

Тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштардағы болжамды модель әдісіне негізделген басқару

¹*КАШАГАНОВА Алтынай Узакбайевна, докторант, altynai-1992@inbox.ru,

¹САГНАЕВА Сауле Кайроллиевна, ф.-м.ғ.к., доцент, sagnaeva_tar@mail.ru,

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақаланың мақсаты – тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштың векторлық басқару әдісін зерттеу. Соның ішінде болжамдық модельдермен соңғы басқару жиынтығы әдісі (FCS-MPC) негізіндегі басқару әдісі қарастырылған. Классикалық өрісті басқару әдісіне (FOC) де шолу жасалды. Сондай-ақ, Matlab-Simulink бағдарламасында модельдеу арқылы екі аталған әдістерге салыстырмалы талдау жүргізілді. Жұмыс нәтижелері бойынша өрісті басқару FOC әдісімен салыстырғанда болжамдық модельдермен соңғы басқару жиынтығы FCS-MPC әдісі тиімді екенін атап өтуге болады.

Кілт сөздер: синхронды қозғалтқыш, тұрақты магнит, басқару, болжамды модель әдісі, өрісті басқару, MPC реттегіші.

Кіріспе

Тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштарды (ТМСҚ) зерттеуге деген өзектілік олардың асинхронды қозғалтқыштарға қарағанда бірқатар артықшылықтарымен тығыз байланысты. Оның кейбір артықшылықтарына – жоғары қуат коэффициенті мен тиімділігі, жоғары айналу моментінің тығыздығы, сырғанау сақиналарының болмауы, істен шығу жылдамдығының өте төмен болуы және жоғары сенімділік жатады [1, 2]. ТМСҚ әлдеқайда күрделі басқару механизмдерін қажет етеді, өйткені олардың әртүрлі толқулардағы айнымалы динамикасы бар. Қазіргі уақытта MPC (модельдік болжамдық бақылау) – әдістерінің тәжірибелік қолдану аясы айтарлықтай өсті: аэроғарыштық зерттеулерде және құрылыс пен химия өнеркәсібінде, тамақ өнеркәсібінде, қазіргі заманғы энергетикалық жүйелерде көптеген технологиялық процестерді қамтиды. MPC-тің негізгі артықшылығы – бейсызықтарды қамтитын көп өлшемді және көп байланысты күрделі құрылымды объектілерді басқаруға мүмкіндік беретін, жоғары бейімділік қасиеттеріне ие сандық оңтайландыру әдісіне негізделген кері байланысты қалыптастыру сұлбасының салыстырмалы қарапайымдылығы, басқаратын және бақыланатын айнымалыларды шектеулер шегінде нақты уақыт режимінде процестерді оңтайландыру, объектілер тапсырмасы мен толқуларды анықтаудағы белгісіздіктерді ескеру болып табылады [3].

Электр жетегі жүйелеріндегі болжамды модельді басқару әдістерін екі негізгі топқа бөлуге

болады: модельдік болжамды басқарудың үздіксіз басқару жиынтығы (CCS-MPC) және модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы (FCS-MPC). Модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы қолданылатын кернеу көзінің түрлендіргішінің негізгі коммутациялық күйлерінің соңғы жиыны арасындағы оңтайлы ауысуды таңдайды және ЕИМ (ендік-импульс модуляциясын) қолдануды қажет етпейді, сонымен қатар болжамдық көкжиек бір қадам арқылы алынса тәжірибе жүзінде оңай жүзеге асырылады. Инвертор қосқыштарының дискретті ауысу уақытында ТМСҚ моделі бағалау функциясын есептеу үшін қажетті i_d және i_q токтарын болжау үшін пайдаланылады. Инвертордың ауысу реттері арасындағы кезектесу тек белгілі бір уақыт нүктелерінде байқалады. Болжам көкжиегі бойынша ауысу күйлерінің барлық ықтимал жиындары бойынша әрбір таңдау кезінде оңтайландыру үшін, контроллердің әрбір жаңа шеңберімен ауысу жиілігі біркелкі емес өзгеруі мүмкін. ТМСҚ моделінде модельдік болжамды басқарудың үздіксіз басқару жиынтығы жүйедегі статор ток векторларына бағытталған болжау көкжиегі бойынша u_d және u_q сәйкес статор кернеулерін табу үшін қолданылады. Және сәйкес келетін коммутациялық сигналдарды генерациялау үшін екі инвертордан бөлек модулятор қолданылады [4]. [5] мақалада ТМСҚ пайдаланудың кейбір артықшылықтары келтірілген, сондықтан ТМСҚ үшін қолданылатын басқару стратегиясы кіріс деректеріндегі өзгерістерге төтеп беру үшін тамаша динамикалық жауапқа

ие болуы керек.

