

ВИДИ КОМУТАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З КЛЮЧОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Хворост М.В., к.т.н.
ДП "Харківський метрополітен"
Україна, 61012, Харків, вул. Енгельса, 29
тел. (0572) 23-74-01

Гончаров Ю.П., д.т.н., Панасенко М.В., д.т.н., Замаруєв В.В., к.т.н.,
Чумак В.А., Панасенко Н.М., Хворост В.Ю., к.т.н., доц.
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Україна 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
тел. (0572) 707-63-67

Нікулін В.С.
Українська державна академія залізничного транспорту
Україна, 61050, Харків, пл. Фейербаха, 7
тел. (057) 705-10-34

Запропоновано енергетичний критерій комутаційного процесу: потужність комутації, який дозволяє описати явища енергетичного характеру у електричних колах з ключовими елементами. На базі цього критерію дана класифікація видів комутації та виділено клас кіл з однорідною комутацією, який дозволяє одержати високі енергетичні показники, підвищену електромагнітну сумісність та спрощує управління комутаційним процесом.

Предложено энергетический критерий коммутационного процесса: мощность коммутации, который позволит описать явления энергетического характера в электрических цепях с ключевыми элементами. На базе этого критерия дана классификация видов коммутации и выделено класс цепей с однородной коммутацией, который позволяет получить высокие энергетические показатели, повысить электромагнитную совместимость и упростит управление коммутационным процессом.

1. Аналіз стану проблеми та постановка задачі. Електричні кола з ключовими елементами, насамперед напівпровідниковими, набувають усе більше розповсюдження у електротехніці. Комутація є основним фізичним процесом у цих колах, вона визначає як їх функціональну працездатність, так і основні енергетичні характеристики: коефіцієнт корисної дії, реактивну потужність та інше.

Вплив комутаційних процесів зростає з підвищенням швидкодії силових напівпровідникових ключів. З одного боку, при цьому можна одержати радикальне скорочення маси силових електромагнітних елементів: трансформаторів, електродвигунів, дроселів та іншого електротехнічного устаткування шляхом підвищення частоти переключень [1]. Однак посилюються і досить численні негативні фактори: комутаційні втрати стають основною складовою загальних втрат, виникає електромагнітне забруднення навколишнього середовища, хвильові процеси в ізоляції, вихрові струми у провідниках та інше.

Розроблені на даний час досить ефективні методи аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з ключовими елементами використовують, як правило, модель ідеального ключа [2-4]. Однак як саме ці методи, так і модель ідеального ключа непридатні для аналізу енергетичної сторони явищ. Для комутаційних втрат у напівпровідникових приладах це очевидно. Але ж це виявляється також непридатним і для таких енергетичних явищ, як генерація реактивної потужності та циркуляція енергії проміж еле-

ментами комутаційного захисту (снаберами) та джерелами живлення. У даній роботі пропонується розглянути комутаційний процес як процес зміни миттєвої провідності електричного двохполюсника

$$g = \frac{i}{u} \quad (1)$$

незалежно від конкретної фізичної природи цього процесу та швидкості його протікання. Така модель дозволяє враховувати комутаційні властивості не тільки ключових елементів, але й других елементів силового кола, насамперед, реактивних, тому що вони тісно взаємодіють з ключовими елементами. На базі цієї моделі пропонується використовувати в якості основної енергетичної характеристики так звану *потужність комутації*, з котрою пов'язані усі інші енергетичні явища. Деякі елементи підходу, що пропонується, розглядалися у працях Ф. Емде [5] та О. Маєвського [6,7].

2. Потужність комутації. Найважливішим наслідком впливу комутації на енергетичну сторону процесів є зміна миттєвої електричної потужності елемента силового кола

$$p = u \cdot i = g \cdot u^2 \quad (2)$$

під впливом зміни його провідності g .

