

УДК 621.314.214

ОГЛЯД СТАНУ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ПОЛІПШЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИХ ВУЗЛАХ

В.А. Халіков, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Розглядаються із загальних позицій стан, перспективи та можливості поліпшення технічних засобів організації та управління переходними процесами при комутації у силових трансформаторно-ключових вузлах систем силової електроніки. Привертається увага до необхідності використання програмних засобів візуального імітаторського моделювання процесів, особливо щодо застосування програмного пакету MATLAB/Simulink. Пропонуються заходи по мінімізації чи позбавленню екстремальних проявів, що можуть супроводжувати комутаційні процеси. Бібл. 29.

Ключові слова: трансформатор, комутація, переходний процес, моделювання.

Сьогодні прогрес у більшості галузей сучасної техніки нерозривно пов'язаний із розвитком перетворюальної техніки, тобто силової промислової електроніки. Ми є свідками нарощання потреб та найширшого подальшого застосування різного роду перетворювачів та регуляторів електричної енергії. Тому, як ніколи, наявна необхідність у постійному вдосконаленні такої техніки, оптимізації її параметрів, техніко-економічних показників тощо, а основою майже кожного пристрою такого роду є композиційна структура – ключ/трансформатор (ТКС). Режими її роботи, в залежності від функціонального призначення, можуть бути як неперервні із досить високою частотою в порівнянні з періодичністю струму мережі живлення комутації ключа, так і відносно нечисленні аперіодичні дискретно-разові зміни стану структури, виконання яких здійснюється за необхідності. У ході цієї співпраці ключ виконує більш активну функцію, а трансформатор – більш пасивну. Оскільки йдеться про перетворення потужності, то цілком природно, що інтерес повинен спрямовуватися на аналіз саме ключового режиму роботи структури, як такого, що забезпечує найбільше значення коефіцієнта корисної дії.

Досить очевидно, що реалізація ключа в такого роду комутаційних вузлах також може бути різною – на основі транзисторів, тиристорів, механічних контактів, електромагнітних елементів, їхніх комбінацій і т.п. З точки зору розробника силовий ключ повинен мати, по можливості, ідеальні властивості, тобто він повинен при близькій до нуля потужності управління миттєво перемикати нескінченно великі струми, відсікати нескінченно великі напруги, мати нульові значення падіння напруги у замкненому стані та струму при розімкненому. Проте це може бути лише в уяві та у таких віртуальних задачах як, наприклад, моделювання схем перетворюальної техніки на комп'ютері. Реальність децьо інша, наприклад, динамічні характеристики згаданих компонентів знаходяться у зворотній залежності від значення рівня їхнього максимального струмового перевантаження. При частоті напруги промислової мережі 50 Гц кратність перевантаження тиристора протягом півперіоду складає 7...10 при його неповній керованості в цьому проміжку часу, а для транзистора, позбавленого цього недоліку, вона дорівнює лише 1. Динамічні характеристики та ресурс роботи електромеханічних контактів значно нижчі, проте можуть мати (в залежності від контактного тиску, конструкції і т.п.) кратність перевантаження для того ж проміжку часу – 100...400, і в цьому плані вони поза конкуренцією. Це власне і є однією із причин реалізації ключів у вигляді паралельного з'єднання двох компонентів: тиристор + транзистор, механічний контакт + тиристор тощо. Таким чином, тут ціною ускладнення, але все ж присутні намагання використати ті властивості відповідного комутуючого елемента, які є близчими до ідеальних. Електричні кола з ключами, наблизеними за своїми властивостями до іде-

альних, також простіші в організації керування ними і легше піддаються аналізу і моделюванню. Наприклад, значно простіше передбачити наслідки комутації польового транзистора в режимах, близьких до холостого ходу (ХХ), в порівнянні з роботою ключа, реалізованому на дроселі з підмагнічуванням. Для кіл змінного струму з навантаженням загального, тобто невизначеного, типу є характерним наявність струмових експесів (при використанні двигунів – пускових струмів, конденсаторів – зарядних струмів, трансформаторів – струмів намагнічування і т.п.), тому у випадках, коли дискретність системи регулювання пристрою значно нижча частоти струму мережі живлення, перевага надається тиристорним ключам і, як правило, із природною комутацією. Взагалі – це перший напівпровідниковий електронний компонент масового застосування, що надав можливість синхронізації комутації трансформатора в залежності від фази напруги, струму, потоку чи іншого вибраного параметра при досить прийнятних для кіл змінного струму параметрах та характеристиках допустимого для нього струмового перевантаження. Для захисту тиристора в аварійних режимах часто, і як правило, достатньо звичайного плавкого запобіжника. Разом із тим характер і хід процесів при повній керованості ключів комутаційного вузла – транзисторів, тиристорів із вузлами примусової (штучної) комутації – та одинично-разовий частоті перемикання є, як правило, окремими випадками електромагнітних процесів у ТКС при застосуванні ключів із природною комутацією.

