

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Івахна Володимира Вікторовича

«Нереверсивні дволанкові перетворювачі постійної напруги з розділеною комутацією»

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Актуальність теми. DC/DC конвертори є поширеним класом напівпровідникових перетворювачів з широким колом застосування у різноманітних галузях народного господарства: сонячній та вітровій енергетиці, на електротранспорті та у побуті. Одним з підкласів DC/DC конверторів є оборотні трансформаторні перетворювачі. Їх структура включає первинну та вторинну ланки випрямлення-інвертування та ланку змінного струму між ними. Головним напрямом підвищення техніко-економічних показників цих перетворювачів є підвищення робочої частоти перетворення, завдяки чому виникає можливість зменшення маси габаритів трансформаторів, дроселів та конденсаторів. Для існуючого, на теперішній час, стану розвитку силових ключів, одним з шляхів підвищення робочої частоти є зменшення комутаційних втрат за допомогою застосування більш досконалих алгоритмів керування напівпровідниковими ключами.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню і розвитку відносно нової концепції оборотного трансформаторного перетворювача – дволанкового перетворювача з розділеною комутацією, який побудовано на базі двох неоднорідних ланок: ланки інвертора напруги та ланки інвертора струму. Спеціальний алгоритм синхронного керування ключами обох ланок забезпечує сприятливі умови комутації ключів. В результаті втрати у силових ключах наближаються до втрат у резонансних інверторах, але за відсутності коливального контуру. Зі сказаного вище дану роботу можна вважати актуальною.

Науково-дослідна робота за темою дисертації виконувалась відповідно до: пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки, згідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 № 2623-III; завдань

тематичного плану Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», наказу НТУ «ХПІ» №197 Од від 13.04.2016р. та наукової темі МОН України «Дослідження перетворювачів з розділеною комутацією» (ДР № 0118U002011), де автор був науковим керівником.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача; наведені данні про апробацію результатів роботи.

В першому розділі розглядаються відомі особливості процесів комутації силових напівпровідникових ключів. Зазначається, що в роботі розглянуті дволанкові перетворювачі з розділеною комутацією, з неоднорідними ланками. Одна з ланок є інвертором напруги, інша ланка є інвертором струму.

В результаті аналізу даних літератури, виявлено, що оборотні DC/DC конвертори з функцією м'якої комутації представлені, в основному, структурами з однорідними ланками на базі інвертора напруги з використанням MOSFET з технологією ZVS (вмикання при нульових напругах ключа) та ємнісного снаберного вимикання ключів. Суттєвою особливістю класичного інвертора струму є те, що зміна напрямку передачі енергії супроводжується зміною знаку вихідної постійної напруги, що не відповідає вимогам нереверсивності перетворювачів, які досліджуються. Ця особливість потребує окремого врахування. Відомі рішення нереверсивних перетворювачів з м'якою комутацією та з неоднорідними ланками мають підвищену кількість силових ключів в ланці інвертора струму.

В дисертації поставлені завдання розвитку методу розділеної комутації стосовно нереверсивних дволанкових трансформаторних перетворювачів постійної напруги, що дозволить вирішувати проблему покращення показників таких перетворювачів.

В другому розділі здійснюється розвиток методу розділеної комутації, спрямований на подолання ряду недоліків базової схеми та алгоритму, розробку

алгоритмів для забезпечення роботи в оберненому режимі перетворювача з розділеною комутацією із зменшенням циркуляції енергії.

Одним з недоліків перетворювача з розділеною комутацією, що працює згідно представленого алгоритму, є те, що при наявності кута регулювання має місце циркуляція енергії відповідної величини. Цього недоліку можна позбутися при модифікації алгоритму перемикання ключів у ланці інвертора струму.

В роботі отримані співвідношення для параметрів перетворювача в функції тривалостей інтервалів передачі енергії, холостого ходу та комутаційних.

В роботі досліджені деякі аспекти снаберного вимикання IGBT. Так, для вищезгаданого перетворювача, був експериментально встановлений факт, що збільшенням ємності снаберного конденсатора можна зменшити величину енергії втрат вимикання тільки до величини, приблизно вдвічі меншої відносно енергії втрат при безснаберному вимиканні. Ці дані збігаються з даними літератури; також відомо, що для більш високовольтових приладів питомі втрати вимикання вищі.