Ця зміна i є миттєвою потужністю комутації. Щоб дати цьому визначенню точний математичний вираз, перейдемо до диференціалів у другому рівнянні (2)

$$dp = g \cdot d(u^2) + u^2 \cdot dg \quad (3)$$

Перша складова цього рівняння пов'язана зі змі-

ною напруги і ніякого відношення до комутації немає. Вона може існувати, наприклад, в постійному резисторі ($g = \text{const}$) при зміні підведеної напруги. Друга складова, яка пов'язана зі зміною провідності, є миттєвою потужністю комутації (її диференціалом). З урахуванням (1) одержимо для неї еквівалентні вирази

$$ds = dg \cdot u^2 = u \cdot di - i \cdot du = -dri^2, \quad (4)$$

де $r = 1/g$ – миттєвий опір двополюсника.

Розглянемо властивості потужності комутації. Як витікає з першої формули (4), потужність комутації відрізняється від нуля тільки в перебігу примусової (жорсткої) комутації, коли провідність змінюється під напругою. У перебігу примусового вимикання ($dg > 0$) потужність комутації позитивна, а у перебігу примусового ввімкнення ($dg < 0$) – негативна. У перебігу природної (м'якої) комутації, коли провідність змінюється без напруги (струму), ніякої потужності комутації немає. Ясно, що одноопераційні напівпровідникові ключі можуть генерувати потужність тільки одного знака. Наприклад, тиристор (одноопераційний) не володіє властивістю примусового вимикання ($dg < 0$) під напругою, тому для нього завжди $ds \geq 0$.

Потужність комутації як складова миттєвої електричної потужності підкорюється закону збереження. Тому генерація потужності комутації у одному місці електричного кола повинна супроводжуватися її споживанням у другому місці.

Потужність комутації на деякому інтервалі часу t_s визначається як сума миттєвих потужностей комутації на цьому інтервалі

$$s = \int_{(t_s)} ds \quad (5)$$

В залежності від характеру зміни миттєвої потужності комутації у функції часу можуть бути виділені *регулярні* та *обмінні* комутаційні властивості елементів електричного кола.

Регулярні комутаційні властивості мають місце, якщо потужність комутації змінюється тільки у одному напрямку (збільшується або зменшується). Якщо знаки приростів величини s чергуються, то можна казати про обмінні комутаційні властивості. Потужність комутації передається при цьому від даного елемента кола другому та навпаки.

Для більшості елементів електричного кола регулярні комутаційні властивості можна відокремити від обмінних, якщо на інтервалі часу t_s повний приріст миттєвої електричної потужності $p = u \cdot i$ дорівнює нулю. Цієї умови задовольняє, наприклад, період процесу T , тому що на початку та наприкінці потужність p будь якого елемента однакова. Для ключових елементів цієї умови задовольняє також завершений процес ввімкнення або вимикання ($t_s = t_k$), тому що на межах цього процесу одна з двох величин u , або i , дорівнює нулю. Останнє означає, що миттєва потужність $p = u \cdot i$ на межах дорівнює нулю, тобто однакова. Інтервал часу t_s , який задовольняє вказаній умові, та відповідну потужність комутації можна назвати *рівноважними*, тому, що при цьому окремі складові миттєвої електричної потужності p врівноважують один одне. З першого рівняння (2) при цьому маємо

$$\int_{(t_s)} dp = \int_{(t_s)} (u \cdot di + i \cdot du) = 0 \quad (6)$$

Рівноважну потужність комутації позначимо великою літерою S . Підставляючи ds з другого рівняння (4) в (5) та враховуючи (6), одержуємо для рівноважної потужності комутації еквівалентні вирази

$$S = 2 \int_{(t_s)} u \cdot di = -2 \int_{(t_s)} i \cdot du = 2 \int_0^{t_s} u \cdot \frac{di}{dt} \cdot dt = -2 \int_0^{t_s} i \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt, \quad (7)$$

або у вигляді дискретних сум

$$S = 2 \sum_{(t_s)} u \cdot \Delta i = -2 \sum_{(t_s)} i \cdot \Delta u = \sum_{(t_s)} u^2 \cdot \Delta g = -2 \sum_{(t_s)} i^2 \cdot \Delta r. \quad (8)$$

Рівняння (8) зручні тоді коли на відрізках рівноважного інтервалу t_s яка небудь з величин: i , u , g , r має прямокутноступінчасту форму.