Мақалада модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы FCS-MPC әдісі талқыланады. Өйткені бұл әдіс CCS-MPC әдісімен салыстырғанда жақсы динамикалық сипаттамаларға ие [6]-[8]. Сондай-ақ классикалық бақылау әдісімен, атап айтқанда модельдік болжамды басқарудың өрісті басқару моделі (FOC) мен модельдік болжамды басқару (MPC) әдісін әзірлеу және салыстырмалы зерттеу ұсынылған. Екі әдіс Simulink MatLab көмегімен салыстырылады. Салыстыру нәтижесінде үш фазалы ТМСҚ айналу жылдамдығын басқарудың ең жақсы әдісі таңдалды. Мақаланың бірінші бөлімі ТМСҚ моделінің теңдеуіне арналған, ал жұмыстың екінші бөлімінде жүйенің моделі берілген. Келесі бөлімде салыстырмалы зерттеулер мен модельдеу нәтижелері жүргізіліп, қорытындылар келтіріледі.

ТМСҚ моделінің теңдеулері

Үш фазалы тұрақты магнитті синхронды қозғалтқышты қарастырайық.

Дөңгелек ротор үшін фаза индуктивтілігінде өзгеріс болмайды:

$$L_d = L_q.$$

Олай болса, Парк түрлендіруін қолданғаннан кейін үш фазалы ТМСҚ машина үлгісін айналмалы координаттар жүйесінде келесідей сипаттауға болады:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + p \omega_m i_q, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{\lambda p \omega_m}{L_q} + p \omega_m i_d, \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda i_q, \quad (3)$$

мұндағы L_d , L_q – сәйкесінше d және q осі бойындағы индуктивтілік, R – статор орамаларының кедергісі, i_d , i_q – сәйкесінше d және q осі бойындағы тоқтар, u_d , u_q – сәйкесінше d және q осі бойындағы кернеу, ω_m – ротордың бұрыштық жылдамдығы,

λ – статор фазаларында ротордың тұрақты магниттері тудыратын магнитті ағынның амплитудасы, p – полюс жұптарының саны, T_e – электрмагниттік момент.

Үш фазалы ТМСҚ механикалық жүйесі:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F \omega_m - T_m), \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m, \quad (5)$$

мұндағы J – біріктірілген ротор мен жүктеме инерциясы, F – біріктірілген тұтқыр ротордың үйкелісі мен жүктемесі, θ – ротордың бұрыштық жағдайы, T_m – механикалық білік моменті, T_f – біліктің үйкеліс моменті.

Тікелей басқару моделі (FOC)

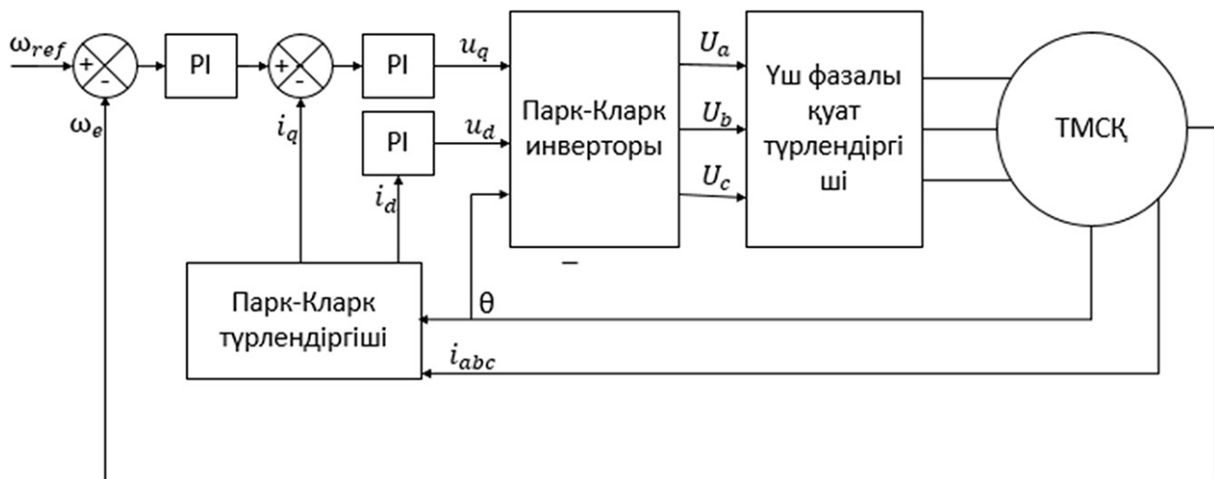
Қозғалтқыш кернеулері үш фазалы коммутация күйлерін қолдану арқылы – S_a , S_b мен S_c – және тұрақты кернеу V_{dc} инверторы арқылы анықталады. Есептелген үш фазалы шығыс кернеулерін келесідей анықтауға болады:

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c), \\ u_b &= \frac{V_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c), \\ u_c &= \frac{V_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c). \end{aligned} \quad (6)$$

Статор кернеуі мәндері $\alpha\beta/dq$ Парк тікелей түрлендіру арқылы айналмалы координаттар жүйесіне dq -ге түрлендіріледі, және оны орындау үшін ротордың орналасуы туралы ақпарат қажет:

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{3} \left[u_a \sin(\theta) + u_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right], \\ u_q &= \frac{2}{3} \left[u_a \cos(\theta) + u_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

Тұрақты магниттік синхронды қозғалтқыштың өрісті басқару моделі 1-суретте көрсетілген. Жылдамдық пен токты реттеу үшін классикалық ПИ реттегіштері қолданылады.



1-сурет – Тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштың өрісті басқарудың құрылымдық сұлбасы (FOC)

FCS-MPC моделі

Мақалада FCS-MPC моделі осы функцияның сандық мәнін барлық мүмкін кернеу векторларымен салыстыру арқылы сапа индикаторының итеративті функциясын азайту арқылы жүзеге асырылады. Үш фазалы инвертор 2-суретте көрсетілгендей тұрақты магниттік синхронды қозғалтқышқа қосылған. Инверторда сегіз түрлі ауысу векторлары бар және сәйкесінше сегіз U_0-U_7 кернеу векторлары пайда болады. Алты нөлдік емес вектор және екі нөлдік вектор бар. Кестеде тұрақты abc анықтамалық жүйесіндегі белсенді кернеу векторларының амплитудасы көрсетілген. Дәстүрлі FCS-MPC-ті дамыту үшін болашақ іріктеу кезеңіндегі токтарды болжау үшін дискретті уақыт моделі қажет. Демек, dq айналмалы тірек шеңберіндегі ТМСҚ дискретті уақытын келесідей білдіруге болады [9]:

$$i_d(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L_s})i_d(k) + \frac{T_s}{L_d}u_d(k) + T_s\omega_r(k)i_q(k), \quad (8)$$

$$i_q(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L_s})i_q(k) + \frac{T_s}{L_q}u_q(k) - \frac{T_s\lambda}{L_q}\omega_r(k) - T_s\omega_r(k)i_d(k). \quad (9)$$

ТМСҚ модулі u_{dq} статорының кернеуі (7) формуласымен анықталады. Демек, сапа көрсеткішінің итеративті азайту функциясы [10]:

