

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ZSHT7059>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.,

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә. Б. *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцен;</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

FTAMP 621.315:592

<https://doi.org/10.48081/IBLD5538>

***Б. Онгар^{1,2}, Ж. К. Бекболатова¹, Ә. Р. Қарасаева², М. А. Турғанбаев², Е. Е. Сеитбек²**

¹Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы, қ.

²Логистика және көлік академиясы,
Қазақстан Республикасы, Алматы, қ.

*e-mail: b.ongar@satbayev.university

ҮШ ДЕҢГЕЙЛІ КЕРНЕУ ТҮРЛЕНДІРГІШІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада үш деңгейлі кернеу түрлендіргіші, активті-индуктивті және қозғалтқыштағы инвертор жұмысын математикалық модельденуі қарастырылады. Мақаланың негізгі мақсаты үш деңгейлі кернеудің математикалық сипаттамасын жасау болып табылады. Сонымен қатар, үш фазалы инверторлардағы тұрақты ток кернеуі мен ток толқынының егжей-тегжейлі талдауын ала отырып, ең аз тұрақты ток конденсаторын қарастыру. Мақаланың жаңалығы ретінде кеңістік-векторлық алгоритмі әзірленіп, кірістегі кернеуді реттейтін импульстік үш деңгейлі кернеу түрлендіргішінің конденсаторларын математикалық модельді жасау. Осы мақсатта үш деңгейлі кернеу түрлендіргішіне көптеген есептеулер жүргізе отырып, шығыс кернеуінің модуляция жиілігіне шектеулер қарастырылады.

Жартылай өткізгішті ажыратқыштардың көптігіне және басқарудың күрделілігіне қарамастан, жоғары кернеулер мен қуаттарда олар шығыс кернеуінің жоғары сапалы көрсеткіштерін көрсетеді. Мұндай түрлендіргіштердің артықшылығы мынада, кернеу ажыратқыштар арасында бөлінеді және жоғары кернеу үшін бір қосқышты таңдаудың орнына, жоғары коммутация

жүйілігімен жұмыс істей алатын төменгі кернеу үшін бірнеше рет алуға болады.

Есептерді шешу үшін функцияларды ауыстыру әдістері, гармоникалық талдау әдістері, электр тізбегіндегі статикалық процестерді есептеудің аналитикалық әдістері, дифференциалдық және интегралдық теңдеулерді шешудің сандық әдістері қолданылды. Алынған теориялық нәтижелер мен аналитикалық байланыстардың сенімділігі MathCad және MATLAB пакеттері арқылы есептеулер арқылы тексерілді.

Кілтті сөздер: Түрлендіргіш, инвертор, конденсатор, автономды, импульс.

Кіріспе

Инвертор құрылғылары әртүрлі салаларда қолданылады. Көп жағдайда бұл классикалық схемаларға сәйкес жұмыс істейтін бір фазалы құрылғылар. Дегенмен, асинхронды қозғалтқышты аккумулятордан электрмен қамтамасыз ету немесе нақты қажеттіліктер үшін жай үш фазалы ток алу қажет болған жағдайларда туындайды. Ал мұнда тұрақты тоқты қажетті сипаттамалары бар үш фазалы айнымалы токқа түрлендіретін электронды басқарылатын қосқыштардың саны көбейген үш фазалы инвертор көмекке келеді.

Үш фазалы инверторлардың ауқымы өте үлкен, ал кейбір жағдайларда оларсыз істеу мүмкін емес. Модификацияланған заманауи үш фазалы инвертор құрылғыларын пайдаланған кезде қозғалтқышты басқару әлдеқайда тиімді болады. Олар бір және үш фазалы асинхронды қозғалтқыштармен, коммутатор қондырғыларымен, сондай-ақ үш фазалы тұрақты ток қозғалтқыштарымен жалпы схемаға енгізілген.