В останньому та передостанньому рівняннях (7) інтегрування проводиться по часу t .

Використаємо рівноважну потужність комутації для аналізу комутаційних властивостей окремих елементів електричного кола. З останнього рівняння (7) витікає, що рівноважна потужність комутації джерела постійної напруги $u = \text{const}$ (наприклад, за період $t_s = T$) дорівнює нулю. Отже цей елемент не володіє регулярними комутаційними властивостями. Фізична причина цього факту полягає у тому, що джерело підтримує постійну напругу, не може примусово змінювати провідність електричного кола в одному напрямку. Тому це джерело володіє лише обмінними комутаційними властивостями.

З передостаннього рівняння (7) витікає, що такі ж властивостями володіє джерело постійного струму. Приблизно ці властивості дійсні також для силових фільтрів з великими C або L , тому що ці фільтри роблять мало змінними одну з двох величин u , або i .

Підставляючи $di/dt = u/L$ у передостаннє рівняння (7), або $di/dt = i/C$ у останнє, бачимо, що рівноважна потужність комутації дроселя може бути тільки позитивною, а конденсатора – тільки негативною. Фізичні причини комутаційних властивостей реактивних елементів полягають у тому, що у перебігу установаження струму миттєвий опір дроселя знижується з причини зменшення е.р.с. самоіндукції, а миттєвий опір конденсатора зростає з причини збільшення напруги на обкладинках. Тому дросель володіє властивістю примусового (під напругою та струмом) *ввімкнення*, а конденсатор – *вимикання* електричного кола. Інакше кажучи, реактивні елементи у комутаційному розумінні одноопераційні. Це пояснює, чому основою снаберів вимикання є конденсатори, а снаберів ввімкнення – дроселі.

3. Реактивна потужність електричних кіл з ключовими елементами (потужність зсуву). Наявність реактивної потужності у електричних колах пов'язують звично, з дією реактивних елементів, яка

приводить до циркуляції енергії проміж джерелом живлення та споживачем. Однак особливість електричних кіл з ключовими елементами полягає у тому, що реактивна потужність зсуву у них може існувати при повній відсутності реактивних елементів. Найпростіший приклад такого кола зображений на рис. 1. Реактивну складову містить при цьому перша гармоніка струму, а наявність вищих гармонік дещо затемнює картину явищ.

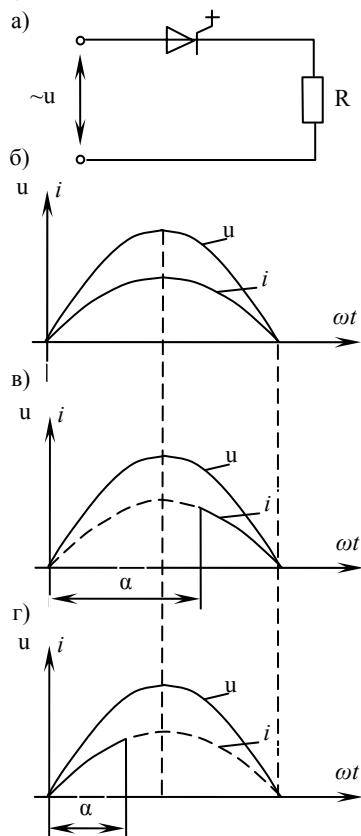


Рис 1. До пояснення фізичних причин виникнення реактивної потужності зсуву у електричних колах з ключовими елементами: а) – схема; б) – випадок коли немає реактивної потужності; в,г) – випадок коли є реактивна потужність позитивного та негативного знаку

Але можна виділити явище у чистому виді, якщо перейти до еквівалентного m -фазного режиму, підключати m схем рис. 1,а до трифазної мережі через ідеальний трансформатор з числом фаз на вторинній стороні, яке дорівнює m . При $m \rightarrow \infty$ вищі гармоніки у первинному струмі повністю вимкнуті, а реактивна складова струму першої гармоніки залишається. Наявність реактивної потужності зсуву та її знак безпосередньо витікають з факту зміни миттєвої провідності електричного кола під впливом комутації. Дійсно, якщо провідність кола постійна, то струм змінюється пропорційно напрузі і ніякого зсуву немає (рис. 1,б). Якщо провідність зростає, то змінення зсуву запізнюється відносно напруги (рис. 1,в): на початку півперіоду він малий, а потім зростає. Навпаки, при зменшенні провідності струм зменшується з випередженням: у першу частину півперіоду він більший ніж у другу (рис. 1,г).