$$J = |i_d(k+1) - i_d(k)| + |i_q(k+1) - i_q(k)|. \quad (10)$$

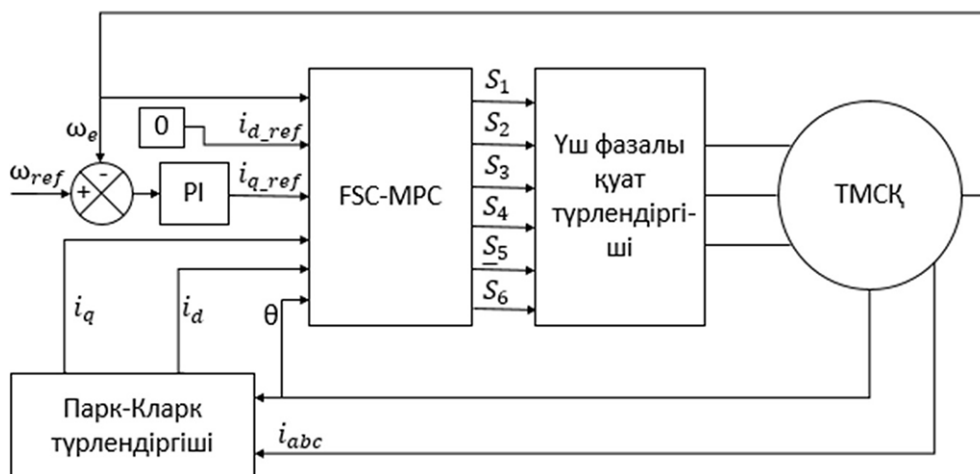
Модельдеу нәтижелерін талдау

Классикалық өрісті басқару әдісі мен модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы әдісінің модельдеу нәтижелері ұсынылған. Модельдеу нәтижелері графикалық тәуелділік түрінде ұсынылған. Салыстырмалы талдау Simulink MatLab иммитациялық моделінде жүргізілді. Тұрақты ток буынында кернеу (V_{dc}) – 560 В, ТРСК білік жүктемесі – 3 Н*м және 0,02 секунд уақыт сәтінде. FCS-MPC басқару өнімділігі FOC-қа қарағанда жақсырақ екенін көруге болады.

3-суретте ТМСҚ жылдамдығының графигі көрсетілген, FOC және FCS-MPC үшін жауап беру уақыты сәйкесінше 1,720 мс және 2,229 мс, ал өтпелі уақыт сәйкесінше 2,776 мс және 2,346 мс құрайды.

Қорытынды

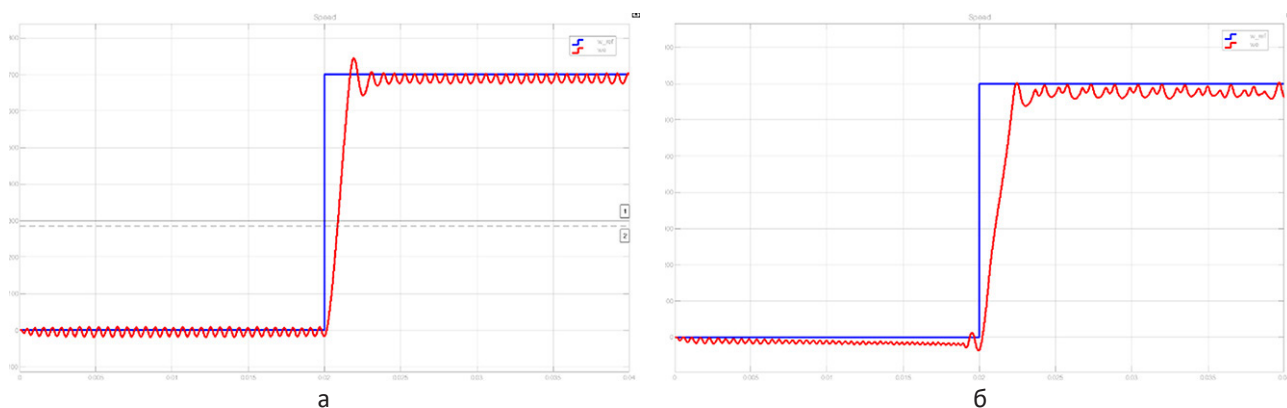
Matlab-Simulink бағдарламасында модельдеу көмегімен ТМСҚ жүйелеріндегі өрісті басқару



