

СИЛОВІ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ГОЛОВНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ МЕТРОПОЛІТЕНА З ПОВЗДОВЖНЬОЮ ЛІНІЄЮ ЖИВЛЕННЯ

Хворост М.В., к.т.н., доц.
ГП “Харківський метрополітен”
Україна, 61012, Харків, вул. Енгельса, 29
тел. (0572) 23-74-02

Божко В.В.
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ “ХПІ”, кафедра “Електричний транспорт та тепловозобудування”
тел. (057) 706-63-67

Розглянуті шестипульсні і дванадцятипульсні схеми випрямлячів для перетворювальних агрегатів тягових підстанцій метрополітенів. Показано, що найкращою схемою випрямляча для головних тягових підстанцій метрополітену з повздовжньою високовольтною лінією живлення, забезпечуючого стабілізацію вихідної напруги є дванадцятипульсна напівкерувана схема випрямляча послідовного типу з реверсним вольтододачком.

Рассмотрены шестипульсовые и дванадцятипульсовые схемы выпрямителей для преобразовательных агрегатов тяговых подстанций метрополитенов. Показано, что наилучшей схемой выпрямителя для главных тяговых подстанций метрополитена с продольной высоковольтной линией питания, обеспечивающего стабилизацию выходного напряжения, является дванадцятипульсовая полупроводящая схема выпрямителя последовательного типа с реверсивной вольтодобавкой.

ВСТУП

На даний час для перетворювальних агрегатів тягових підстанцій метрополітенів СНД найбільш широке застосування мають напівпровідникові шестипульсні схеми некерованих (діодних) випрямлячів виконаних як по схемі „дві обернуті зірки зі зрівнювальним реактором” (перетворювальні агрегати УВКМ-1), так і по мостовій трифазній схемі (перетворювальні агрегати УВКМ-5, УВКМ-6 та їх модифікації) [1]. Деяко менше застосування одержали схеми випрямлячів на основі послідовного з'єднання двох мостів некерованих шестипульсних схем випрямлячів (перетворювальні агрегати УВКМ-2).

Вибір трифазної мостової схеми в перетворювальних агрегатах УВКМ-5 та УВКМ-6 замість нульової шестипульсної схеми обумовлюється кращими її техніко-економічними показниками і, в першу чергу, меншою (на 25%) типовою потужністю перетворювального трансформатора [2]. Однак, треба мати на увазі, що шестипульсні мостові некеровані (і в більшій мірі керовані) випрямлячі мають два суттєвих недоліки з точки зору сучасних вимог до якості споживаємої електроенергії, а саме: відносно низький середній коефіцієнт потужності λ (десь близько 0,9), викривлену форму кривої споживаємого струму (коефіцієнт форми $\kappa_i = 0,983$) [3,4]. Ці недоліки були майже усунуті в перетворювальних агрегатах УВКМ-2 на базі дванадцятипульсних схем випрямляча виконаного шляхом послідовного з'єднання двох трифазних некерованих мостів працюючих з зсувом в 30 ел. градусів (середній коефіцієнт потужності λ і коефіцієнт скривлення κ_i відповідно не менше за 0,975 і 0,988) [3]. Але порівняно невелика потужність тягових перетворювальних агрегатів підземних підстанцій метрополітенів із-за обов'язкового використання тільки сухих

трансформаторів $P_n \leq 1515$ кВт, а також суттєве ускладнення як самої силової схеми випрямляча, так і схеми захисту від внутрішніх коротких замикань при пробіі вентилів ключів мостових схем через необхідність установки двох шестиполосних швидкодіючих автоматичних вимикачів типу ВАБ-43 і стали тими негативними чинниками, що не сприяли широкому впровадженню дванадцятипульсних випрямлячів на підземних тягових підстанціях метрополітенів. Необхідність розробки випрямлячів більш ефективних чим некеровані мостові трифазні випрямлячі, для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій для запропонованої в роботі [5] системи електропостачання метрополітенів, а саме, схеми електропостачання на основі високовольтної повздовжньої лінії постійного струму обумовлюється на сучасному етапі більш жорсткими вимогами до якості споживаємої електроенергії (вимоги Євростандарту і міжнародного ДОСТ 13109-97).

ШЕСТИПУЛЬСНІ МОСТОВІ СХЕМИ ВИПРЯМЛЯЧІВ З БЛИЗЬКИМ ДО ОДИНИЦІ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

Прагнення спеціалістів з перетворювальної техніки одержати синусоїдальну форму струму, споживаємого від живлячої мережі та зменшити пульсації в кривій випрямленої напруги привели до розробки нового класу випрямлячів із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності на базі трифазних мостових схем [6].

Альтернативним технічним рішенням стосовно покращення якості шестипульсних схем випрямлячів з боку коефіцієнта потужності є схеми трифазних мостових випрямлячів на базі керованих напівпровідникових приладів (GTO і IGBT), які приведені на рис.1, а,б [7].

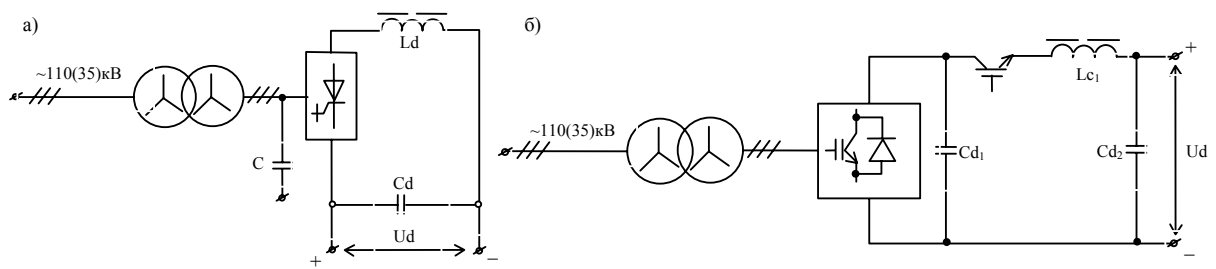


Рис 1. Випрямлячі на базі керованих напівпровідникових приладів:
а) випрямляч напруги з однополярною ШІМ на GTO-приладах;

б) випрямляч струму з двохолярною синусоїдальною ШІМ та обмежувачем струму на ШІПІ на IGBT приладах

В схемі рис. 1, а, яка являє собою випрямляч напруги з однополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), можливо як одержати близький до одиниці коефіцієнт потужності, так і обмежувати струм при коротких замиканнях. Основними недоліками цієї схеми є:

- велика стала потужність конденсаторів C вхідного фільтра, яка сопоставима із потужністю перетворювача, а це, як відомо, приводить до надлишкової реактивної потужності при холостому ході випрямляча;

- значна вартість вентиляного комплексу випрямляча із-за великої ціни на потужні прилади GTO.

В схемі рис 1, б, випрямляч струму забезпечує стабілізацію напруги, діючи при цьому як підвищуючий перетворювач, а струмообмеження в аварійних режимах виконує окремий широтно-імпульсний перетворювач (ШІПІ).

Недоліками цієї схеми є:

- струмообмежуючий перетворювач повинен бути виконаний на туж потужність, що і основний перетворювач;
- велика вартість вентиляного комплексу перетворювача із-за великої ціни на потужні високовольтні прилади IGBT.

ДВАНАДЦЯТИПУЛЬСНІ СХЕМИ ВИПРЯМЛЯЧІВ З БЛИЗЬКИМ ДО ОДИНИЦІ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

Відомо [8], що для одержання менших пульсацій випрямленої напруги та зниження вищих гармонічних складових в кривій мережевого струму для високовольтних потужних перетворювальних агрегатів можуть використовуватися дванадцятипульсні схеми випрямлячів.

Стосовно високовольтних потужних тягових підстанцій дванадцятипульсні випрямлячі будуються на основі перетворювального трансформатора з двома вторинними трифазними обмотками, одна із яких з'єднується зіркою, а друга – трикутником [3]. До кожної із цих обмоток приєднується мостова трифазна схема комутатора. Ці трифазні комутатори можуть з'єднуватися між собою по колу випрямленого струму паралельно або послідовно. Відмітимо, що дванадцятипульсна схема паралельного типу потребує установки вирівнювального реактору і дуже точного дотримання тотожності опорів вторинних обмоток трансформатора. Останнє можливо забезпечити тільки за рахунок спеціальної конструкції обмоток трансформатора, що значно ускладнює конструкцію перетворювального трансформатора [9]. Ці факти приводять до збільшення витрат електротехнічних матеріалів, тому в практиці тягових підстанцій залізничного транспорту і

рекомендовано для використання дванадцятипульсний діодний випрямляч послідовного типу [3,10].

Принципово, для стабілізації високовольтної напруги в повздовжній лінії живлення постійного струму при коливаннях напруги живлення і для компенсації падінь напруги на опорах перетворювача в залежності від навантаження можуть застосовуватися керовані випрямлячі на одноопераційних тиристорах з конденсаторними компенсаторами реактивної потужності (рис 2.). Таке рішення є цілком доцільним, так як режим роботи керованих випрямлячів дванадцятипульсної схеми при її використанні на головних тягових підстанціях метрополітенів міняється в невеликому діапазоні (близько $\pm 12,5\%$).

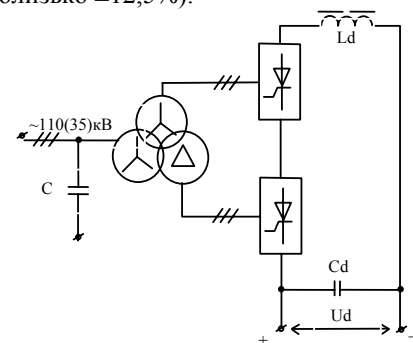


Рис. 2. Керований дванадцятипульсний випрямляч з емнісним компенсатором реактивної потужності

Основу керованої дванадцятипульсної схеми перетворювача (рис. 2.) складають трифазні тиристорні мости з фазовим управлінням. Максимальна величина кута управління α_M в режимі стабілізації вихідної напруги визначається із співвідношення:

$$\cos \alpha_M = 1 - \Delta U^* \quad (1)$$

де ΔU^* – потрібний запас по діапазону регулювання напруги в мережі живлення та на компенсацію падіння напруги на опорах випрямляча від струму навантаження.

При цьому відносна споживаєма реактивна потужність Q_0^* визначається із співвідношення

$$Q_0^* = \sin \alpha_M = \sqrt{2\Delta U^* - \Delta U^{*2}} \quad (2)$$

Якщо косинусні конденсатори C на вході перетворювача компенсують половину цієї реактивної потужності

$$Q_C^* = \frac{1}{2} Q_0^*, \quad (3)$$

то тоді коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні буде рівний

$$\lambda_H = \frac{\cos \alpha_M}{\sqrt{\cos^2 \alpha_M + (Q_0^* - Q_C)^2 + P^{*2}}}, \quad (4)$$

де $P^* = 0,15$ – потужність скривлення дванадцятипульсного випрямляча.

При $\Delta U^* = 0,25$ одержимо $\lambda_H = 0,9$.

Якщо ж в схемі рис. 2 компенсувати при номінальній потужності всю реактивну потужність ($Q_C^* = 0,66$), то при цьому одержуємо $\lambda_H = 0,99$, але зросте вдвічі потужність конденсаторної батареї C та надлишкова реактивна потужність на холостому ході перетворювача.

Надлишкову реактивну потужність можливо усунути, використавши замість конденсаторної батареї C регульований компенсатор реактивної потужності [6], маючи на увазі той факт, що його стала потужність складе біля $\frac{2}{3}$ сталої потужності основного перетворювача.

Таким, чином, до основних недоліків такого традиційного рішення при стабілізації випрямленої напруги також відносяться:

- коефіцієнт потужності при номінальному режимі перетворювача і при $Q_C^* = 0,33$ є недостатньо високим;
- в режимі холостого ходу перетворювача одержуємо значну надлишкову потужність $Q_o^* = Q_C^* = 0,33$;
- крім цього, в таких схемах погіршується гармонічний склад мережевого струму внаслідок зменшення кута комутації при $\alpha \neq 0$, а також, можливе виникання резонансних явищ в коливальному контурі, утвореному індуктивністю живлячої мережі та ємністю компенсуючого конденсатора.

При цьому, в наслідок великої величини ємності конденсатора C , придушення резонансних явищ пов'язано з великими технічними труднощами.

Повна компенсація реактивної потужності та близька до синусоїди форма мережевого струму забезпечується в перетворювальних дванадцятипульсних системах з силовим активним фільтром, виконаним на основі автономного інвертора напруги з ШІМ [6]. Однак тут треба мати на увазі, що позитивні характеристики цих перетворювальних систем досягаються суттєвим ускладненням силової схеми, а це є доцільним тільки при необхідних великих діапазонах регулювання вихідної напруги. На наш погляд, більш доцільними схемами перетворювальних агрегатів для головних тягових підстанцій метрополітена, працюючих в режимі стабілізації напруги в повздовжній високовольтній лінії постійного струму, при невеликих реалізуємих діапазонах регулювання вихідної напруги, є схеми перетворювачів на

базі некерованих дванадцятипульсних випрямлячів з керованими вольтододатками [2,10].

Відомо [3], що прийняті, для практики потужних високовольтних тягових підстанцій залізниць, характеристики з боку реактивної потужності та пульсацій напруги одержують при використанні некерованих (діодних) дванадцятипульсних випрямлячів послідовного типу. При цьому також зменшується установлена потужність вихідних фільтрів в порівнянні з шестипульсними схемами перетворювачів. Такий же результат можна одержати і в керованих дванадцятипульсних випрямлячах на одноопераційних тиристорах, використовуючи в них сталий режим з кутом управління тиристорами $\alpha = 0$. Однак, такий режим керування не дозволяє забезпечувати стабільну напруги в повздовжній лінії живлення, що приводить до збільшення втрат електроенергії в системі електропостачання метрополітена та погіршення використання елементів електрообладнання. Регулювання вихідної напруги також необхідно в аварійних режимах, так як це дозволяє забезпечити струмообмеження та спростити, тим самим, захист пунктів розподільного живлення при коротких замиканнях. Ці цілі можливо досягти використовуючи напівкеровану дванадцятипульсну схему випрямляча послідовного типу та реверсивний вольтододаток, включення якого для двох його схемних варіантів показано на рис. 3,а,б.

В основному дванадцятипульсному випрямлячі (рис.3, а, б) один з двох трифазних мостових комутаторів виконується некерованим на діодах, а другий – на одноопераційних тиристорах із звичайним фазовим управлінням, який працює в сталому режимі при $\alpha=0$. У вольтодатковому перетворювачі трифазний мостовий комутатор (середній на рис.3) виконується або на одноопераційних тиристорах з фазним управлінням (рис.3, а), або на двоопераційних тиристорах з однополярною ШІМ (рис.3, б). Ці схеми перетворювачів можуть працювати в двох основних режимах: сталому (тривалому) та режимі струмообмеження (короткочасному). Основна ж ідея підвищення коефіцієнта потужності живлячої мережі в перетворювальному агрегаті на основі дванадцятипульсної схеми випрямляча з реверсивним вольтододатком, працюючого в режимі стабілізації вихідної напруги, полягає в тому, що у вольтододатку використовується повний діапазон управління тиристорами від 0 до π , а в той час, як при відсутності вольтододатка в керованих дванадцятипульсних випрямлячах, працюючих в режимі стабілізації вихідної напруги, використовується лише початкова частина цього діапазону, супроводжуєма великим споживанням реактивної потужності.

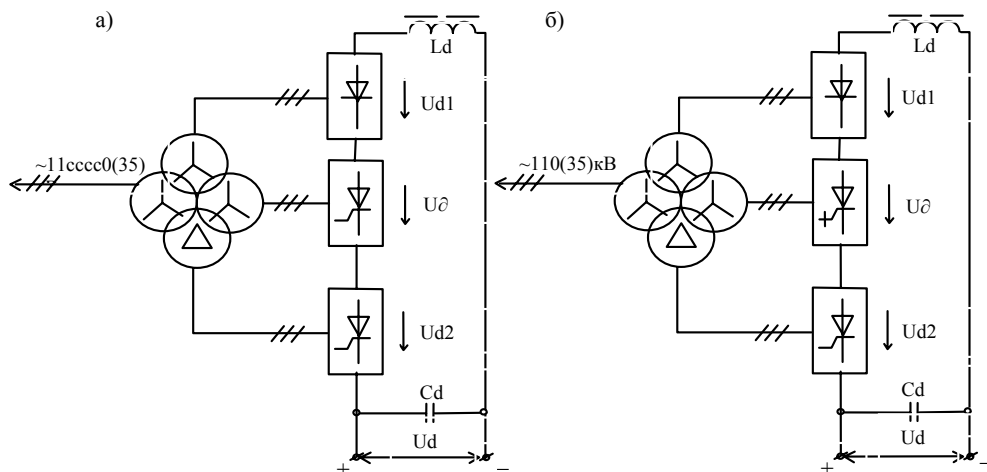


Рис. 3. Два варіанта виконання живлячого перетворювача: а) з вольтоподатком на одноопераційних тиристорах з фазовим управлінням; б) з вольтоподатком на запираємих тиристорах з ШІМ

В режимі струмообмеження, який настає, наприклад при короткому замиканні в повздовжній лінії постійного струму, вступає в дію фазове управління тиристорної частини напівкерованого основного перетворювача, що обумовлює перехід її в інверторний режим з вихідною напругою близькою до вихідної напруги діодної частини і зустрічно до неї направленої. Так як по умові недопущення перекидання інвертора необхідно при цьому забезпечити деякий кут випередження β_u в тиристорній частині, то за допомогою реверсивного вольтоподатка і створюється недостаюча частина зустрічної напруги. В результаті цього на виході перетворювального агрегату буде нульова напруга, що вкрай необхідно при короткому замиканні в повздовжній лінії постійного струму.

ВИСНОВКИ

Найбільш ефективними схемами для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітену з високовольтною повздовжньою лінією живлення, працюючих в режимі стабілізації вихідної напруги, з точки зору коефіцієнта потужності є схеми дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтоподатком. Щодо доцільності використання конкретної модифікації вольтоподатку з боку типа вентилів їх комутаторів, то тут треба провести додаткові дослідження з точки зору впливу схемної модифікації вольтоподатка на коефіцієнт потужності живлячої мережі.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Колузаев А.М., Едигарян Л.С., Ермолов Д.Г. и др. Электропитание метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование. Под ред. Е.И.Быкова. – М.: Транспорт, 1977. – С. 431.
 [2] Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. Под ред. С.Д. Соколова. – М.: Транспорт, 1979. – С. 264.
 [3] Барковский Б.С., Магай Г.С., Маценко В.П. и др. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. Под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – С. 127.

[4] Kross A. Oberschwingungen: Netzrückwirkungen der Leistungselektronik. 2. Aufl. – Berlin; Offenbach: VDE – VERLAG, 1996. – 230s.
 [5] Хворост Н.В. Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитенов. // Научно-технич. сборник. "Коммунальное хозяйство городов". Серия "Технические науки и архитектура", – Киев, техника 2003. – С. 172–179.
 [6] Жемеров Т.Г., Сокол Е.Н., Крылов Д.С. Новый класс преобразователей переменного напряжения в постоянное, электромагнитно совместимых с питающей сетью. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. Частина 1. – Київ, 2001. – С. 3–8.
 [7] Гончаров Ю.П., Панасенко М.В., Семененко О.І., Хворост М.В. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Під ред. Ю.П. Гончарова. Навчальний посібник. – Харків, НТУ „ХПІ”, 2004. – С. 184.
 [8] Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи, – М.: Транспорт, 2001. – С. 464.
 [9] Фишлер Я.Л., Урманов Р.Н. Преобразовательные трансформаторы. –М.: Энергия, 1974. – 224с. ("Трансформаторы". Вып. 26).
 [10] Кисляков В.А. Система энергоснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока с вольтодобавочными устройствами (ВДУ) Тр. МИИТа, 1975, вып. 451. – С.105 – 108.

Надійшла 08.11.2004