Інколи для відносно нединамічних систем із досить великими допусками їхніх вихідних параметрів застосовується підвищена частота комутації ключів, тобто вона виконується один і більше разів у проміжку півперіоду струму мережі живлення, але це, як правило, не виправдано. Суттєвий виграваш спостерігається лише тоді, коли виникає необхідність за допомогою такої організації комутації реалізувати якісно інші можливості силового вузла регулювання, пов'язані із відповідним функціонуванням навантаження (спад напруги на навантаженні, його нарощання і т.п.). Таким чином, очевидно, що оскільки вимоги споживачів відносно струмів споживання, напруги, потужності, частоти та часу перемикання мають досить широкі діапазони, то не існує і не може бути якогось єдиного універсального типу ключа. Якщо ж мати на увазі лише напівпровідникові силові компоненти, то їхній сучасний стан досить детально висвітлено у довідниковых каталогах та іншій літературі [1, 2], а також у відповідних розділах інтернет-сайтів найбільш відомих виробників такого роду продукції, і розглядати їх, в першу чергу, необхідно в ракурсі забезпечення ними ключового режиму роботи. Еволюція якісного розвитку та поширення напівпровідникових ключів має піввікову історію, але все ж продовжується тенденція до поліпшення їхніх параметрів та характеристик шляхом освоєння нових технологій, впровадження елементів керування в структуру ключа і т.п. Поведінка таких ключів досить детально може бути проаналізована за допомогою того чи іншого комп'ютерного програмного пакету при використанні відповідних їм базових чи вдосконалених бібліотечних моделей [3], залишаючи при цьому далеко позаду щодо достовірності будь-які інші аналітичні, а інколи і фізичні методи дослідження. Найбільшим ступенем деталізації параметрів та характеристик напівпровідникових компонентів вигідно вирізняється програма OrCAD, в якій використовуються PSpice-моделі. При цьому виробники, зацікавлені в застосуванні своїх нових розробок, часто надають моделі відповідних компонентів, орієнтованих на використання саме в цьому пакеті візуального імітаційного моделювання.

Трансформатор має значно довшу історію еволюції, він не має такого різноманіття принципів роботи щодо ключів, а за свою форму якісно змінився лише один раз – при переході від розімкненого типу осердя до замкненого із шихтованим магнітопроводом (блізько 1884 р.). Його широке застосування в силових пристроях витікає з необхідності узгодження номінальних параметрів мережі живлення і навантаження. В своїй історії вдосконалення трансформатора в основному стосувалося підвищення ефективності його роботи на промислових частотах за рахунок нових технологій виготовлення електротехнічних сталей із більшими значеннями індукції насичення та меншими втратами при перемагнічуванні. При роботі в діапазоні підвищених частот (10...100 кГц) ефективна робота трансформатора досягається шляхом використання у магнітопроводах феромагнетиків. Проте у порівнянні із напівпровідниковими компонентами до недавнього часу рівень розробки адекватних моделей трансформаторів не відповідав ні реальностям, ні потребам. Адже трансформатори не тільки мають достатньо великі розходження параметрів і характеристик, але і рівень їхнього тиражування, в порівнянні із ключовими елементами, значно менший і має індивідуальний характер. Тому відповідні математичні моделі розроблялися спеціалістами силової перетворювальної техніки та електротехніки [4]. Проте їхня робота в частині математизації процесів обмежувалася стінами лабораторій, оприлюднені результати можливо було перевірити лише шляхом фізичної реалізації, оскільки не було по-

тужного, доступного всім та достатньо відкритого по своїй структурі програмного пакету із розробленими комп'ютерними реалізаціями числових методів вирішення диференціальних рівнянь.

При аналізі електромагнітних процесів силового вузла з трансформатором можливі два шляхи. Перший із них базується на припущення, що індуктивності обмоток трансформатора є лінійними, або ж стан магнітної системи взагалі не враховувався, а другий – на тій чи іншій апроксимації кривої намагнічування його магнітопроводу. Лінійна теорія застосовується на всіх етапах розрахунку маси, габаритів, співвідношення витків і т.п., вона адекватно відображає стаціонарні режими (включаючи режим номінального навантаження) трансформатора і при цьому дозволяє одержати принципові характеристики процесу регулювання для силового вузла у складі системи. У найпростішому випадку реалізація другого шляху передбачає прямокутно-ступінчасту апроксимацію кривої намагнічування [5], коли центральна частина кривої приймається вертикально і співпадаючою з віссю ординат, а її відрізки, відповідні насиченню стану магнітопроводу, є горизонтальними і паралельними осі абсцис. На такому ж припущення базуються і основи теорії розрахунку магнітних підсилювачів [6], завдяки чому спрощуються і стають більш доступними для сприйняття аналітичні вирази, що описують роботу подібного електромагнітного елемента. Часто для наочності вертикальну частину фігури апроксимації відхиляють від осі ординат таким чином, щоб її проекція на вісь абсцис відповідала значенню струму холостого ходу трансформатора [7]. В даному разі при дослідженні динамічних процесів комутації у ТКС можна виявити умови, при недотриманні яких у відповідних колах будуть виникати екстремальні прояви із значним перевищеннем номінальних режимів.

Проте сьогодні, застосовуючи комп'ютерні методи обчислень, можна користуватися більш точними аналітичними або кусочно-лінійними апроксимаціями кривої, враховувати відповідним чином потоки розсіювання та електричні втрати у обмотках, тобто одержувати цілком пристойну і прийнятну для практики модель трансформатора, що дозволяла б із високою точністю описувати переходні, нестационарні та аварійні режими у ТКС. Аналітично це виглядає як система відповідних рівнянь [8], але більш наочно і практичніше, коли таку модель транслювати у формі структурної схеми в середовищі програмного пакету MatLab Simulink [8]. Разом із тим, такого роду модель є швидше наочно-учбовою ілюстрацією роботи трансформатора, оскільки при варіаціях того чи іншого параметра необхідно вносити зміни одразу в декілька компонентів даної структури моделі. Цей процес легко автоматизується і тому останнім часом у рамках того ж програмного пакету розроблені і доступні для використання більш якісні і адекватні моделі трансформаторів, що надають можливість опціонально змінювати значення типових параметрів (задаються в абсолютних та відносних значеннях) в рамках одного і того ж графічного інтерфейсу. Вони дозволяють виявити не тільки ефекти, пов'язані із насиченням магнітопроводу, а і, наприклад, з явищем гістерезису в ньому і т.п. Проте використання спрощених апроксимацій [9, 10] необхідно, адже лише за їхньою допомогою, застосовуючи алгебраїчні чи геометричні способи перевірки, можна кількісно оцінити ступінь достовірності комп'ютерної моделі. Таким чином, значно більша ступінь неідеальності трансформатора, в порівнянні із напівпровідниковим ключем, була перепеною на шляху повноцінного аналізу процесів із використанням транзистора. Викладене не означає, що проблема адекватного відображення процесів комутації повністю вирішена, адже моделі розроблено для більш-менш типових реалізацій трансформаторів. Сьогодні ще застосовуються трансформатори із перерозподілом напруг за принципом витіснення потоку в магнітопроводі за рахунок підмагнічування [5], для них характерна більш складна конфігурація і конструкція осердя і природно, що вони ніяк не можуть підпадати даному аналізу і т.п. Але в цілому вже сформовано базу, використання якої дає можливості якісного повноцінного аналізу комутаційних процесів для більшості конфігурацій ТКС. Є досить великий вибір систем моделювання, проте при аналізі схем із трансформаторами, в яких враховувалися б ефекти насичення магнітопроводу та гістерезису, лідером став неспеціалізований універсальний математичний програмний пакет MATLAB із додатком візуального моделювання Simulink. Вже потім, коли він показав свою ефективність, на наступних етапах свого розвитку пакет дістав інші доповнення спеціалізованого призначення, включаючи і розділ силової електроніки SimPowerSystems із типовими моделями поширеніх типів ключів та схем комутаторів. В першу чергу, це було досягнуто завдяки вбудованим у його структуру матричним алгоритмам обчислень, що як ніякі інші підходять для моделювання складних систем, а також відкритості архітектури програми і можливості через це участі у її вдосконаленні сторонніх зацікавлених осіб.