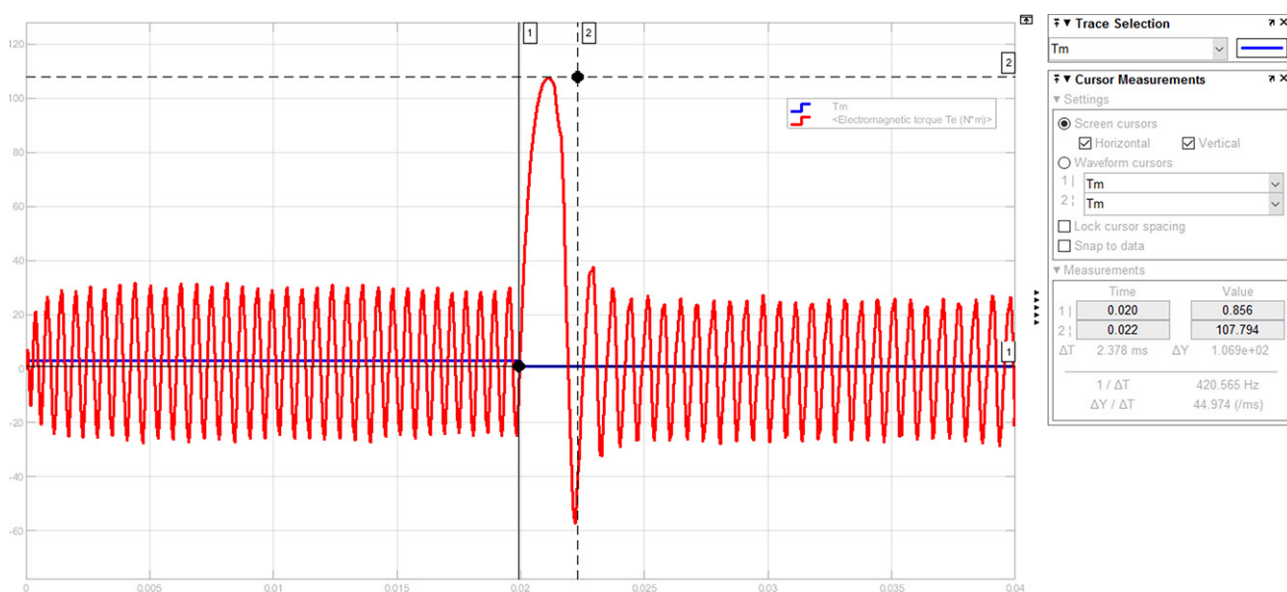
2-сурет – Тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштың модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығының (FCS-MPC) құрылымдық сұлбасы

Әр түрлі ауысу күйлері үшін кернеу параметрлері

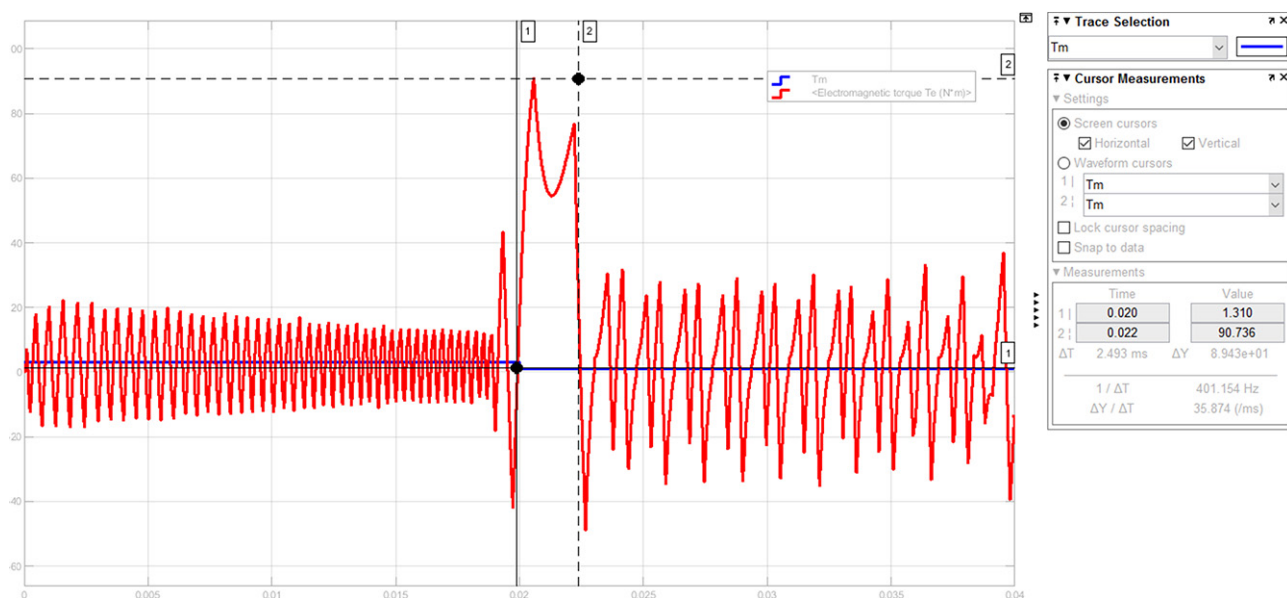
Векторлық кернеулер	S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
V_2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
V_3	0	1	1	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
V_4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
V_5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
V_6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
V_7	1	1	1	0	0	0