Трактування реактивної потужності зсуву як наслідок зміни миттєвої провідності кола під напругою, або струмом, дійсне не тільки для ключових елементів. Наприклад, конденсатор викликає негативний зсув струму відносно напруги з причини збільшення його миттєвого опору, що вже обговорювалося раніше. На рис. 2 показано, наприклад, як змінюється миттєва провідність конденсатора при синусоїдальній напрузі на обкладинках. Як бачимо, при наявності напруги $u \neq 0$ миттєва провідність тільки зменшується.

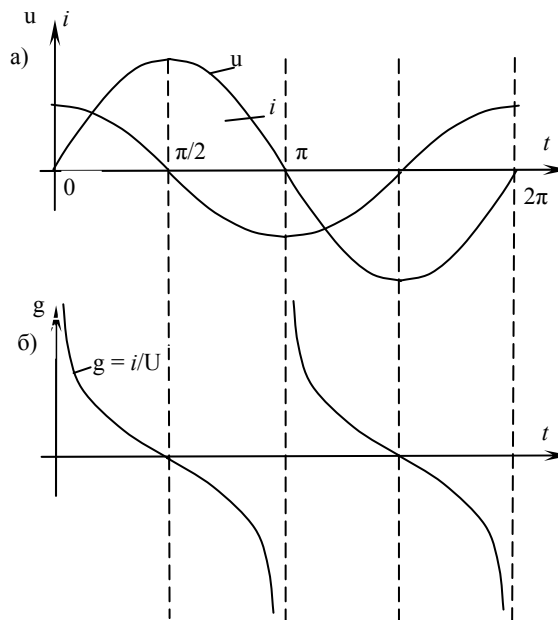


Рис 2. Зв'язок між реактивною потужністю зсуву і зміною миттєвої провідності для конденсатора

Таким чином трактовка реактивної потужності зсуву як наслідок зміни миттєвої провідності електричного кола є більш загальною порівняно з традиційною трактовкою, яка пов'язує зсув з циркуляцією енергії між джерелом живлення та споживачем.

Якщо живлення йде від джерела синусоїдальної напруги, або струму, то існує пропорційний зв'язок між реактивною потужністю зсуву Q та введеною у розділі 2 потужністю комутації за період ($t_s = T$). Дійсно, якщо підставити у будь яке з двох останніх рівнянь (7) синусоїдальну напругу та першу гармоніку несинусоїдального струму

$$u = U_m \cdot \sin \omega t, \quad i_1 = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (9)$$

то знайдемо

$$S = 2\pi \cdot U_m \cdot I_m \cdot \sin \varphi = 4\pi \cdot Q \quad (10)$$

Зокрема, зв'язок (10) дозволяє розрахувати реактивну потужність електричних кіл з ключами з простих та наглядних рівнянь (8). Наприклад, для випадків рис. 1,в-г з передостаннього рівняння (8)

$$Q = \pm \frac{1}{4\pi} \cdot (U_m \cdot \sin \alpha)^2 \cdot \frac{1}{R} \quad (11)$$

4. Енергія комутації. Мається на увазі енергія, яка споживається ключем від джерела живлення на інтервалі t_k переходу ключа від вимкненого стану до увімкненого, або навпаки. Ця енергія або виділяється

у вигляді тепла, або накопичується у реактивних елементах снаберів. Вона має принципове значення, так як визначає допустиму частоту переключень, а разом з нею масогабаритні показники та коефіцієнт корисної дії. При визначенні енергії комутації враховуємо, що $t_k \neq 0$, але приймаємо припущення $t_k \rightarrow 0$, нехтуючи часом комутації порівняно з періодом процесу. Тоді енергію комутації можна пов'язати з потужністю комутації. При додатковому припущенні про лінійність траєкторій комутаційного процесу (рис. 3а), яке звичайно приймається [2], маємо для потужності комутації з першого або другого рівняння (8), а також для енергії комутації

$$|s| = 2u \cdot i, \quad E = \frac{1}{2} u \cdot i \cdot t_k, \quad (12)$$

відділя

$$E = \frac{t_k}{4} \cdot s \quad (13)$$

Перехід до модуля s дозволяє поширити зв'язок також на примусове вимикання, коли потужність комутації змінює знак, а енергія комутації його зберігає.