Зараз детально розроблено методологію дослідження ТКС [9, 11, 12], що дає можливість (разом із поширенням викладання основ курсу імітаційного візуального моделювання в вищих училищах) більш осмисленого підходу до згаданих задач.

Досвід розробки та експлуатації силових пристрій показує, що, з точки зору забезпечення їхньої надійності, розрахункам, аналізу, експериментальним дослідженням умов роботи компонентів у комутаційних вузлах необхідно приділяти порівняно більше уваги, ніж енергетичним показникам, зовнішнім характеристикам і пов'язаних із ними електромагнітним процесам, адже цим, в першу чергу, гарантується функціонування системи в цілому [13]. Проте така установка при розробці нової технології часто ігнорується, а, можливо, недооцінюється. Для трансформатора, якщо навіть не зважати на вплив навантаження, найбільш критичними є комутаційні моменти його включення через виникнення сплесків струму намагнічування та виключення – через сплески ЕРС самоіндукції. Як перші, так і другі можуть значно перевищувати його номінальні режими роботи. Разом із тим вказується, що із-за короткочасності вони не представляють небезпеки для обмоток, необхідно лише враховувати дані ефекти при регулюванні релейного захисту і т.п. [14]. В одиничному випадку з цим можна примиритися, проте, при частому виконанні комутацій [13] ігнорувати дані процеси недопустимо. Інколи очевидними є випадки простого включення трансформатора, яке виконується завжди при одних і тих самих нульових початкових умовах, коли для раціональної реалізації комутації достатньо знання елементарної теорії електричних машин і немає необхідності застосовувати будь-який апарат аналізу.

Таким прикладом є напівавтоматичні установки дугового зварювання в середовищі інертних або активних газів, які за своїм поширенням і застосуванням займають друге місце після установок з режимом ручного зварювання [15]. У них основу джерела струму найчастіше виконує знижувальний трансформатор, що працює на частоті струму мережі живлення, вторинна обмотка якого навантажена на випрямляч. Режим його роботи – короткочасно-повторний, але особливістю є те, що його відключення (виходячи із технологічних особливостей) завжди відбувається в режимі ХХ. При цьому є два варіанти включення джерела струму. Один із них – це введення у склад випрямляча тиристорів, і тоді комутація відбувається за рахунок подачі напруги на їхні управлюючі електроди. Така реалізація має дві суттєві вади – це порівняно висока кошторисна вартість відносно потужних тиристорів та значна кількість теплоти, що виділяється на них. Другий варіант передбачає використання звичайного магнітного контактора. Ним комутують первинну обмотку трансформатора, струм якої в декілька разів менший за струм дуги, проте при цьому завжди буде великою імовірністю виникнення характерних сплесків струму (5...7-кратних у порівнянні із номінальним струмом) намагнічування трансформатора в момент його включення. Разом із тим, відмова від механічного комутатора і використання замість нього пари зустрічно-паралельно включених тиристорів або одного тріака може бути ефективною не тільки в технічному, а і в ціновому плані. Адже через природне закриття тиристора при спаді струму ХХ, що носить індуктивний характер, початкові умови до наступного включення трансформатора завжди однакові – нульові. В той же час відомо, що комутація однофазного трансформатора при нульовому залишковому магнітному потоці в його осерді завжди буде проходити без перехідного режиму при його підключення до мережі живлення в амплітуді її синусоїdalnoї напруги [14]. Тобто необхідна лише синхронізація моменту включення трансформатора джерела струму дуги до середини півперіоду напруги. В такому випадку для установок, в яких зварювання проводиться із застосуванням вуглексилого газу та електродів 0,5...2,0 мм (пристрої найбільш масового поширення і використання), вже можливе використання як силових комутаційних пристрій тріаків і тиристорів відповідно на 40 А, 50 А (BTA40, BTW67 – “STMicroelectronics”) дешевої вартісної групи. Цей наочний приклад перегляду традиційних принципів комутації в силових вузлах знаходить практичне і вигідне з економічної точки зору застосування. Дійсно, вже декілька років автономні установки напівавтоматичного зварювання серії ПДГУ-125... ПДГУ-150, (НВП “Плазма”, м. Ростов-на-Дону) виконуються саме із таким комутатором. Кінцевий результат – економія електроенергії, кращі електромагнітна сумісність та надійність установки за рахунок зменшення електромеханічних напружень в обмотках, викликаних комутаційними струмами, та їхнього температурного режиму при меншій загальній вартості. Кількість виготовлених зразків (на кінець 2011 р. значно перевищила 10 тис. шт.) була цілком достатньою для відповідних висновків та апробації як у ціновому, так і технічному плані.