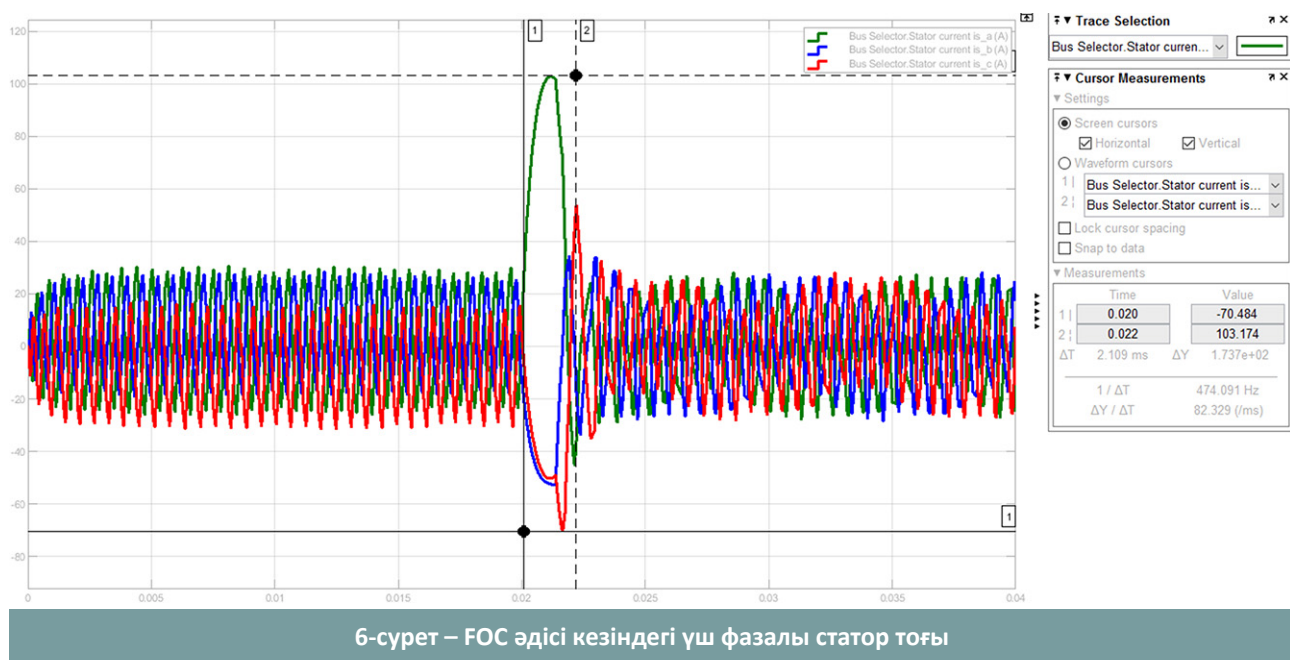
3-сурет – ТМСҚ жылдамдығы: а) FOC; б) FCS-MPC