Зв'язок (13) у сукупності з рівнянням (8) дозволяє використовувати потужність комутації для розрахунку комутаційних втрат, а також для зіставлення різних видів імпульсної модуляції за показниками к.к.д. Однак найбільш цікавим є використання цього зв'язку для аналізу характеристик кін. де енергія комутації не виділяється у виразі тепла, а тимчасово накопичується у реактивних елементах снаберів.

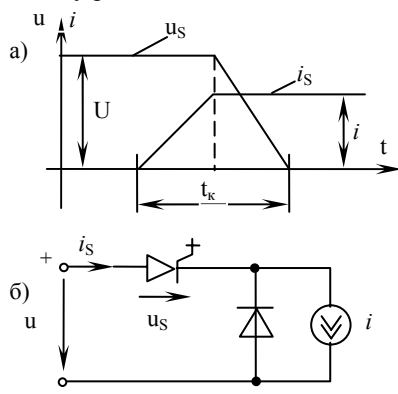


Рис 3. Лінійаризована траєкторія комутаційного процесу у перебігу примусового ввімкнення (а) ключа у базовій комутаційній структурі з силовими фільтрами на вході та виході (б)

Після деякого охолодження у силовій електроніці відновився інтерес до таких пристроїв, тому що виявилось, що безснаберні напівпровідникові ключі не дають задовільного рішення проблеми комутації при великих потужностях. Найпростіші снабери (рис. 4), також не дозволяють одержати задовільний к.к.д. у зв'язку з потребою вилучення енергії комутації. Дійсно, у схемі рис.4,а при ввімкненні VS дросель L у багато разів обмежує комутаційні втрати за рахунок затримки наростання струму. Однак енергія комутації $Li^2/2$, яка накопичується при цьому у дроселі, повинна бути завчасно повернена до джерел живлення, або виділена у вигляді тепла у резистивних елементах, а

інакше при вимкненні VS вона виділяється у ньому у вигляді тепла і може визвати його пошкодження за рахунок виникаючої перенапруги.

На думку авторів найбільш ефективним прийомом вирішення цієї проблеми є перехід до режиму так званої однорідної (одноопераційної) комутації [4].

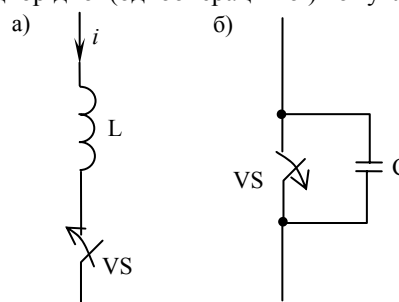


Рис 4. Найпростіші снабери: а) – ввімкнення; б) – вимикання

5. Однорідна комутація. Комутація є однорідною, якщо відсутня потужність комутації при одній з двох комутаційних операцій вимикання або ввімкнення, тобто ця операція протікає при відсутності напруги та струму на ключі. Якщо без потужності комутації протікає вимикання, то таку комутацію називаємо однорідною комутацією першого роду, а якщо ввімкнення, то однорідною комутацією другого роду. Однорідна комутація дозволяє комплексно вирішити основні проблеми, пов'язані з комутацією напівпровідникових ключових елементів. По-перше, для обмеження комутаційних втрат можливо використання найпростіших бездисипативних снаберів, які не містять додаткових пристроїв для поглинання, або повернення енергії комутації. Дійсно, якщо у схемі, де встановлений ключ рис. 4,а, створені умови для його вимикання без струму, то це означає, що енергія комутації, яка була накопичена у дроселі L при ввімкненні ключа, вже повернулася до електричного кола і проблем з її поглинанням при вимкненні ключа не виникає. Тому ключ буде діючим і з простим індуктивним снабером. По-друге, при однорідній комутації ефективно обмежується швидкість зміни струмів та напруг у силовій схемі, що поліпшує електромагнітну сумісність. І на кінець, однорідна комутація дозволяє обійтися одноопераційними напівпровідниковими приладами, що спрощує керування та підвищує надійність ключових елементів.