Қазіргі уақытта бірыңғай энергетикалық жүйемен қамтылмаған Алматының кейбір аймақтарында электрлендіру мәселесі негізінен дизельдік электр станцияларын (ДЭС) пайдалану арқылы шешілуде. Соның ішінде №13 су соратын дизельді электр станциясы орнатылған. Сонымен қатар, дизельдік және бензин қондырғыларының шамамен жартысы жұмыс істемейді, бұл жанармай жеткізудегі үзілістерге және оны жеткізу бағасының жоғары болуына байланысты. Дизельдік электр станцияларының оңтайлы емес жұмыс режимдері және қымбат отын

өндірілген электр энергиясына жоғары тарифтерді анықтайды, оны жергілікті тұрғындар бюджеттен қомақты қаржыландыру жағдайында ғана төлей алады [1, 2354-б; 2, 9008-б; 3, 420-б]. Жаңартылатын энергия көздеріне (күн, жел және т.б.) негізделген автономды электрмен жабдықтау жүйелерінің (АЭЖЖ) маңыздылығы өзекті болып арта түсуде. Дегенмен, қашықтағы объектілерді қуаттандыру кезінде ең маңызды болып табылатын желіге қосылмай АЭЖЖ жұмыс істейтін жартылай өткізгішті түрлендіргіштерді жобалау кезінде қосымша қиындықтар туындайды. Негізгі мәселе болып – бос жүріс режимінде төмен жүктемеде және тұрақты тоқтың кернеуін арттыру болып келеді. Осы жағдайда электромагниттік процестер және үш фазалы энергетикалық сипаттамалары үшін үш деңгейлі кернеу түрлендіргіш инверторы және ұлғайтылған инвертор топологиясын әзірлеуге болады.

Материалдар және әдістер

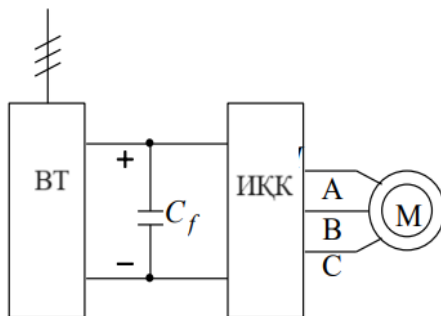
Үш фазалы кернеу түрлендіргішінің ең қарапайым және кең таралған тізбегі үш жартылай көпірлі бір фазалы кернеу түрлендіргіштерін жалпы кіріс кернеу көзіне біріктіру арқылы алынады, ал үш фазалы жүктеменің фазаларын нөлсіз жұлдызшаға немесе үшбұрышша қосқан болса, 1-суретте көрсетілгендей кіріс кернеу көзінің ортаңғы нүктесі қажет емес болады [4, 680-б; 5, 50-б.].

Қазіргі уақытта импульстік ені модуляция және алгоритмдері кеңістік векторының импульс енінің модуляциясы синусоидалы (классикалық) алгоритмдер қолданылады. Импульс енін модуляциялаудың әртүрлі әдістеріне қол жеткізу үшін келесілерді қарастыруға болады:

- коммутациялық шығындарды азайту;
- шығыс кернеуінің гармоникалық коэффициентінің төмендеуі;
- іске асырудың қарапайымдылығы;
- қысқа есептеу уақыты.

Заманауи айнымалы жиілікті жетек жүйелерінде аралық тұрақты ток тізбегі бар жиілік түрлендіргіштері (ЖТ) және автономды инверторлар қолданылады. Қозғалтқыш тиристорлы инверторлардан қуат алған кезде асинхронды қозғалтқышты векторлық басқару жүйесін енгізу ерекшеліктері әр түрлі оқулықтарда егжей-тегжейлі талқылады. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыш негізінде салынған электр жетек жүйелері

және транзисторлық автономды кернеу түрлендіргіші (АКТ), оның қуат бөлігінің жеңілдетілгенін 1 суреттегі сұлбадан көруге болады.