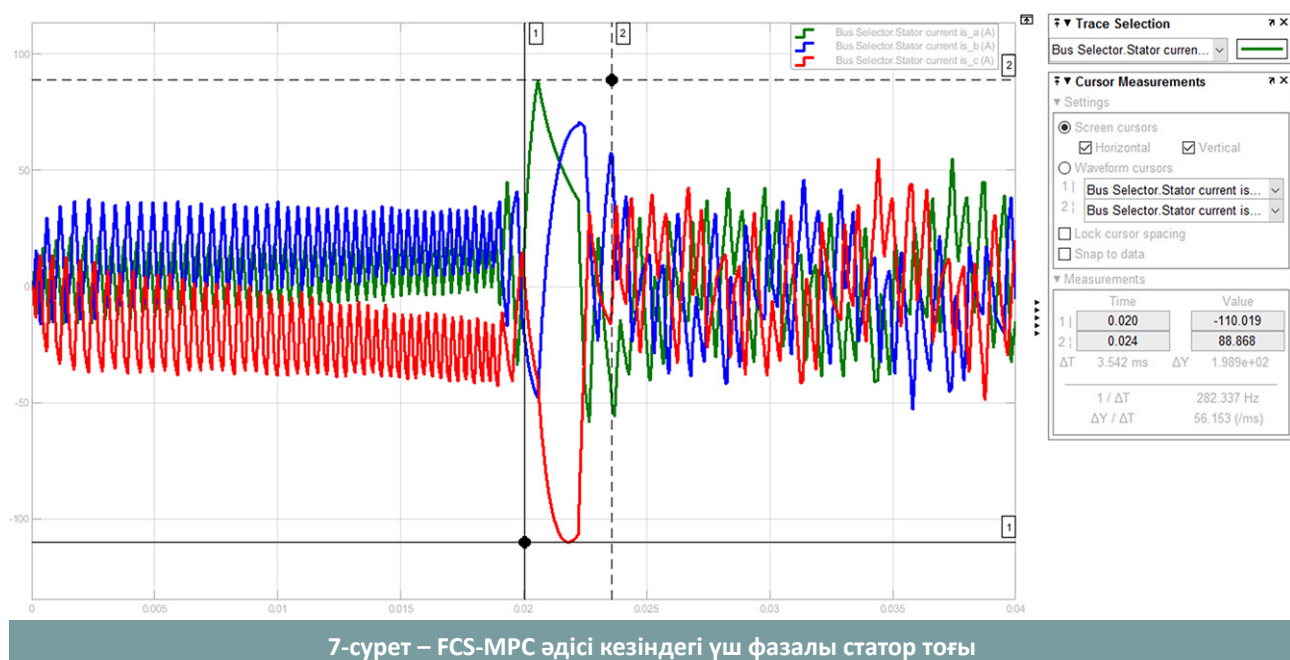
4-сурет – FOC әдісін қолдану кезіндегі ТМСҚ моменті



5-сурет – FCS-MPC әдісін қолдану кезіндегі ТМСҚ моменті



6-сурет – FOC әдісі кезіндегі үш фазалы статор тоғы



7-сурет – FCS-MPC әдісі кезіндегі үш фазалы статор тоғы

мен болжамды модельдермен басқару жұмысын зерттеу жүргізілді. Болжамды басқару ретінде функцияның сандық мәнін барлық мүмкін кернеу векторларымен салыстыру арқылы сапа индикаторының итеративті функциясын азайту арқылы жүзеге асырылатын модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы әдісі қолданылды. Екі сұлбада да жылдамдықты PI контроллері

реттеді. MPC жұмысының салыстырмалы талдауының нәтижесі бойынша реттегіш PI реттегішімен салыстырғанда тиімді.

Осылайша, FOC өрісті басқару әдісімен салыстырғанда FCS-MPC модельдік болжамды басқарудың соңғы басқару жиынтығы әдісі тиімді екенін атап өтуге болады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Driss S., Farhangi S., Nikzad M.R. Low switching frequency model predictive control of PMSM drives for traction applications. In Proceedings of the 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Havel, Iran, 14-15 February 2018; pp. 300-305.
2. Ayad A., Karamanakos P., Kennel R., Rodriguez J. Direct model predictive control of bidirectional Quasi-Z-Source inverters fed PMSM drives. In Proceedings of the 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 4-6 April 2017; pp. 671-676.
3. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Управление с прогнозирующими моделями. Учебное пособие «Научная книга», 2016.
4. Рахим А.А.Р., Кладиев С.Н., Саиди С. Сравнительный анализ методов управления с прогнозирующими моделями шестифазным синхронным двигателем с постоянными магнитами // Омский научный вестник. Омск, 2020. – № 3 (171). – С. 51-56.
5. Murali A., Wahab R.S., Gade C.S.R., Annamalai C., Subramaniam U. Assessing Finite Control Set Model Predictive Speed Controlled PMSM Performance for Deployment in Electric Vehicles. World Electr. Veh. J. 2021, 12, 41.
6. Рахим А.А.Р. Прогнозирующее управление синхронным двигателем с постоянными магнитами // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2020», 25-27 мая 2020г. Томск.
7. Abdelsalam A.A., Byung K.K., Young Il Lee. Model Predictive Torque Control of PMSM for EV Drives: A Comparative Study of Finite Control Set and Predictive Deadbeat Control Schemes, 2016.
8. Abdelsalam A.A., Byung K.K., Young Il Lee. A Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Speed Control of Induction Motors, 2017.
9. Gao X., Abdelrahman M., Hackl C.M., Zhang Z., Kennel R. Direct predictive speed control with a sliding manifold term for pmsm drives. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2019, 8, 1258-1267.
10. José R., Jorge P., César A. Silva, Pablo C., Pablo L., Patricio C., Ulrich A. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007.