Але частіше трансформатор при його відключення не проходить через режим ХХ, стан його магнітопроводу на цей момент не буде таким однозначним і тому наступне його включення необхідно виконувати із врахуванням цього аспекту [9, 16, 17]. Із ростом потужностей трансформаторів зменшується значення їхнього імпедансу і тому просто ігнорувати ефект появи сплесків струму на-

магнічування при комутаціях стає часто неможливим. Саме через це на тому чи іншому рівні усвідомлення ходу процесів завжди розроблялися пристрой та алгоритми виконання комутацій, що необхідним чином зменшували б вплив даних ефектів [9, 17]. За принципом реалізації всі вони розподіляються на два класи – із жорстким вибором кута включення відносно кривої вхідної напруги (як у наведеному прикладі) та адаптивним (залежним від характеру навантаження та форми напруги). Однозначний кут включення вибирається в тих випадках, коли незалежно від навантаження магнітопровід трансформатора при його відключені залишається у стані із значенням потоку, близьким до нульового (режими індуктивного навантаження та ХХ, реалізації примусового обнулення величини потоку) або ж при будь-якому іншому остаточному значенні потоку (він у подальшому має тенденцію до експоненціального спаду своєї величини) – коли кожне наступне включення буде провадитися хоча б із інтервалом у декілька секунд. Тривалість такого інтервалу повинна бути достатньою для спаду величини потоку до межі у 10...15% від його амплітудної номінальної величини. При подвійному запасі за індукцією насичення магнітопроводу (тобто і при відповідно збільшенні його маси) трансформатор можна одноразово включити без сплесків струму намагнічування при будь-якому фазовому куті, проте це не гарантує такого ж ефекту при подальших комутаціях і внаслідок можливості появи у потоці експоненціальної складової. Системи із адаптивним вибором кута включення в тій чи іншій мірі враховують попередній стан (після відключення трансформатора) і спрямовані на досягнення більшого динамізму системи в цілому. Як правило, в них реалізуються різного роду алгоритми обчислення вольт-секундних площ прикладених напруг і т.п. Відносно недавно були сформульовані загальні принципи виконання комутації трансформатора одним ключем [9, 10] та показані в середовищі MATLAB приклади реалізації організації комутації, що запобігають виникненню сплесків струму намагнічування незалежно від її періодичності. Таким чином, підсумовуючи викладене, необхідно відзначити, що за мінімально можливих габаритів трансформатора при комутації його первинної обмотки для уникнення сплесків струму, пов'язаних із насиченням магнітопроводу, необхідно керуватися правилом, відповідно до якого *включення ключа повинно виконуватися в момент рівності миттєвих величин поточного магнітного потоку осердя із його усталеним значенням, яке повинно було б бути в ньому після комутації*. В його основі лежить принцип електромагнітної інерції, відповідно до якого наявна тенденція до збереження незмінними магнітних потоків, тобто комутація повинна відбуватися таким чином, щоб перехід від одного стану (відсутності напруги на первинній обмотці) трансформатора до іншого (підключення напруги) не призводив до такої зміни величини потоку, при якій би він у подальшому перевищував задані заздалегідь для нього межі, що кореспонduються із горизонтальними відрізками спрошеного апроксимації кривої намагнічування.

Коли йдеться про ще більш великі потужності навантаження, а це – різного роду електролізні ванни, електротермічні та плавильні печі, установки плазмової різки металів та зварювання, електропривод і т.п., то цілком природним є намагання перерозподіляти струм навантаження симетрично по всіх фазах мережі живлення. Коли виникає необхідність відповідного узгодження режимів напруг на навантаженні та у мережі живлення, то стає неминучим використання трифазних трансформаторів (ТФТ). Природно, що при такому навантаженні і незначних величинах внутрішніх опорів ТФТ переходні процеси при їхньому включенні в порівнянні із однофазними трансформаторами, як правило, мають значно більшу амплітуду і відповідно більш екстремальний характер. Тому і більша імовірність їхнього переростання у аварійні режими ТКС, а наслідки, які виникають після цього, в ціновому плані більш тяжкі. При розгляді процесів у ТФТ, як правило, підкреслюється, що при їхньому включенні завжди необхідно очікувати сплески струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент включення все ж буде близькою до нуля [14], тобто умови для включення обмотки трансформатора на цю фазу будуть несприятливі. Проте і ця проблема, як і у випадку включення однофазного трансформатора, також вирішувалася тим чи іншим чином [13, 18]. Звичайно для коректної організації комутації з метою запобігання сплесків струмів намагнічування необхідно застосовувати відповідний апарат аналізу [13, 19]. Причиною є більш складна конфігурація магнітопроводу, варіативність схем з'єднання обмоток, несиметричність фаз і т.п. Задача вирішувалася у відповідності до теоретичного опрацювання даної проблеми та практичної доцільності [13]. За принципом реалізації алгоритмів комутації тут також присутня аналогія із включенням однофазного трансформатора, проте ускладнена тим, що комутуючих елементів – ключів повинно бути не менше двох. Раціональні алгоритми автоматичного управління тиристорними ключами, як правило, базуються на принципах вимірювання вольт-секундних площ лінійних або фазних напруг трансформатора і мережі живлення та їхнього відповідного співставлення. Але представити їх у наочному і зрозумілому вигля-

ді було неможливо через відсутність достатньо простого доступного математичного апарату моделювання нелінійних систем. Отже, опис алгоритмів мав словесний характер, при цьому він лише частково ілюструвався математичними виразами і був спрямований на схемотехнічне, евристичне їхнє сприйняття. Проте раціональні алгоритми комутації ТФТ повинні базуватися, як і при підключені однофазного трансформатора, на згадуваному принципі електромагнітної інерції, осмислення якого де-що складніше. Тому застосування аналітичного апарату Simulink MATLAB стає не тільки віправданим, а і незамінним.