Сурет –1 Электр жетегінің қоректендіру сұлбасы

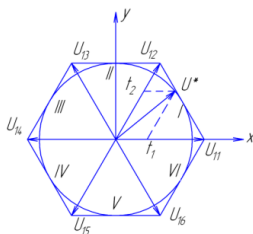
Вентильді түрлендіргіш (ВТ), сәйкес трансформатор арқылы желіден қуат алады немесе сыйымдылық C_f сүзгісі бар анодты реакторлар тұрақты ток желісіне жүктелген. Жүктеме аралық тұрақты ток транзистор болып келеді және оны қуаттың негізгі элементтерінің толық басқарылуының арқасында импульстік қуат күшейткіші (ИҚК) деп атауға болады. АҚ статор орамасы инверторға қосылған [5, 56-б.].

Төмен қуатты жетектерде (15-ке дейін...20 кВт) әдетте басқарылмайтын вентильді түрлендіргіш (ВТ) қолданылады, соның арқасында жиілік түрлендіргіштері (ЖТ) қоректендіру желісіне қатысты максималды қуат коэффициентін иеленеді ($\cos$ тогының бірінші гармоникасы үшін). Мұндай шешім энергияны желіге қалпына келтірудің мүмкін еместігімен байланысты, сондықтан қозғалтқыштың генераторлық тежеу режимдерін жүзеге асыру үшін айналмалы массалардың кинетикалық энергиясын «ағызу» үшін арнайы балласт резисторының тұрақты ток буынына уақытша қосу қарастырылуы керек. Неғұрлым қуатты электр қабылдағыштарда және тежегіш режимдерінде электр жетегінің ұзақ жұмыс істеуі қажет болған жағдайда реттеудің және инверттеудің ең аз бұрыштарымен жұмыс істейтін, бөлек басқарылатын реверсивті вентильді түрлендіргіштер қолданылады. Балласт резисторының қосылуын немесе кері вентильді түрлендіргішінің түзеткіш жиынтықтарын

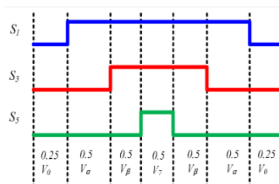
басқару тұрақты ток буынындағы кернеу функцияларында жүзеге асырылады [6, 2121-б. 7, 6117-б. 8, 5176-б.].

Нәтиже және талқылау

Бұл мақалада аэроғарыш, электромобильдер және сорғы құрылғылары сияқты электр жетектерінде қолданылатын үш фазалы инверторлардың математикалық құрылымы мен талдауы зерттеледі. Инверторды әзірлеу кезінде әртүрлі WBG жартылай өткізгіш технологиялары ескеріледі. Содан кейін SiC құрылғыларының жетек қосымшаларындағы артықшылықтарын бағалау үшін дәстүрлі Si IGBT және SiC MOSFET көмегімен стандартты екі деңгейлі инверторлары бар екі синхронды реактивті қозғалтқыш жетек жүйесі жасалады. Сонымен қатар, екі жетек жүйесі үшін де импульстік-ендік басқарылатын инверторлардың (ИБИ) қуатының жоғалуы бағаланады және зерттеледі. Бұл мақалада тұрақты ток тізбегіндегі кернеу мен токтың толқындарын толық талдау кіреді. Сонымен қатар, ток пен кернеудің пульсациясына төтеп беру үшін қажетті тұрақты токтың минималды конденсаторы бағаланады. Соңында, SynRM үш фазалы жетегінің өнімділігі әртүрлі жұмыс жылдамдықтары мен жүктемелерде эксперименталды түрде бағаланады.



a)



б) Сурет – 1 (а) үш фазалы түрлендіргішке арналған алтыбұрыш және (б) бірінші сектордағы бір циклдегі үздіксіз импульс енін басқару үшін коммутация тізбегі [6, 2130-б.]