Для перетворювача з розділеною комутацією введено поняття «критичної» частоти. Якщо, при певній величині входної напруги перетворювача, яка вимагає задіяти у первинній ланці ключі на базі IGBT, в цій ланці використати інвертор напруги, то слід рахуватися з тим, що при використанні технологій ZVS вмикання та снаберного вимикання потужність сумарних втрат у силовому ключі інвертора напруги буде зростати при зростанні частоти перетворення. При використанні у первинній ланці інвертора струму та технології вимикання ключів при нулях струму (ZCS), і також нехтуванні втратами вмикання ключів, для ключа при тих самих умовах щодо напруг і струмів, будуть мати місце тільки статичні втрати у IGBT та послідовному діоді.

«Критичною» частотою вважається така частота, вище якої сумарні статичні та динамічні втрати у ключах інвертора напруги будуть перевищувати втрати у ключах інвертора струму.

В роботі також, на базі наведеної методики, була зроблена оцінка величини критичної частоти для перетворювача з розділеною комутацією на IGBT провідних виробників – Semikron, ABB, Westcode, Infineon, Mitsubishi. Це дозволяє, в залежності від величин напруг ланок, вибирати найбільш ефективну структуру

перетворювача. Також пропонуються та досліджуються ряд схем та алгоритмів перетворювачів з силовими ключами ланки інвертора струму на базі польових транзисторів.

В третьому розділі здійснюється розвиток методу розділеної комутації з метою забезпечення нереверсивності перетворювачів з одночасним збереженням їх оборотності. Пропонуються рішення з огляду на забезпечення їхньої ефективності, у тому числі з меншим числом силових модулів у ланці інвертора струму.

В роботі досліджено режим перетворювача з розділеною комутацією та послідовним чотириквadrантним ключем як при прямому напрямку передачі енергії (від ланки інвертора напруги до ланки інвертора струму), так і навпаки. Зазначається, що в цілому, ці процеси є дуальними, зі збереженням сприятливих умов комутації, але виявлені і певні відмінності, надані відповідні вирази та співвідношення.

В рамках подальшого розвитку методу та схемотехніки нереверсивних перетворювачів з розділеною комутацією, в роботі пропонуються та досліджуються схеми з асиметричною топологією ланки інвертора струму, які відрізняються меншим числом вентилів, які одночасно проводять струм, виконано аналіз процесів у режимі передачі енергії від ланки інвертора напруги до інвертора струму. Для ключів цієї ланки виявлений новий вид комутації – примусове ввімкнення з нульовою напругою. Результати підтвержені комп'ютерним та фізичним моделюванням.

В четвертому розділі розглядаються деякі аспекти практичного застосування перетворювача з розділеною комутацією. Відзначається важлива роль індуктивності розсіювання трансформатора, яка, насамперед, грає роль індуктивного снабера вмикання силових напівпровідникових ключів ланки інвертора струму, завдяки обмеженню швидкості зростання струму при вмиканні. Крім того, оскільки в ланці інвертора струму вмикання ключа супроводжується вимиканням діода у контурі комутації, швидкість спаду струму діода також обмежена, як і енергія, що може виділятися при зворотному відновленні діода. Для трансформатора з стрижневою (П-подібною) конструкцією осердя здобутий та верифікований вираз для обчислення величини індуктивності розсіювання.

Вказується, що однією з особливостей перетворювача з розділеною комутацією є те, що для малих значень струму навантаження величини цього струму може бути недостатньо для перезаряду снаберних конденсаторів за прийнятний проміжок часу, і недопущення втрати режиму ZVS потребує спеціальних рішень. Пропонуються та досліджуються (з наданням відповідних аналітичних співвідношень) алгоритми, які забезпечують існування сприятливого режиму комутації у широкому діапазоні струмів навантаження.

В роботі проведено фізичне моделювання такого перетворювача з розділеною комутацією на експериментальному прототипі номінальною потужністю 500 Вт за напівмостовою схемою ланки інвертора напруги та з асиметричною топологією ланки інвертора струму. Результати підтверджують теоретичні положення та демонструють високу ефективність.

Для системи тягового електроживлення залізниці постійного струму з буферними акумуляторними батареями пропонується використання у якості узгоджувача перетворювача підсилюючого пункту перетворювача з розділеною комутацією. Експериментальні дослідження показали, що встановлена потужність систем буферних акумуляторних батарей для компенсації втрат напруги повинна складати 0,5 – 1,5 МВт. Для перетворювача зі встановленою потужністю 660 кВт зроблені відповідні оцінки параметрів та показано, що масові показники системи дозволяють її розташування на борту потяга.