Проте більшість ТКС суміщають функції не тільки простого включення–відключення трансформатора, а і більш складного регулювання. На початкових етапах розвитку цієї проблеми розглядалася ступінчаста зміна (регулювання) за допомогою механічних перемикачів, величини коефіцієнта трансформації без зняття навантаження (РПН) [20]. Для цього у найпростішому випадку комутації однофазного трансформатора треба задіяти хоча б два ключі, а одна із його обмоток, як правило, повинна мати бодай один додатковий відвід [8, 21]. При цьому алгоритм організації комутації розгалужується на дві окремі гілки. Перша із них пов'язана із необхідністю створення умов прийнятності комутації ключів (тобто забезпечення неаварійності величин струмів у короткозамкненому контурі, що включає обидва ключі та обмотку трансформатора) в переходному режимі при перенаправленні струму навантаження із одного ключа на інший. Другою – зазначене недопущення (під час такої операції, а також і внаслідок неї) насичення магнітної системи трансформатора для його уabezпечення від дії екстремальних струмів намагнічування. Таким чином, при організації комутації необхідно одночасно сумістити процедури, що диктуються цими двома умовами, і, в той же час, не залишати поза увагою можливі наслідки реакції навантаження при проведенні відповідних дій. Сприйняття і дотримання першої умови комутації, пов'язаної із порядком комутації ключів, досить очевидне і тому найбільш опрацьоване. При цьому намагаються уникати одночасності закритого стану ключів, щоб не порушувати умови енергообміну між мережею живлення і навантаженням, та запобігти виникненню сплесків ЕРС самоіндукції. Тому при механічному перемиканні виводів обмоток, через інерційні властивості контактів основними елементами, що обмежують струм КЗ під час комутації, є демпферні реактори та резистори [20], які зменшують і вплив струмів, пов'язаних із насиченням магнітної системи трансформатора. Це ж стосується і роботи реакторів: фактично неможливо наперед передбачити стан їхньої магнітної системи в процесі комутації, тобто їхні можливості щодо пригнічення початкового сплеску екстремальних струмів. Щоб уникнути вказаного стану, необхідно надавати перевагу таким ключам та розробці їхніх алгоритмів функціонування, які могли б забезпечувати не тільки бездугову комутацію, а і прийнятні та передбачувані умови роботи обмоткових компонентів ТКС.

Правила комутації ключів формулюються у вигляді декількох принципів. Наприклад, для тиристорних ключів у випадку одночасної (на обох) зміни стану управлюючого сигналу на протилежний: а) подачу управлюючих імпульсів на ключі “нижчого” відводу необхідно виконувати при однаковій полярності комутаційних струму та напруги; б) подачу управлюючих імпульсів на ключі “вищого” відводу необхідно синхронізувати із моментом переходу струму через нуль [24]. Можна навести й інші подібні за суттю та формулою варіанти алгоритмів [5, 8]. Очевидно, що дані формулювання прямо кореспонduються на конкретику конфігурації схеми при візуальній відносності понять “нижчий” та “вищий”, в той час, як співставлені їм алгоритми (а, б) є суттєво різними. Таким чином, до недавнього часу так і не було сформульовано дані принципи комутації безвідносно до зображення схеми ТКС. У загальному випадку практика їхньої реалізації також показує не зовсім прийнятні результати: “Експериментальна перевірка показала, що динамічні режими виконуються безаварійно, кратність сплесків струму короткого замикання (КЗ) не перевищує 3,0 від номінального значення, а форма струму, що протікає через тиристорний ключ, який повинен закриватися, – типова” [25]. Але, як взагалі, так і для даного прикладу генерація сплесків КЗ по причині виконання комутації небажана, хоча вони і проявляються у вхідному струмі в дещо зменшенному на відповідний коефіцієнт трансформації вигляді. Звичайно, проблему необхідно вирішувати, але комплексно, не тільки за рахунок модифікації алгоритмів комутації, а і власне інших варіантів реалізації силового вузла на основі ТКС. Коли комутація в підсумку призводить до значної зміни величини потоку в осерді трансформатора, то при загальному типі навантаження уникнути виникнення сплесків струмів намагнічування та КЗ досить важко. Проблема вирішується за допомогою використання ТКС на основі вольтододавчих трансформаторів (ВДТ) із застосуванням комутації їхньої первинної обмотки [22]. У такому випадку при повністю відключений первинній обмотці ВДТ енергообмін буде виконуватися через його вторинну обмотку в її дросельному

режимі включення. Викладене стосується не тільки комутації трансформаторів, оскільки, як правило, іде пряма паралель із процесами в реакторах, демпферних дроселях і т.п. [23].

Розвиток програмних пакетів моделювання електротехнічних систем дозволив з нових позицій детально проаналізувати дані аспекти проблеми [21, 26] і сформулювати принципи безпечної комутації для тиристорних ключів наступним чином – *комутація з метою підвищення вихідної напруги повинна відбуватися за умови однополярності струму та напруги, а комутація, направлена на зниження вихідної напруги, повинна організовуватися в моменти їхньої різнополярності.* Тобто незалежно від місця підключення тиристорів (до відводів первинної обмотки, чи вторинної), конфігурації ТКС, схеми і т.п. для вибору правильного алгоритму виконання комутації необхідно зважати лише на направленість зміни вихідної напруги ТКС (її підвищення чи зниження). Разом із тим показано, що перемикання, направлене на зниження вихідної напруги, через необхідність додержання умови різнополярності струму та напруги, є схильним до зривів безпечної комутації при підключеннях навантаження ємнісного характеру. Причиною цього є сплески зарядного струму, співпадаючі за полярністю із напругою, що можуть припадати на моменти комутації [26]. У такому випадку не будуть витримуватися сформульовані умови безпечної, тобто безаварійної комутації тиристорних ключів.