Тиімділікті машинаның мыс пен темірдің жоғалуын, сондай-ақ инвертордың ауысуы мен өткізгіштігінің жоғалуын қамтитын есептелген шығыс қуатын және жалпы есептелген шығынды пайдалану арқылы анықтау оңай. Бұл салыстыру кезінде механикалық шығындар ескерілмейді [9, 1426-б.].

Сондай ақ 2 суреттегі сұлбадан инвертор кілттерінің комбинацияларының санын санауға болады:

$$n_k = n^3 \quad (1)$$

Шектейтін диодтары бар сұлба бойынша жасалған түрлендіргіштің артықшылықтары:

- басқа тізбектермен салыстырғанда түрлендіргіштің құнына әсер ететін конденсаторлар саны аз қолданылады;

- қосылу бір тұрақты ток көзіне өтеді.

Әрбір тізбекті басқалардан тәуелсіз қарастыруға болады. Бұл конденсаторлардағы кернеуді теңестіру үшін бүкіл үш фазалы жүйедегі процестерді қарастыратын шектеулі диодты түрлендіргіштен айтарлықтай айырмашылы [10, 102-б.; 11, 260-б.].

Тағы бір маңызды кемшілік – конденсаторлардың көп мөлшері, бұл түрлендіргіштің құнын арттырады.

(2, а суретке) сәйкес диаграмма салуға болады, бұл комбинациялар базалық векторлармен көрсетілген, соның арқасында шығыс кернеуі қалыптасады. Нөлдік векторлар диаграммада көрсетілмеген, өйткені олар жүктемеде нөлдік кернеуді құрайды және бұл векторлардың ұзындығы нөлге тең.

Тұрақты ток буынының конденсаторын таңдағанда, кернеудің максималды пульсациясын ескеру қажет, әсіресе конденсатордың эквивалентті сериялық кедергісі төмен болған кезде, демек, ток пульсациясынан туындаған жүктемені басқару үшін конденсатордың кіші мәні жеткілікті. Көп деңгейлі түрлендіргіш үшін тұрақты ток конденсаторының кернеу пульсациясын азайту әдістері сілтемелерде талқыланады [12, 242-б.; 13, 261-б.; 14, 149-б.] сілтемесінде параллель диодтардың кері қалпына келуін ескере отырып, жиілік

түрлендіргіштерінің тұрақты ток буынындағы кернеудің пульсациясын есептеу көрсетілген.

Қорытынды

Қазіргі уақытта көп деңгейлі кернеу түрлендіргіштерінің көптеген тізбектері белгілі. Кернеуі 1кВ-қа дейінгі үш деңгейлі түрлендіру үшін шектеулі диодтары бар түрлендіргіш тізбегі ең қолайлы, өйткені тек бір тұрақты ток көзі қажет, басқа тізбектермен салыстырғанда қолданылатын конденсаторлардың саны аз, сондықтан мұндай схемада жасалған түрлендіргіш арзан болады, өлшемдері мен массасы бойынша аз болады. Импульстік-ендік басқарылатын инверторлардың (ИБИ) үш фазалы жетегінің өнімділігі әртүрлі жұмыс жылдамдықтары мен жүктемелерде сыналды. Бұл мақалада тұрақты ток тізбегіндегі кернеу мен ток пульсациясын мұқият бағалау да қамтылған. Сонымен қатар, ток пен кернеудің пульсациясын қарымталау үшін қажетті тұрақты токтың минималды конденсаторы есептелді.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Торрес, Р. А., Дай, Х., Джанс, Т. М., Сарлиоглу, Б. Работа и анализ инверторов тока с использованием двухзатворных четырехквadrантных широкозонных силовых ключей. // В материалах Конгресса и выставки IEEE по преобразованию энергии (ECCE), Балтимор, Мэриленд, США, 29 сентября – 3 октября, 2019 г., – С. 2353–2360.

2 Ахмед, МР, Готд, Р., Форсайт, А. Дж. Прогнозирование поведения SiC MOSFET в условиях жесткого, мягкого переключения и ложного включения. // IEEE Транс. Силовой электрон. – 2017., 64. – 9001–9011.