У загальних висновках дисертації автор викладає найважливіші наукові та практичні результати роботи, а також висловлює рекомендації щодо їх використання. В роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему розвитку методу розділеної комутації стосовно нереверсивних оборотних дволанкових перетворювачів постійної напруги з проміжною ланкою підвищеної частоти. Сукупність отриманих результатів склала наукову основу для побудови дволанкових оборотних нереверсивних перетворювачів на базі неоднорідних ланок, в яких для ключів обох ланок забезпечуються сприятливі умови комутації, що дозволяє суттєво підвищувати частоту перетворення за рахунок обмеження комутаційних втрат.

Основні результати досліджень та наукова новизна дисертації:

– одержав подальший розвиток метод розділеної комутації для дволанкових перетворювачів постійної напруги з проміжним узгоджувачим трансформатором підвищеної частоти, який відрізняється від існуючих конкретними способами синхронного керування силовими напівпровідниковими ключами обох ланок і забезпечує для оборотних дволанкових перетворювачів з неоднорідними ланками сприятливі умови комутації силових напівпровідникових ключів, що дозволяє, у свою чергу, підвищувати частоту перетворення та наблизити показники комутаційних втрат у силових комутаторах таких перетворювачів до показників резонансних перетворювачів при відсутності спеціальних силових резонансних ланцюгів;

– вперше науково та теоретично обґрунтовано поняття «критичної» частоти перетворення для перетворювача з розділеною комутацією на IGBT, що дозволяє обрати структуру перетворювача з розділеною комутацією з найменшими втратами у силових напівпровідникових ключах;

– вперше розроблено математичну модель для визначення величини «критичної» частоти, яка дозволяє виконувати аналіз параметрів IGBT-модулів різних граничних напруг та частотних властивостей провідних виробників для отримання величин цих частот при використанні відповідних приладів;

– для нереверсивного оборотного трансформаторного перетворювача з мостовою схемою ланки інвертора струму з 4-квADRантними ключами на базі зустрічно-послідовно з'єднаних MOSFET для обох напрямків передачі енергії отримані та проаналізовані діаграми процесів як при синхронному, так і незалежному керуванні транзисторами інвертора струму; встановлено, що синхронне керування потребує вдвічі меншого числа каналів управління ключами ланки, але потребує наявності датчиків нуля струму транзисторів;

– отримані найбільш ефективні схеми нереверсивних оборотних трансформаторних перетворювачів з алгоритмом розділеної комутації, що містять 4-квADRантні ключі на базі IGBT-модулів в ланці інвертора струму, із зменшеним, у порівнянні з традиційними топологіями, числа IGBT-модулів; для них проведено аналіз комутаційних процесів і підтверджено наявність сприятливих умов комутації; найбільш ефективною, з урахуванням вартісних показників, є схема перетворювача з

розділеною комутацією, у комутаторі ланки інвертора струму якої присутня мостова схема IGBT із зворотними діодами та 4-хквADRантний ключ, встановлений послідовно з обмоткою трансформатора, а також із асиметричною топологією ланки інвертора струму;

– для перетворювача з розділеною комутацією з асиметричною топологією інвертора струму виявлений новий вид комутації ключа ланки – примусове ввімкнення при нульовій напрузі, при якому має місце стрибкоподібне зростання струму ключа без істотних комутаційних втрат;

– розроблена математична модель, яка пов’язує величини електромагнітних навантажень та інших параметрів трансформатора з величиною індуктивності розсіяння, це дозволяє «керувати» її величиною, тобто змінювати величину напруги к.з. трансформатора для отримання бажаних характеристик оборотного трансформаторного перетворювача;

– досліджено вплив величини струму навантаження оборотного трансформаторного перетворювача із запропонованими алгоритмами на наявність сприятливих умов комутації: для режиму передачі енергії від ланки інвертора напруги до ланки інвертора струму визначені величини «критичних» струмів навантаження, менше яких режим ZVS вмикання транзисторів ланки інвертора напруги порушується; запропоновані модифікації алгоритму розділеної комутації, що забезпечують широкий діапазон зміни струму навантаження аж до холостого ходу зі збереженням сприятливих умов комутації;

– отримано аналітичні вирази для тривалостей неактивних комутаційних інтервалів для різних модифікацій перетворювача з алгоритмом розділеної комутації і визначені доцільні межі використання відповідних модифікацій алгоритмів.

