažymėta: Ψ_{x1}, Ψ_{y1} – pilnutinio statoriaus srauto projekcijos į x, y ašis; Ψ_{x2}, Ψ_{y2} – pilnutinio rotoriaus srauto projekcijos į x, y ašis; U_{1m} – tinklo fazinės įtampos amplitudinė vertė; γ – tinklo įtampos fazė įjungimo metu; τ – polių žingsnis; v_0 – variklio tuščiosios veikos greitis; v – variklio greitis; F – variklio jėga; F_s – statinė pasipriešinimo jėga; kiti koeficientai randami iš variklio apvijų parametrų – aktyviųjų ir induktyviųjų varžų [11].

Lygtyje (7) variklio sukuriama jėgą F sudaro tiesioginės F_t ir atvirkštinės dedamosios F_a algebrinė suma.

Modelio, sudaryto tiesioginei įtampos dedamajai, rezultatas yra variklio sukuriama jėga ir greitis. Modelis, sudarytas atvirkštinei įtampos dedamajai (pagal (4–8) lygtis), sukuria priešingos krypties jėgą. Abiejų modelių sukurtos jėgos algebriskai sumuojamos ir ši suminė jėga veikia antrinį elementą. Antrinis elementas juda greičiu v . Nulinė dedamoji jėgos nekuria.

Projektuojant naujas ir tiriant esamas pavaras, svarbu turėti patogią naudoti programą. Remiantis šiuo matematiniu modeliu, buvo sudarytas algoritmas ir sukurta vaizdi ir patogi naudoti programa Matlab programinėje aplinkoje. 1 pav. parodytas programos aktyvusis langas. Naudojantis šia programa, lango apačioje įvedami tiriamosios pavaros parametrai. Paspaudus vieną iš dešinėje pusėje esančių mygtukų, ekrane atsiranda norima laikinė charakteristika.

1 pav. TAV simetrinių ir nesimetrinių režimų modeliavimo programos aktyvusis langas

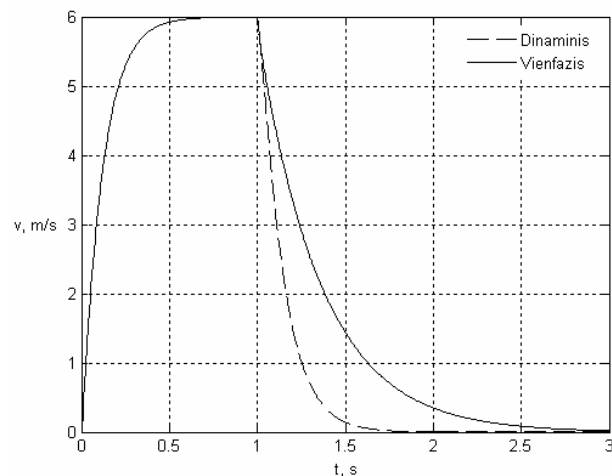
Sudarytas modelis leidžia tirti ne tik variklio paleidimo režimą, bet ir įvairius nesimetrinius (dinaminio stabdymo, vienfazio stabdymo) režimus, palyginti gautas charakteristikas, įvertinti variklio parametrų įtaką dinaminėms charakteristikoms. Variklio apvijų sujungimo schemas dinaminio ar vienfazio stabdymo metu yra pateiktos [12,13]. Dinaminiam ir vienfaziam stabdymo režimams palyginti tiriami modeliai, kai prie vienos fazinės apvijos prijungiama nuolatinė ar kintamoji įtampa. Įtampų vertės parenkamos taip, kad efektinė kintamosios srovės vertė būtų lygi nuolatinės srovės vertei.

Imitacijos rezultatai

2 pav. parodyta, kaip keičiasi greitis paleidimo ir stabdymo metu, kai TAV stabdomas dinaminio ir vienfaziu būdais, esant vienodai statoriaus srovei. Stabdant dinaminio būdu, variklis sustoja viena sekunde greičiau negu vienfazio stabdymo metu.

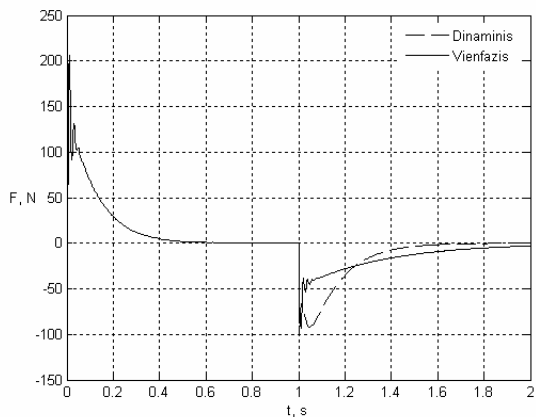
3 pav. parodyti TAV paleidimo, esant simetrinei įtampai, ir dinaminio bei vienfazio stabdymo metu sukuriamos jėgos grafikai. Dinaminio stabdymo metu sukurta vidutinė jėgos vertė yra didesnė negu vienfazio stabdymo, todėl ir TAV sustoja greičiau (2 pav.).