Для напівпровідникових приладів, що можуть примусово вимикатися (наприклад, IGBT, MOSFET або GTO) ефективною є однорідна комутація другого роду, яка розвантажує ключ від потужності комутації під час ввімкнення. Тоді залишається примусовим тільки вимикання, при якому прилад діє у комутаційному розумінні як ємність, або реалізує примусове вимикання спільно з ємністю, яка зменшує у багато разів комутаційні втрати. Ніяких додаткових пристроїв для поглинання, або повернення енергії комутації, що накопичується у конденсаторі у перебігу вимикання ключа, при цьому не потрібно. У якості приладу VS при цьому може бути використаний одноопераційний прилад, який одержав назву „антиристор”,

або „дуалтиристор” [8,9]. Особливість цього приладу полягає в тому, що він має вольтамперну характеристику, яка дуальна характеристиці тиристора. Зокрема, він вмикається без зовнішнього імпульсу керування при зменшенні напруги до нуля, що спрощує систему керування, має внутрішній зворотний зв'язок, що підвищує надійність, та вимикається при перевищенні струмом заданого порога, що спрощує захист. Анти-тиристора, придатного для промислового використання, ще не створено, але він має досить велику перспективу.

Подальше розглянемо більш детально схеми з ключовими елементами реалізуючі однорідну комутацію другого роду, яку для скорочення будемо називати одноопераційною комутацією.

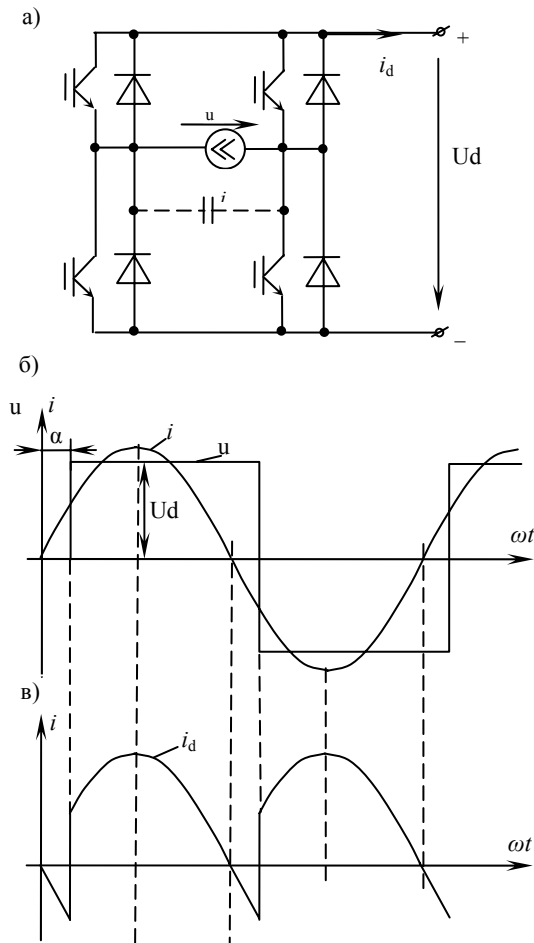


Рис 5. Приклад джерельної одноопераційної комутації: а) – схема; б,в) – напруга та струм у функції електричного кута

В зв'язку із збереженням потужності комутації у схемі повинен бути генератор потужності комутації протилежного знаку ($s < 0$), у порівнянні з негативною потужністю ($s < 0$) яка генерується одноопераційним ключем. В залежності від типу такого генератора можна виділити наступні види одноопераційної комутації:

- джерельну;
- розділену;
- реактивну (дросельну)

Прикладом джерельної одноопераційної комутації є схема рис. 5,а. Змінний струм i перетворюється

від регулюемого випрямляча струму з фазовим керуванням (рис. 5, б,в). При позитивному куті керування α напруга на боці змінного струму відстає від нього, що відповідає генерації реактивної потужності позитивного знаку. Це відповідає генерації джерелом i потужності комутації також позитивного знаку, що потребує від перетворювача створення потужності комутації тільки негативного знаку.