3 Ян, Ф., Ван, Л., Конг, Х., Чжу, М., Лю, Х., Лу, Х., Цинь, М., Чжан, Т., Ган, Ю., Цзя, Л. Метод компактной компоновки силового модуля с динамическими характеристиками 4H-SiC MOSFET и разработка силового электронного преобразователя при чрезвычайно высокой температуре перехода. // IEEE Транс. Силовой электрон. – 2023. 38. 417–434.

4 Аррози, Дж., Ретганса, Д. В., Дуарте, Ильхан J. Л., Карлс, Э., Хьюсман, Х. Влияние мертвого времени на пульсации входного тока трехфазного инвертора напряжения. // Energy 2023 , – 16.– 688.

5 **Гельман, М.В.** Схемотехника преобразователей с высокими энергетическими показателями: учебное пособие / М.В. Гельман, М. М. Дудкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 103 с.

6 **Котб Б. Тавфик, Арафа С. Мансур және Питер сержант.** [Үш фазалы инверторлардың математикалық дизайны және талдауы: кең жолақты жартылай өткізгіштердің әртүрлі технологиялары және DC-Link конденсаторларын таңдау]. Математика 2023, 11, 2137. <https://doi.org/10.3390/math11092137>

7 **Танака, Т., Ван, Х., Блаабьерг, Ф.** Метод уменьшения пульсаций напряжения на конденсаторе звена постоянного тока для модульного многоуровневого каскадного преобразователя с одиночными ячейками моста типа «треугольник». IEEE Транс. Индийское прил. **2019** , 55 , 6115–6126.

8 **Го, Дж., Йе, Дж., Эмади, А.** Анализ пульсаций тока и напряжения в цепи постоянного тока с учетом обратного восстановления антипараллельных диодов в инверторах источника напряжения. IEEE Транс. Силовой электрон. **2018** , 33 , 5171–5180.

9 **Leon M. Tolbert, Thomas G. Habetler.** Жаңа көпдеңгейлі инверторлы тасымалдаушыға негізделген PWM әдістері. IEEE IAS 1998 жыл сайынғы жиналысы, Сент-Луис, Миссури, 10-15 қазан, 1998 ж., 1424-1431 беттер.

10 **Jang-Hwan Kim, Seung-Ki Sul, Prasad N.** Көп деңгейлі төрт аяқты VSI үшін оңтайлы ауысу реттілігі бар тасымалдаушыға негізделген PWM әдісі. IAS 2005, 99-105 б.

11 **Соколовский, Г. Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник. Москва : Academa, 2006 – 265 с.

12 **Герман-Галкин, С. Г., Кардонов, Г. А.** Электрические Машины. Лабораторные работы на ПК. Санкт-Петербург: Корона принт, 2003, 256 с.

13 **Герман-Галкин, С. Г.,** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008, 368 с.

14 **Josep Pou.** Үш фазалы PWM көп деңгейлі түрлендіргіштерді модуляциялау және басқару. Каталония техникалық университеті, 2004, 205 б.

REFERENCES

1 **Torres, R.A., Dai, H., Jahns, T. M., Sarlioglu, B.** Rabota i analiz inverterov toka s ispolzovaniem dvýchzatvornyh chetyrehkvadrantnyh shirokozonnnyh silovyh klúchei [Operation and analysis of current inverters using two-gate four-quadrant wide-gap power switches]. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, September 29–October 3, 2019; P. 2353–2360.

2 **Ahmed, MR., Todd, R., Forsythe, A. J.** Prognozirovanie povedenia SiC MOSFET v ýsloviach jestkogo, mágkogo pereklúchenia i lojnogo vklúchenia [Predicting SiC MOSFET behavior under hard, soft, and spurious switching conditions]. // IEEE Trans. Power electron. – 2017. 64, – 9001–9011.