4. Практичне значення результатів роботи полягає в розвитку методу, схем та алгоритмів керування силовими напівпровідниковими ключами та практичних рекомендацій щодо побудови нереверсивних оборотних трансформаторних перетворювачів з алгоритмом розділеної комутації, що дозволяють суттєво зменшити величину динамічних втрат ключів; щодо величин ємностей снаберних конденсаторів ланок інвертора напруги з IGBT, величини індуктивності розсіювання трансформатора.

Для оборотного трансформаторного перетворювача з алгоритмом розділеної комутації у складі підсилюючого пункту живлення системи тягового електропостачання залізниці постійного струму на основі акумуляторної батареї, дана оцінка доцільної частоти перетворення, типів силових приладів, параметрів трансформатора і характеристик акумуляторної батареї.

Результати роботи використовуються при розробці перетворювачів у фірмах Ubik Solutions OÜ та Mikromasch Eesti OÜ, Естонія, та в навчальному процесі кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” для студентів спеціалізації 171.01 – «Промислова електроніка»

5. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій базується на комплексному підході до виконаної роботи, забезпечується коректними припущеннями та постановкою завдань, застосуванням теорії електричних кіл, математичного та фізичного моделювання, підтверджується результатами впровадження розробок, опублікуванням результатів роботи та їх обговоренням на наукових конференціях.

6. Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 341 сторінок, з них: 124 ілюстрації по тексту, 14 таблиць по тексту, 3 додатків на 28 сторінках, 196 найменувань використаних джерел на 27 сторінках.

За темою дисертації дисертант має 30 публікацій, зокрема 10 публікацій у виданнях, що індексуються Scopus, 17 у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України (одна з цих входить до бази Scopus), 3 патенти України на винаходи, 1 додаткова праця. Опубліковані роботи у повній мірі висвітлюють основний зміст, результати, висновки і рекомендації дисертації/

7. Відповідність змісту автореферату та основних положень дисертації.

Автореферат повною мірою відображає зміст та основні положення дисертації.

8. Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації. В роботі не використовуються результати досліджень, представлених в кандидатській дисертації, окрім посилань в переліку джерел.

9. Оформлення дисертації. Дисертація та автореферат написано українською мовою. Стил ь викладення відповідає загальноприйнятому і має достатній науково-професійний рівень. Оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 (п.п. 9, 10, 12, 13) та ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

10. Зауваження по дисертаційній роботі та автореферату.

1. Мета і завдання досліджень, сформульовані у вступі, витікають з аналізу тексту роботи. Доцільно мету і завдання досліджень викласти у висновках до першого розділу.

2. Автором невдало сформульована назва третього розділу, що викликає запитання до суті методу РК, яка сформульована в основних висновках і науковій новизні.

3. Зміст розділів 2 і 3 перевантажені кількістю досліджуваних схем. Доцільно було б скоротити кількість схем за класифікацією їх за декількома критеріями. Наприклад, за величиною напруги, струму навантаження, алгоритмами перемикання ключів, тощо.

4. В тексті зустрічаються редакційні невідповідності термінів: «метод РК»/«принцип РК», «обернені»/«оборотні» перетворювачі. Назва третього розділу не повністю відповідає назві у розділі «Зміст».

5. З тексту незрозуміло, чи враховувалась при розрахунку параметрів трансформатора BESS величина випробувальної напруги (для $U_n=3,3\text{kV}$ $U_{\text{вип}}=15\text{kV}$), яка суттєво впливає на розмір, масу і індуктивність розсіювання.

6. В авторефераті при розгляді схеми рис.23 є посилання на діаграми рис.24, що відсутній в авторефераті.

Але наведені зауваження не знижують загальне позитивне враження від дисертаційної роботи. Дисертація Івахна В.В. «Нереверсивні дволанкові

перетворювачі постійної напруги з розділеною комутацією» є завершеною та самостійною науково-дослідницькою роботою, в якій вирішено важливу науково-прикладну проблему розвитку методу та принципів побудови дволанкових обернених нереверсивних перетворювачів постійної напруги з трансформаторною гальванічною розв'язкою.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року щодо докторських дисертацій та паспорту спеціальності 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії, а її автор Івахно Володимир Вікторович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук.

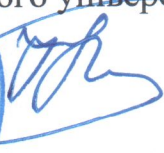
Офіційний опонент,
завідувач кафедри «Електричних та електронних апаратів»
Національного університету «Запорізька політехніка»
доктор технічних наук, професор

26.03.2021



П.Д. Андрієнко

Підпис проф. Андрієнка П.Д., засвідчую
Вчений секретар Національного університету «Запорізька політехніка»
канд. соц. наук, доцент

В.В. Кузьмін