4 pav. pateikta variklio srovės kitimo grafikas, kai jis paleidžiamas ir stabdomas vienfaziu būdu, prijungus prie A fazės kintamąją įtampą. Stabdymo srovė įjungžiama laiko momentu $t = 1$ s. Paleidimo srovės pirmasis maksimumas tik 3 % viršija nusistovėjusią srovės vertę, o vienfazio stabdymo metu neįjungiama jokio fazinės srovės padidėjimo.

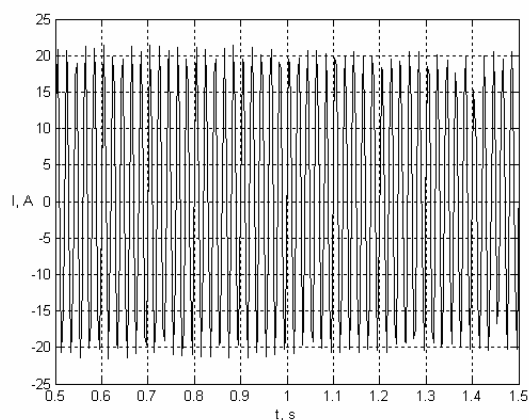


2 pav. TAV greičio kitimas paleidimo ir stabdymo metu, kai jis stabdomas dinaminio ir vienfaziu būdais, esant vienodai statoriaus srovei

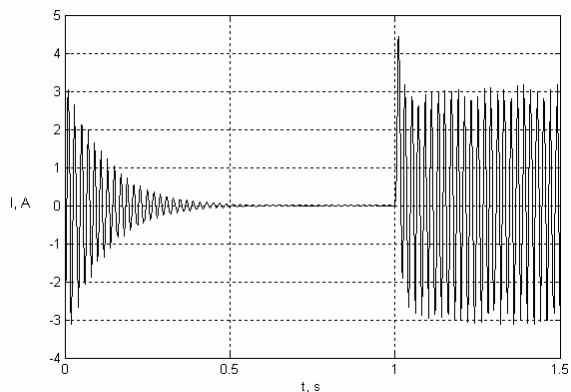
Tačiau 5 pav. pateiktas antrinio elemento srovės grafikas rodo, kad antriniame elemente srovės pirmasis maksimumas 50 % didesnis už nusistovėjusią srovę. 4 ir 5 pav. rodo, kad, vienfaziu būdu stabdomam varikliui sustojus, reikia išjungti stabdymo įtampą, nes ji kuria srovę induktoriuje ir stovinčiame antriniame elemente.



3 pav. TAV jėgos kitimas paleidimo ir stabdymo metu, kai jis stabdomas dinaminio ir vienfaziu būdais, esant vienodai statoriaus srovei



4 pav. Statoriaus srovės kitimas paleidimo ir vienfazio stabdymo metu



5 pav. Variklio antrinio elemento srovės kitimas paleidimo ir vienfazio stabdymo metu

Išvados

1. Sudaryta programa leidžia imituoti tiesiaieigės pavaros dinaminis stabdymo režimus, tiekiant nuolatinę ar kintamąją srovę į skirtingais būdais sujungtas induktoriaus apvijas.
2. Stabdant nuolatinę srovę, variklis sustoja greičiau negu stabdant kintamąją srovę, kai abiem atvejais įjungžiama stabdymo srovė tik į vieną variklio apviją su sąlyga,

kad stabdymo metu kintamoji srovė lygi nuolatinei srovei.

3. Stabdant vienfaziu būdu, varikliui sustojus, reikia išjungti stabdymo įtampą, nes ji kuria srovę induktoriuje ir stovinčiame antriniame elemente.

Literatūra

1. **Budig P. K.** The application of linear motors. The third International Power Electronics and motion Control conference 2000. – Vol.3. – P. 1336–1341.
2. **Abdou, G.H.** Application of LIM in flexible manufacturing systems // Programmable Control and Automation Technology Conference and Exhibition. Conference Proceedings, Fourth Annual Canadian. – 1988. – P. 1 – 5.
3. **Yuynue Y.** Application of the linear induction motors in the postal mechanical system // Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2001. ICEMS 2001. – Vol.23. – P. 964 – 967.
4. **Poška A.** Specialiosios automatinės sistemos. – Vilnius: Technika, 1995. – 204 p.
5. **Morizane T., Masada E.** Study on the feasibility of application of linear induction motor for vertical movement // IEEE transactions on magnetics. – 1993. – Vol.29, No 6. – P. 2938 – 2940.
6. **Bucci G., Meo S., Ometto A., Scarano M.** The control of LIM by a generalization of standard vector techniques // Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. – 1994. – Vol.1. – P. 623 – 626.
7. **Boldea I.** Linear electric actuators and their control: a review // Proceedings of the 10th International Conference European Power and Drives Association PEMC 2002, 9-11 September

2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia. ISBN: 953-184-047-4. – P. 12 – 19.