Управление на основе метода прогнозирующей модели в синхронных двигателях с постоянными магнитами

^{1*}**КАШАГАНОВА Алтынай Узакбайевна**, докторант, altynai-1992@inbox.ru,

¹**САГНАЕВА Сауле Кайроллаевна**, к.ф.-м.н., доцент, sagnaeva_tar@mail.ru,

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью данной статьи является исследование метода векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, в частности, метода управления, построенного на основе метода с конечным набором управления с прогнозирующими моделями (FCS-MPC). Также был рассмотрен классический полевой метод управления (FOC). Сравнительный анализ двух методов был также выполнен с помощью моделирования в программе Matlab-Simulink. По итогам работы можно отметить, что эффективным является метод с конечным набором управления с прогнозирующими моделями FCS-MPC по сравнению с методом полевого управления FOC.

Ключевые слова: синхронный двигатель, постоянный магнит, управление, метод прогнозирующей модели, полевое управление, MPC-регулятор.

Predictive Model Control in Permanent Magnet Synchronous Motors

^{1*}**KASHAGANOVA Altynay**, doctoral student, altynai-1992@inbox.ru,

¹**SAGNAEVA Saule**, Cand. of Phys. and Math. Sci., Associate Professor, sagnaeva_tar@mail.ru,

¹NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of this article is to study the vector control method for a permanent magnet synchronous motor. In particular, a control method based on a finite set control method with predictive models (FCS-MPC). The classic field control method (FOC) was also considered. A comparative analysis of the two methods was also carried out using simulation in the Matlab-Simulink program. Based on the results of the work, it can be noted that the method with a finite set of control with predictive FCS-MPC models is effective in comparison with the field control method FOC.

Keywords: synchronous motor, permanent magnet, control, predictive model method, field control, MPC controller.

REFERENCES

1. Driss S., Farhangi S., Nikzad M.R. Low switching frequency model predictive control of PMSM drives for traction applications. In Proceedings of the 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Havel, Iran, 14-15 February 2018; pp. 300-305.
2. Ayad A., Karamanakos P., Kennel R., Rodriguez J. Direct model predictive control of bidirectional Quasi-Z-Source inverters fed PMSM drives. In Proceedings of the 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 4-6 April 2017; pp. 671-676.
3. Veremey E.I., Sotnikova M.V. Management with predictive models: Study guide. – Moscow: Scientific book, 2016.
4. Rakhim A.A.R., Kladiev S.N., Saidi S. Comparative analysis of control methods with predictive models of a six-phase synchronous motor with permanent magnets // Omsk Scientific Bulletin. Omsk, 2020. – No. 3 (171). – pp. 51-56.
5. Murali A., Wahab R.S., Gade C.S.R., Annamalai C., Subramaniam U. Assessing Finite Control Set Model Predictive Speed Controlled PMSM Performance for Deployment in Electric Vehicles. World Electr. Veh. J. 2021, 12, 41.
6. Rakhim A.A.R. Predictive control of a permanent magnet synchronous motor // International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «Scientific session TUSUR – 2020», May 25-27, 2020. Tomsk.
7. Abdelsalam A.A., Byung K.K., Young Il Lee. Model Predictive Torque Control of PMSM for EV Drives: A Comparative Study of Finite Control Set and Predictive Deadbeat Control Schemes, 2016.
8. Abdelsalam A.A., Byung K.K., Young Il Lee. A Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Speed Control of Induction Motors, 2017.
9. Gao X., Abdelrahman M., Hackl C.M., Zhang Z., Kennel R. Direct predictive speed control with a sliding manifold term for pmsm drives. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2019, 8, 1258-1267.
10. José R., Jorge P., César A. Silva, Pablo C., Pablo L., Patricio C., Ulrich A. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007.