Для розвантаження від комутаційних втрат достатньо підключити конденсатор паралельно виходу, як показано пунктиром на рис. 5,а. Ця схема є дуальною відносно традиційного випрямляча напруги на одноопераційних тиристорах та може бути виконана на одноопераційних анти-тиристорах.

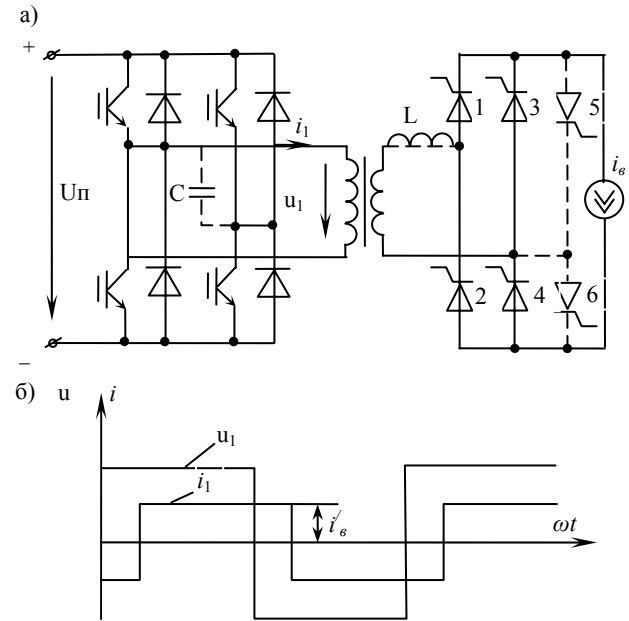


Рис 6. Приклад розділеної одноопераційної комутації: а) – схема; б) – напруга та струм у проміжній ланці змінного струму

Розділена комутація використовує розділення комутації двох родів проміж різними комутаторами та може бути реалізована у перетворювачах з проміжною ланкою підвищеної частоти (рис. 6,а). Перетворювач схеми рис. 6,а призначений для обміну енергією між джерелами постійної напруги U_{Π} і постійного струму i_b . Комутатори первинної та вторинної ланки комують зі зсувом на кут керування α . При $\alpha > 0$ первинна ланка, як і у схемі рис. 5,а, виконує одноопераційну комутацію другого роду, а вторинна ланка – одноопераційну комутацію першого роду (рис. 6,б). Тому для розвантаження від комутаційних втрат достатньо включити паралельний конденсатор C на первинній стороні та послідовний дросель L – на вторинній (пунктир на рис. 6,а). Комутатори при цьому можуть виконуватися на одноопераційних анти-тиристорах та тиристорах.

Однак при мінливому струмі i_b з можливістю холостого ходу ($i_b = 0$) впливає той недолік, що час перезаряду конденсатора C залежить від струму i_b . Це порушує нормальну роботу схеми при малих струмах i_b . Для подолання цього недоліку можна використати

додаткові тиристори 5,6, кожен з яких вмикається в один з півперіодів незадовго перед комутацією у первинній ланці, замикаючи спільно з одним з тиристорів 1,2 накоротко вторинну обмотку. Тим самим створюється додатковий струм комутації для перезаряду конденсатора, який швидко убуває після її завершення до нуля. Регулюванням моменту ввімкнення додаткових тиристорів можна забезпечити постійний час перезаряду конденсатора незалежно від величини i_b . Швидкість зміни струму комутації обмежує індуктивність L .