8. **Poška A., Rinkevičienė R., Teišerskas Č.** Tiesiaieigės elektros pavaros impulsinis valdymas// Elektrotechnika: Mokslo darbai. – Kaunas: Technologija, 1997. – Nr. 21(30). – P. 137-140.
9. **Smilgevičius A.** Tiesiaieigių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(57). – P. 42 – 47.
10. **Каралюнас Б. С.** Нестационарный режим динамического торможения линейного асинхронного двигателя: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Ленинградский и-т авиационного приборостроения.–Ленинград, 1983.– 235с.
11. **Rinkevičienė R., Lisauskas S., Kundrotas B.** Tiesiaieigės pavaros dinaminio stabdymo režimo modeliavimas// Energetikos ir elektrotechnikos technologijos: Konferencijos pranešimų medžiaga. – Kaunas. 2004.– P. 150–155.
12. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Tiesiaieigių pavarų dinaminiai stabdymo režimai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 4(60). – P. 37–40.
13. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Tiesiaieigės elektros pavaros vienfazio stabdymo dinaminis modelis// Energetikos ir elektrotechnikos technologijos: Konferencijos pranešimų medžiaga.– Kaunas. 2005.– P. 122–127.
14. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Tiesiaieigių mechatroninių sistemų modeliai // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 69–73.

Pateikta spaudai 2005 10 28

R. Rinkevičienė, S. Lisauskas. Tiesiaieigio asinchroninio variklio nesimetrinių dinaminio stabdymo režimų tyrimas //Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2006. – Nr. 1(65). – P. 60 – 63.

Nagrinėjami tiesiaieigio asinchroninio variklio nesimetriniai dinaminiai stabdymo režimai. Pateikiamas tiesiaieigės elektros pavaros modelis gautas skirtingais būdais jungiant variklio apvijas stabdymo metu. Modelį sudaro trys TAV modeliai, kurie atitinka simetrines tiesioginę, atvirkštinę ir nulinę variklio įtampas dedamąsias. Pateiktos diferencialinės lygtys variklio įtampos atvirkštinei dedamajai sinchroninių greičių judančioje koordinačių sistemoje apskaičiuoti. Sukurta programa leidžia tirti ne tik variklio paleidimo režimą, bet ir įvairius nesimetrinius (dinaminio stabdymo, viefazio stabdymo) režimus, palyginti gautas charakteristikas, įvertinti variklio parametrų įtaką dinaminėms charakteristikoms. Pateikti nesimetrinių dinaminio stabdymo režimų imitacijos rezultatai rodo, kad nuolatine srove stabdomas variklis sustoja greičiau negu stabdomas kintamąja srove. Stabdant vienfaziu būdu, varikliui sustojus, reikia išjungti stabdymo įtampą, nes ji kuria srovę induktoriuje ir stovinčiame antriniame elemente. Il. 5, bibl. 14 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

R. Rinkevičienė, S. Lisauskas. Investigation into Dynamic Non-Symmetrical Breaking Modes of Linear Induction Motor // Electronics and Electrical engineering. – Kaunas: Technologija, 2006. – No. 1(65). – P. 60 – 63.

The paper presents investigation into non-symmetrical dynamic breaking modes. The non-symmetrical model of linear induction drive with different connection of inductor windings is presented. Model comprises three models of linear induction drive made for direct, inverse and zero components of supply voltage. The differential equations in reference frame moving with synchronous speed to form computer model for inverse voltage are presented. Developed program gives possibility to investigate not only starting process but also various nonsymmetrical breaking modes (dynamic breaking, single-phase breaking). Presented results of simulation show that direct current breaking of the linear motor is more effective than single phase breaking. Ill. 5, bibl. 14 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English and Russian).

P. Ринкявичене, С. Лисаускас. Исследование несимметрических динамических режимов торможения линейного асинхронного двигателя // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2006. – №. 1(65). – С.60 – 63.

Исследуются несимметрические динамические режимы торможения линейного асинхронного двигателя (ЛАД). Разработана компьютерная модель ЛАД при разном соединении обмоток при торможении. Модель состоит из трех моделей ЛАД, разработанных для прямой, обратной и нулевой последовательности напряжения питания. Даны дифференциальные уравнения ЛАД для обратной последовательности. Разработанная программа позволяет исследовать пусковой и разные несимметрические режимы торможения ЛАД. Представленные результаты имитации показывают, что торможение постоянным током более эффективно, чем однофазное. Ил. 5, библи. 14 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).