Часто схема силового вузла має більш складну форму у вигляді об'єднання декількох ТКС, які функціонально відрізняються якісним або кількісним характером функціонування (ланки глибокого і точного регулювання, дискретно-разової і імпульсно-фазової комутації і т.п.). На першому етапі для полегшення аналізу такий вузол може умовно розділятися відповідно до цих функціональних ознак. Трансформатори можуть бути або окремими, тобто функціонально виділеними для кожної структури, або суміщеними, тобто спільними для декількох ТКС. Щоб одержати більш однозначний і передбачуваний результат ходу процесу комутації при регулюванні, необхідно розносити в часі і відповідним чином синхронізувати зміни стану ТКС в таких силових вузлах. Природно, що при реалізації комутації в окремо взятій структурі необхідна відповідна синхронність (узгодженість), спрямована на дотримання згаданих умов безпечної комутації для ключів і окремо – для трансформатора. Також зрозуміло, що існує прямий зв'язок між системою організації комутації та власне системою регулювання, коли виконується обробка значення вихідної величини (напруги, струму, температури і т.п.), її порівняння із бажаним опорним значенням, виділення відповідного сигналу узгодження та наступна його трансляція через канал управління станом ТКС і т.ін. [27]. Наприклад, у малоінерційних стабілізаторах змінної напруги при дискретно-разовому принципі його функціонування необхідно виключати інтервал часу, що припадає на комутаційний процес, із загального проміжку часу виділення сигналу відхилення через його неадекватність новому стаціонарному стану системи. Тобто існує окрема проблема аналізу, синтезу та реформації систем організації комутації, але не треба забувати, що вони функціонують не завжди окремо, а значно частіше у складі систем більш загального призначення.

Прикладів ілюстрацій необхідності поглиблених підходів до мінімізації впливів комутаційних процесів більш ніж достатньо. Це не тільки практика відносно малопотужних (до 10 кВА на фазу) пристрій, а і досить енергосмінних. Наприклад, на Стахановському заводі феросплавів в процесі роботи електропічних трансформаторів ЕОЦНК-21000/10 (9 000 кВА) із пристроями регулювання напруги під навантаженням РНО-20Ф-625/35 відзначався низький ресурс механічних комутаційних компонентів, причому частка пошкоджень систем електроживлення по цій причині складала близько 70% від загальної їхньої кількості. Застосування комбінованих механіко-тиристорних комутаторів навіть при жорстко заданих кутах включення дозволило на порядок збільшити ресурс роботи контактів за окупності затрат протягом 1,5 року [23]. Іншим прикладом можуть бути фазоповоротні пристрої, якими виконується управління відбором потужності від лінії електропередачі. Для цього використовуються вольтододавчі трансформатори, вектор напруги первинної обмотки яких направлений під кутом до фазної напруги відповідної лінії електропередачі, а функція регулювання реалізується на комутації відводів трансформатора механічними перемикачами. Перспективним, з точки зору динаміки роботи, є застосування в такого роду ТКС тиристорних комутаторів [28, 29], проте гальмом на цьому шляху стає нерозробленість теорії комутації вольтододавчих трансформаторів.

Підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати, що реалізація згаданих принципів дозволяє у більшості випадків повністю використати електроенергетичні ресурси трансформаторів та комутаційних елементів, уникнути різного роду ексцесів через появу аперіодичних складових у струмі споживання, поліпшити динаміку системи регулювання. Для з'ясування повної картини процесів і структури системи організації комутації в ТКС, як правило, раціонально використовувати апарат комп'ютерного моделювання MATLAB/Simulink, оскільки інші програмні пакети більш орієнтовані

на детальний аналіз роботи напівпровідникових компонентів та їхню схемотехніку. Результати моделювання комутаційних процесів та способи раціональної організації управління комутацією пройшли відповідну схемотехнічну апробацію і показали реальність унеможливлення в процесі регулювання напруги за допомогою ТКС небажаних перехідних експресів, незалежно від величини навантаження, його характеру, кратності перевантаження і т.п. та перспективність подальшого поглиблення даного технічного напрямку. Таким чином, основним напрямком поліпшення систем організації комутації і протікання комутаційних процесів в цілому є не так розвиток сучасної елементної бази компонентів ТКС, а якнайширше використання сучасних комп'ютерних програмних пакетів візуального імітаційного моделювання, їхня популяризація та належне освоєння; осмислення на цій основі характеру перехідних процесів при комутаціях, вплив на них нелінійних властивостей не тільки ключових елементів, а і в обов'язковому порядку – трансформаторів. Необхідна подальша розробка та синтез таких систем організації комутації, що не тільки забезпечували б умови недопущення КЗ в комутаційних контурах (це часто більш менш ясно), а і насичення магнітопроводів трансформаторів, яке не завжди очевидно. Власне це вже стає характерним для даного етапу розвитку силової електроніки.

- 1.** Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Изд. Дом Додэка-ХХI, 2001. – 384 с.
- 2.** Полуянович Н.К. Силовая электроника: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТГРТУ, 2005. – 204 с.
- 3.** Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю. Уточненная модель тиристора для моделирования вентильных преобразователей в MATLAB 7 // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №1. – С. 37–41.
- 4.** Богрый В.С., Русских А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. – М.: Энергия, 1972. – 184 с.
- 5.** Окунь С.С., Сергеенков Б.Н., Киселев В.М. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
- 6.** Сторм Г.Ф. Магнитные усилители. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1957. – 568 с.
- 7.** Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
- 8.** Алтунин Б.Ю., Блинов И.В., Кралин А.А., Панкова Н.Г. Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики Matlab Simulink. – Н. Новгород, НГТУ, 2005. – 102 с.
- 9.** Халіков В.А., Можаровський А.Г. Методологія застосування програмного пакета MATLAB при моделюванні та дослідженні електромагнітних процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах: Навчальний посібник. – Київ, ІЕД НАН України, 2001. – 45 с.
- 10.** Халіков В.А., Липківський К.О. Процеси та організація комутації трансформаторів // Техн. електродинаміка. – 2010. – №3. – С. 22–30.
- 11.** Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – Питер, 2008. – 288 с.
- 12.** Кирик В.В., Халіков В.А. Комп'ютерні технології моделювання та дослідження електротехнічних систем. – Київ, ІЕД НАН України, АМУ МОН України, 2009. – 216 с.
- 13.** Боос В.Я. Исследование и разработка регуляторов переменного напряжения с тиристорными ключами на первичной стороне трансформатора. Автореф. дис. к.т.н. – Томск: 1979. – 21 с.
- 14.** Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
- 15.** Халіков В.А., Можаровський А.Г., Шатан О.Ф., Паханьян В.М. Контролери установок електродугового зварювання в середовищі захисних газів // Техн. електродинаміка. – 2008. – №5. – С. 68–75.
- 16.** Чиженко И.М., Выдолоб Ю.Ф., Грудская В.П. Намагничивание трансформатора при включении встречно-параллельных тиристоров на его первичной стороне // Вестник КПИ. – 1974. – Вып. II. – С. 12–16.
- 17.** Гельман М.В., Лохов С.П., Боос В.Я. Тиристорный контактор для работы на первичной стороне однофазного трансформатора с нелинейной нагрузкой // Труды Челябинск. политехн. ин-та, 1976. – Вып. №176. – С. 70–74.
- 18.** Туманов И.М., Алтунин Б.Ю. Тиристорные и тиристорно-контактные установки для стабилизации и регулирования параметров электроэнергии. – Н. Новгород: НГТУ, 1993. – 223 с.
- 19.** Туманов И.М., Бычков Е.В. Расчет преобразовательных устройств на ПЭВМ в стационарных и переходных режимах работы с использованием матрично-топологических методов. – Н. Новгород: НГТУ, 1993. – 111 с.
- 20.** Порудоминский В.В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.
- 21.** Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Фазове регулювання напруги ключами із природною комутацією та її дослідження в системі MATLAB // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2002. – Ч. 2. – С. 72–79.

- 22.** Халиков В.А., Можаровский А.Г. Коммутация вольтодобавочного трансформатора без переходного режима в его первичной обмотке // Техн. электродинамика. – 1995. – №6. – С. 17–20.
- 23.** Кухарев А.Л., Кохан П.Г., Недвига Л.А. Коммутационные процессы в реакторных устройствах РПН электропечных трансформаторов // Техн. електродинаміка. – 2006. – №5. – С. 38–43.
- 24.** Озерянский А.А., Гординский И.М. Управление тиристорным преобразователем дискретного действия как средство улучшения его основных характеристик // Оптимизация преобразователей электромагнитной энергии. – Киев: Наукова думка, 1976. – С. 134–142.
- 25.** Ваганов С.А. Трансформаторно-тиристорный модуль с микропроцессорной системой управления для улучшения качества электроэнергии цеховых сетей. Автореф. дис. к.т.н. – Н. Новгород, 2006. – 21 с.
- 26.** Халиков В.А., Можаровський А.Г. Природна комутація ключів при фазовому регулюванні напруги та імпульсному характері навантаження, її дослідження в системі MATLAB // Техн. електродинаміка. – 2003. – №6. – С. 30–35.
- 27.** Халиков В.А., Можаровський А.Г. Вплив моменту зміни управлюючої величини на параметри системи регулювання змінної напруги // Теорія та моделі пристрій вимірювальної і перетворювальної техніки. – Київ: ІЕД НАН України, 1993. – С. 59–62.
- 28.** Johansson N. Control of dynamically assisted phase-shifting transformers. KTH Electrical Engineering, Stockholm, 2008. – 172 р.
- 29.** Рашитов П.А. Разработка и исследование алгоритмов управления мощными полупроводниковыми фазоповоротными устройствами для объектов единой национальной электрической сети России. Автореф. дис. к.т.н. – Москва, 2011. – 20 с.

УДК 621.314.214

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЛУЧШЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВЫХ УЗЛАХ

В.А. Халиков, канд.техн.наук,

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Рассматриваются с общих позиций состояние, перспективы и возможности улучшения технических средств организации и управления переходными процессами при коммутации в силовых трансформаторно-ключевых узлах систем силовой электроники. Обращается внимание на необходимость использования программных средств визуального имитационного моделирования процессов, особенно в части использования возможностей программного пакета MATLAB/Simulink. Предлагаются меры по минимизации или устранению экстремальных проявлений, которые могут сопровождать коммутационные процессы. Библ. 29.

Ключевые слова: трансформатор, коммутация, переходный процесс, моделирование.

THE CONDITIONS AND POSSIBILITIES OF THE IMPROVEMENT TO SWITCHING PROCESS ORGANIZATIONS IN POWER TRANSFORMER-KEY NODES

V.A. Khalikov,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

They are considered with the general position condition, prospects and possibility of the improvement of the technical facilities to organizations and control connecting process at switching's in power transformer-key nodes of the systems of the power electronics. Call attention about need of the use of software programs of visual simulation modeling of the processes, particularly in a part of the use the possibilities of the programme package MATLAB/Simulink. The measures are offered on minimization or eliminating the extreme manifestations, which can accompany the processes. References 29.

Key words: transformer, switching, transient, modeling.

1. Voronin P.A. Power semiconductor switches: Families, Features, Application. – M.: Dom Dodeka-XXI, 2001. – 384 p. (Rus)

2. Poluiianovich N.K. Power electronics: Education manual. – Taganrog: TGRTU, 2005. – 204 p. (Rus)

3. Zhemerov G.G., Kolesnik V.Ya. Elaborated model of the thyristor for modeling of the power converters in MATLAB 7 // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2009. – №1. – Pp. 37–41. (Rus)

- 4.** *Bogryi V.S., Russkikh A.A.* Mathematical modeling of the thyristor converters. – Moskva: Energiia, 1972. – 184 p. (Rus)
- 5.** *Okun S.S., Sergeenkov B.N., Kiselev V.M.* Transformer and transformer-thyristor regulators-stabilizers of the voltage. – Moskva: Energiia, 1969. – 184 p. (Rus)
- 6.** *Storm G.F.* Transductors. – Moskva: Inostrannaia literatura, 1957. – 568 p. (Rus)
- 7.** *Andreev V.S.* Theory of the nonlinear electric circuits. – Moskva: Radio i sviaz, 1982. – 280 c. (Rus)
- 8.** *Altunin B.Yu., Blinov I.V., Kralin A.A., Pankova N.G.* Electrical engineering calculations in system computer mathematicians Matlab Simulink. – N. Novgorod, NGTU, 2005. – 102 p. (Rus)
- 9.** *Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G.* Methodology of modeling and studying of electromagnetic processes in transformer switching executive structure with MATLAB programme package: Education manual. – Kyiv, IED NAN Ukraine, 2001. – 45 p. (Ukr)
- 10.** *Khalikov V.A., Lypkivskyi K.O.* Processes and organization of transformer switching // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №3. – Pp. 22–30. (Ukr)
- 11.** *Chernykh I.V.* Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – Piter, 2008. – 288 c. (Rus)
- 12.** *Kyryk V.V., Khalikov V.A.* Computer technologies of modeling and studies of the electric technical systems. – Kyiv, IED NAN Ukraine, AMU MON Ukraine, 2009. – 216 p. (Ukr)
- 13.** *Boos V.Ya.* Research and development of AC voltage regulator with thyristor switches on the primary side of transformer. Abstract dis. cand. tehn. Sciences. – Tomsk, 1979. – 21 p. (Rus)
- 14.** *Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A.* Electric machines: Transformers. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1989. – 352 p. (Rus)
- 15.** *Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G., Shatan O.F., Pakhalian V.M.* Device controllers arc welding in shielding gases // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №5. – Pp. 68–75. (Ukr)
- 16.** *Chizhenko I.M., Vydolob Yu.F., Grudskaya V.P.* The magnetization of the transformer when you switch back-to-parallel thyristors on its primary side // Vestnik KPI. – 1974. – Vol. II. – Pp. 12–16. (Rus)
- 17.** *Gelman M.V., Lohkov S.P., Boos V.Ya.* The Thyristor contactor for functioning on primary side of the single-phase transformer with nonlinear load // Trudy Cheliabinskogo politekhn. instituta. – 1976. – Vol. 176. – Pp. 70–74. (Rus)
- 18.** *Tumanov I.M., Altunin B.Yu.* Thyristor and thyristor-contact device for stabilization and regulations parameter to electric powers. – N. Novgorod, NGTU, 1993. – 102 p. (Rus)
- 19.** *Tumanov I.M., Bychkov E.V.* Calculation of conversion devices on the PC in the stationary and transient modes of operation using matrix-topological methods. – N. Novgorod, NGTU, 1993. – 111 p. (Rus)
- 20.** *Porudominskii V.V.* Devices of the switching transformer under load. – Moskva: Energiia, 1974. – 288 p. (Rus)
- 21.** *Lypkivskyi K.O., Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G.* Phase voltage regulation by switches with natural commutation and its studying with MATLAB // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk. “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – Vol.2. – 2002. – Pp. 72–79. (Ukr)
- 22.** *Khalikov V.A., Mozharovskii A.G.* Switching of the buck-boost transformer without the transitional regime in its primary // Tekhnicheskaiia elektrodinamika. – 1995. – №6. – Pp. 17–20. (Rus)
- 23.** *Kukharev A.L., Kokhan P.G., Nedviga L.A.* Switching processes in the reactor OLTC transformers electric furnace // Tekhnichna elektrodynamika. – 2006. – №5. – Pp. 38–43. (Rus)
- 24.** *Ozerianskii A.A., Gordinskii I.M.* Control of discrete thyristor converter as a means of improving its basic characteristics // Optimizatsiy preobrazovateley elektromagnitnoy energii. – Kyiv: Naukova dumka, 1976. – Pp. 134–142. (Rus)
- 25.** *Vaganov S.A.* Transformer-thyristor module with microprocessor control system to improve the quality of electric power networks workshop. Abstract dis. cand.tehn.sciences. – N. Novgorod, 2006. – 21 p. (Rus)
- 26.** *Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G.* Natural commutation of switches in phase voltage regulation systems with pulsed loads and its studying with MATLAB // Tekhnichna elektrodynamika. – 2003. – №6. – Pp. 30–35. (Ukr)
- 27.** *Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G.* Influence of time managing change values for the parameters of regulation of alternating voltage / Teoriia ta modeli prystroiv vymiriuvatnoi i peretvoruvatnoi tekhniki. – Kyiv, IED NAN Ukrayny, 1993. – Pp. 59–62. (Ukr)
- 28.** *Johansson N.* Control of dynamically assisted phase-shifting transformers. KTH Electrical Engineering, Stockholm, 2008. – 172 p.
- 29.** *Rashitov P.A.* Research and development of control algorithms for high-power semiconductor phase-shifting devices for objects unified national power grid Russia. Abstract dis. cand.tehn.sciences. – Moskva, 2006. – 20 p. (Rus)

Надійшла 20.03.2012
Received 20.03.2012