3 **Yang, F., Wang, L., Kong, H., Zhu, M., Liu, X., Lu, H., Qin, M., Zhang, T., Gan, Y., Jia, L.** Metod kompaktnoi komponovki silovogo modýla s dinamicheskimi harakteristikami 4H-SiC MOSFET i razrabotka silovogo elektronnoho preobrazovatelá pri chrezvychaino vysokoi temperaturé perehoda [Compact packaging method of power module with dynamic characteristics of 4H-SiC MOSFET and design of power electronic converter at extremely high junction temperature]. // IEEE Trans. Power electron. – 2023. 38. – 417–434.

4 **Arrosi, J., Retiansa, D.V., Duarte, J.L., Ilhan Karls, E., Huisman, H.** Vlianie mertvogo vremeni na púlsasú vhodnogo toka trehfaznogo invertora naprájenia [Effect of dead time on the input current ripple of a three-phase voltage inverter]. // Energy 2023. 16. – 688.

5 **Gelman, M .V.** Shemotehnika preobrazovatelei s vysokimi energeticheskimi pokazatelámi: ýchebnoe posobie [Circuit design of converters with high energy performance]: textbook / M. V. Gelman, M. M. Dudkin. – Chelyabinsk : SUSU Publishing Center, 2013. – 103 p.

6 **Kotb B. Tawfiq, Arafa S.** Mansýr jáne Piter serjant. [Úsh fazaly inverterlardyń matematikalyq dizainy jáne taldaýy: keń jolaqty jartylai ótkizgishterdiń ártúrli tehnologialary jáne DC-Link kondensatorlaryn tańdaý]. [Mansour and Peter Sergeant. Mathematical Design and Analysis of Three-Phase Inverters : Different Wide Bandgap Semiconductor Technologies and DC-Link Capacitor Selection]. Mathematics 2023, 11, 2137. <https://doi.org/10.3390/math11092137>.

7 **Tanaka, T., Wang, H., Blaabjerg, F.** Metod ýmenshenia púlsasú naprájenia na kondensatore zvena postoiannogo toka dlá modýlnogo mnogoýrovneвого kaskadnogo preobrazovatelá s odinochnymi iacheikami mosta tupa «treýgolnik» [A method for reducing voltage ripple on the DC link capacitor for a modular multi-level cascade converter with single delta bridge cells]. // IEEE Trans. Indian adj. – 2019. 55. – 6115–6126.

8 **Guo, J., Yeh, J., Emadi, A.** Analíz púlsasú toka i naprájenia v sepi postoiannogo toka s ýchetom obratnogo vosstanovlenia antiparallelnyh diodov v invertorah istochnika naprájenia [Analysis of current and voltage ripple in a DC circuit taking into account the reverse recovery of antiparallel diodes in voltage source inverters]. IEEE Trans. Power electron. – 2018. 33. P. 5171–5180

9 **Leon M. Tolbert, Thomas G. Habetler.** Jaña kópdeñgeili inverterly tasymaldaýshyga negizdelgen PWM ádisteri [Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Methods]. // IEEE IAS 1998 Annual Meeting, St. Louis, Missouri, October 10-15. – 1998, P. 1424-1431.

10 **Jang-Hwan Kim, Seung-Ki Sul, Prasad N.** Kóp deñgeili tórt aiaqty VSI úshin óntaýly aýysý rettiligi bar tasymaldaýshyga negizdelgen PWM ádisi [Enjeti. A Carrier-Based PWM Method with Optimal Switching Sequence for a Multi-level Four-leg VSI]. IAS 2005, P. 99-105

11 **Sokolovsky, G. G.** Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regýlrovaniem [AC electric drives with frequency regulation]. Textbook. Moscow : Academia, 2006 – 265 p

12 **German-Galkin, S. G., Kardonov, G. A.** Elektricheskie Mashiny. Laboratornye raboty na PK [Electric cars. Laboratory work on a PC]. St. Petersburg: Crown print, 2003. – 256 pp.

13 **Герман-Галкин, С. Г.** Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg: Corona-Vek, 2008 – 368 p.