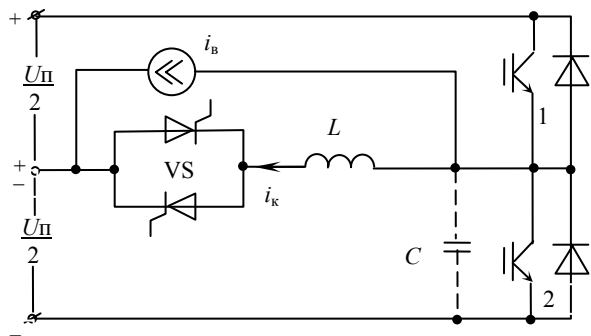


Рис. 7. Приклад реактивної одноопераційної комутації

Реактивна комутація використовує у якості генератора потужності комутації протилежного знаку реактивний елемент (дросель при однорідній комутації другого роду). Прикладом схеми, яка використовує дросельну одноопераційну комутацію, є так званий снабер Мак-Муррі, введений на рис. 7 у схему напівмостового інвертора напруги.

Незадовго перед переключенням силових ключів 1,2 вмикається чотириквADRантний допоміжний ключ VS, що приводить до протікання додаткового струму комутації i_k у тому з силових ключів, який проводить струм навантаження i_b . Струм комутації спрямований згідно з напрямком провідності керованого прикладу. Регулюванням моменту ввімкнення ключа VS можна забезпечити вимикання силового транзистора при постійному струмі незалежно від величини i_b , що дає постійний час перезаряду конденсатора C та після закінчення цього перезаряду ввімкнення чергового силового транзистора при нульовій напрузі на ньому. Ця схема, на думку авторів, є найбільш прийнятною для використання в інверторах з широкодіапазонною широтно-імпульсною модуляцією.

Висновки. 1. Комутаційний процес у колах з ключовими елементами доцільно трактувати як процес зміни миттєвої провідності двополюсника незалежно від фізичної природи цього процесу та швидкості його протікання.

2. У якості енергетичної характеристики комутаційного процесу доцільно використовувати так звану потужність комутації як приріст миттєвої електричної потужності під впливом зміни провідності двополюсника.

3. Реактивна потужність зсуву у колах з ключовими елементами, як і потужність комутації, є наслідком зміни миттєвої провідності елементів. Це трактування є більш загальним порівняно з трактуванням, яке пов'язує зсув з циркуляцією енергії між джерелом живлення та навантаженням.

4. Існує пропорційний зв'язок між потужністю комутації та енергією комутації, яка виділяється у ключових елементах під час комутації та перетворюється у тепло або циркулює між електричним колом і елементами комутаційного захисту – снаберами.

5. За допомогою уведених енергетичних критеріїв може бути виділений клас ключових елементів з одноопераційною комутацією, у якому комплексно вирішуються основи проблеми комутації: обмежуються комутаційні втрати, згладжуються фронти імпульсів і створюються умови для використання одноопераційних напівпровідникових приладів – тиристорів і антиотиристорів у схемах автономних перетворювачів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Северс Р., Блум Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для вторичного электропитания. // Пер. с англ. под ред. Смольникова Л.Е. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294с.
- [2] Mochan N., Undeland T.M., Roblins W.P. Power electronics: converters, application and design //New York: John Wiley, 1989. – 667р.
- [3] Шипило В.П. Операторно – рекуррентный анализ электрических цепей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 312с.
- [4] Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г., Панасенко М.В. та ін. Перетворювальна техніка, ч.2. За ред. В.С. Руденка. – Харків, Фоліо, 2000.– 360с.
- [5] Emde F. Entohmung. // ETZ, 1930, V.15.
- [6] Маевский О.А., Гончаров Ю.П. Приведенная реактивная мощность электрических цепей с нелинейными элементами. / Электричество, 1967, №3. – с. 22–26.
- [7] Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320с.
- [8] Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Ересько А.В. и др. Силовые полупроводниковые ключи с внутренней обратной связью, действующей на выключение. // Вестник ХГПУ, вып. 106, Харьков, 2000. – с. 67–74
- [9] Iturriz F., Ladoux P. Phase controlled multilevel converters based on dual structure associations. // IEEE Trans on power electronics, V.15, №1, 2000. – p. 92 – 102.

Поступила 4.07.2005