14 **Josep Pou.** Úsh fazaly PWM kóp deñgeili túrlendirgishterdi modýlálalaý jáne basqarý [Modulation and Control of Three-phase PWM Multilevel Converters]. Technical University of Catalonia, 2004. – 205 p.

26.03.24 ж. баспаға түсті.

22.04.24 ж. түзетулерімен түсті.

02.06.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

*B. Ongar^{1,2}, Zh. K. Bekbolatova¹, A. R. Karasaeva², M. A. Turganbaev²,
Ye. Ye. Seitbek²

¹Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²Logistics of Zhane Kolik Academies, Republic of Kazakhstan, Almaty,

Received 26.03.24.

Received in revised form 22.04.24.

Accepted for publication 02.06.24.

MATHEMATICAL MODEL OF THREE-LEVEL VOLTAGE CONVERTER

This article deals with mathematical modeling of three-level voltage converter, active-inductive and inverter operation in a motor. The main purpose of the article is to create a mathematical description of three-level voltage. In addition, we consider the minimum DC capacitor, taking a detailed analysis of DC voltage and current ripple in three-phase inverters. As a novelty of the article, a space-vector algorithm was developed and mathematical modeling of the capacitors of the three-level pulse voltage converter that regulates the input voltage. For this purpose, three-level voltage converter, carrying out many calculations, we consider the limitations of the modulation frequency of the output voltage.

Despite the large number of semiconductor switches and the complexity of control, at high voltages and powers they show higher quality indicators of the output voltage. The advantage of such converters is that the voltage is divided between the switches and instead of choosing one switch for a high voltage, you can take several for a lower voltage, which can operate with a higher switching frequency.

To solve problems, methods of substitution of functions, methods of harmonic analysis, analytical methods of calculating static processes in electrical circuits, numerical methods of solving differential and integral equations were used. The reliability of obtained theoretical results and analytical relations was checked by calculations using MathCad and MATLAB packages

Keywords: Converter, inverter, capacitor, autonomous, pulse.

*Б. Онгар^{1,2}, Ж. К. Бекболатова¹, Ә. Р. Қарасаева², М. А. Турганбаев²,
Е. Е. Сеитбек²

¹Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;

²Академия логистики и транспорта, Республика Казахстан, г. Алматы,

Поступило в редакцию 26.03.24.

Поступило с исправлениями 22.04.24.

Принято в печать 02.06.24.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В статье рассмотрено математическое моделирование работы трехуровневого преобразователя напряжения, активно-индуктивного и инверторного в двигателе. Основная цель статьи – создание математического описания трехуровневого напряжения. Кроме того, мы рассмотрим минимальный конденсатор постоянного тока, проведя подробный анализ напряжения постоянного тока и пульсаций тока в трехфазных инверторах. В качестве новизны статьи разработан пространственно-векторный алгоритм и математическое моделирование конденсаторов трехуровневого импульсного преобразователя напряжения, регулирующего входное напряжение. Для этого в трехуровневом преобразователе напряжения, проведя множество расчетов, учтем ограничения частоты модуляции выходного напряжения.

Не смотря на большое количество полупроводниковых ключей, на сложность в управлении, при высоких напряжениях и мощностях они показывают более высокие показатели качества выходного напряжения. Плюс таких преобразователей в том, что между ключами происходит деление напряжения и вместо выбора одного ключа на высокое напряжение можно взять несколько на более низкое напряжение, которые могут работать с более высокой частотой коммутаций.

Для решения задач использовались методы замены функций, методы гармонического анализа, аналитические методы расчета

статических процессов в электрических цепях, численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. Достоверность полученных теоретических результатов и аналитических соотношений проверена расчетами с использованием пакетов MathCad и MATLAB.

Ключевые слова: Преобразователь, инвертор, конденсатор, автономный, импульсный.

Теруге 03.06.2024 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4248

Сдано в набор 03.06.2024 г. Подписано в печать 28.06.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4248

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz