

2.Рудь И.А. Расчет надежности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.20. – К.: Техніка, 1999. – С.37-42.

3.Гавриленко И.А., Передерий Т.С., Самойленко Н.И. Повышение надежности функционирования магистрального трубопровода // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.72. – К.: Техніка, 2006. – С.193-200.

Получено 20.03.2007

УДК 621.3.016.45

В.М.КОВАЛЬОВ, канд. техн. наук, В.М.ГАРЯЖА, Д.О.БІЛОХА
Харківська національна академія міського господарства

ШВИДКОДІЮЧИЙ ОПТИМАЛЬНИЙ ОДНОФАЗНИЙ КОМПЕНСАТОР

Розглядаються питання швидкодіючої компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдальними режимами шляхом застосування тиристорних компенсаторів реактивної потужності. Представлений удосконалений принцип керування тиристорним компенсатором.

З метою компенсації реактивної потужності швидкозмінного навантаження в світі широко застосовуються тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП). Основною перевагою ТКРП над традиційними засобами компенсації є можливість швидкої та плавної зміни генерованої чи споживаної реактивної потужності. Елементом, що забезпечує швидке і плавне регулювання, є фазокерований реактор (ФР), схема якого – це послідовне з'єднання реактора та двонапрявленого тиристорного ключа (рис.1). Регулювання реактивної потужності ФР здійснюється шляхом зміни кута керування тиристорів системою керування (СК).

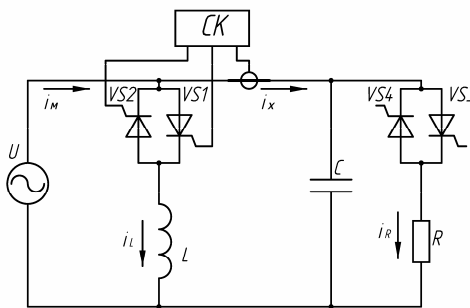


Рис.1 – Схема ТКРП з навантаженням

У сучасних електричних мережах, для яких характерні швидкозмінні навантаження типу дугових сталеплавильних печей, тиристор-

них перетворювачів електроприводу, установок дугового зварювання і т.ін., високої актуальності набуває задача підвищення динамічних характеристик ТКРП в несинусоїдальних режимах споживання електроенергії. Основою розвитку ТКРП у даному напрямі слід визнати удосконалення принципів побудови системи керування.

Багато робіт, наприклад [1-4], присвячено розробці принципів керування ТКРП на основі виділення тим чи іншим способом сигналу першої гармоніки струму з подальшим визначенням кута керування тиристорами на основі формули [5], що пов'язує амплітуду реактивного струму першої гармоніки ФР з кутом керування тиристорів.

$$I_1 = I_{\max} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right), \quad (1)$$

де $I_{\max} = U/(\omega L)$ – струм, що протікає в реакторі з індуктивністю L під дією напруги мережі амплітудою U з кутовою частотою ω ; α – кут відкриття тиристорів.

Якщо розглядати однофазний ФР, то очевидно, що сигнал керування (кут відкриття тиристорів) може бути заданий не частіше ніж один раз на півперіод. Тобто, для досягнення граничної швидкодії СК ТКРП має відпрацьовувати зміну струму навантаження і відповідно змінювати кут відкриття тиристорів кожні півперіоду. Слід зазначити, що в несинусоїдальному режимі при керуванні ФР на основі сигналу лише першої гармоніки реалізація граничної швидкодії ускладнена. Основна складність викликана необхідністю виділення сигналу реактивної складової першої гармоніки струму. З цією метою пропонують [1-4] використовувати фільтрацію або інтегрування добутку миттєвих значень струму на опорний сигнал, проте такий підхід не дозволяє досягти граничної швидкодії та високої точності компенсації, що обумовлено неідеальністю характеристик фільтра.

У роботі [6] запропонований альтернативний підхід до принципу керування ТКРП, який ґрунтується на вирішенні задачі мінімізації функціоналу діючого значення споживаного з мережі струму, що дорівнює сумі струмів нелінійного навантаження i_R , конденсаторної частини ТКРП та струму ФР i_L

$$J_1 = \int_0^T i_M^2(t) dt = \int_0^T (i_x(t) + i_L(\alpha, t))^2 dt, \quad (2)$$

де i_M – струм споживаний навантаженням та ТКРП з мережі; $i_x(t)$ – струм навантаження та конденсаторної частини ТКРП; T – період першої гармоніки; $i_L(\alpha, t)$ – струм ФР, що виражається формулою

$$i_L(\alpha, t) = \begin{cases} \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha), \alpha < \omega t < \pi - \alpha \\ \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t + \sin \alpha), \pi + \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (3)$$

Проте, побудова СК ТКРП на основі принципу мінімізації функціоналу (2) також не дозволяє досягти максимальної швидкодії та використати всі переваги запропонованого в [6] методу оптимальної компенсації, оскільки кут керування змінюється один раз за період, а не один раз за півперіод.

Метою наших досліджень є підвищення швидкодії ТКРП до граничної на основі методу оптимальної компенсації [6].

Поставлена задача зводиться до наближення заданої кривої струму навантаження функцією (3). Сказане можна пояснити рис.2.

При $t=0,01c$ напруга мережі u набуває мінімального значення (рис.2, а). У цей момент необхідно визначити кут відкривання тиристора ФР на другому півперіоді. Струм, споживаний з мережі, буде мінімальним у випадку, коли миттєві значення струму ФР в кожний момент часу будуть рівними за модулем і протилежними за знаком струму i_x , тобто $i_L(t) = -i_x(t)$. Оскільки в момент $t=0,01c$ значення струму i_x (рис.2, б) заздалегідь невідомі, то кут керування ФР знайдемо, виходячи з допущення, що струм i_x має півхвильову симетрію, тобто $i_x(t) = -i_x(t+T/2)$. Тоді задачею СК в момент $t=0,01c$ є знаходження такого кута керування тиристором на другому півперіоді, при якому струм ФР (рис.2, в) мінімально відхилявся б від значень, яких набував струм i_x на першому півперіоді.

Оскільки метою оптимальної компенсації є зменшення діючого значення струму, що споживається з мережі, а мінімум діючого значення струму відповідає мінімуму інтегралу квадрата миттєвого струму, то для оцінки близькості струму ФР i_L до струму i_x доцільно застосувати інтегральний квадратичний критерій. Таким чином, функціонал, що необхідно мінімізувати, щоб компенсація була оптимальною та мала максимальну швидкість, на відміну від (2), має вигляд:

$$J_2 = \int_0^{T/2} (i_x(t) - i_L(\alpha, t))^2 dt \quad (4)$$

Тоді шуканий кут керування тиристора, що забезпечить мінімальне діюче значення суми струмів навантаження та ТКРП знайдемо, розв'язавши рівняння

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\int_0^{T/2} (i_x(t) - i_L(\alpha, t))^2 dt \right) = 0. \quad (5)$$

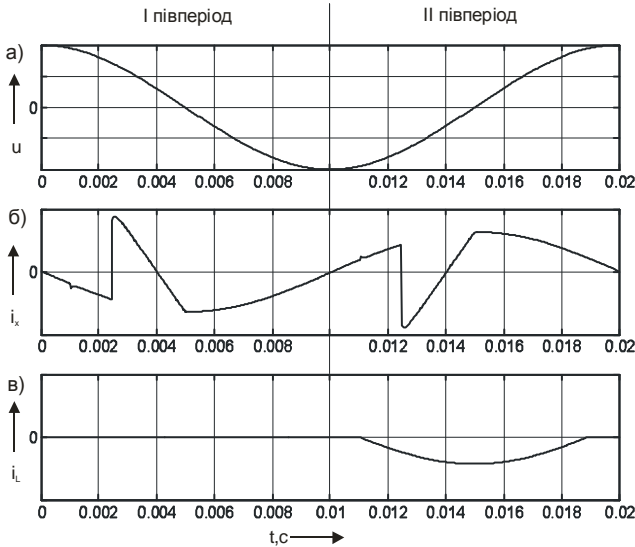


Рис.2 – Наближення кривої струму

Шляхом математичних перетворень отримаємо

$$-\frac{U \cos \alpha}{\omega L} \int_0^{T/2} (i_x(t) - i_L(\alpha, t)) dt = 0. \quad (6)$$

Відкинувши корінь $\alpha = \pi / 2$ як такий, що не має фізичного змісту, зробивши підстановку (3) в (6), проінтегрувавши та спростивши вираз, маємо

$$\int_0^{T/2} i_x(t) dt - \frac{2U}{\omega^2 L} \left[\cos \alpha + \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \right] = 0. \quad (7)$$

На основі рівняння (7) пропонується принцип керування ТКРП. Останній зводиться до зчитування інтеграла струму $i_x(t)$ в моменти досягнення напругою мережі амплітуди з послідовним вирішенням (одним з чисельних методів або використанням пошукової таблиці) рівняння (7) та встановлення для потрібного тиристора знайденого значення кута відкриття.

Для перевірки результатів досліджень було проведено математичне моделювання схеми, що зображена на рис.1.

Задачею ТКРП, що складається з реактора L , конденсатора C , тиристорів $VS1$ - $VS2$ та системи керування СК, є оптимальна компенсація струму тиристорного регулятора напруги (ТРН) на тиристорах $VS3$ - $VS4$ навантаженого активним опором R .

Моделювання перехідного процесу компенсації реактивного струму виконували за розробленою в середовищі MATLAB програмою, яка втілює принципи моделювання вентильних схем на основі метода сигнальних графів [7]. Кожні півперіоду в моменти досягнення напругою мережі амплітудного значення на основі розрахованих значень струму i_x СК здійснює обчислення кута керування відповідним тиристором шляхом знаходження кореня рівняння (7) методом ділення напіл.

Результати моделювання представлені на рис.3. Величини струмів представлені у відносних одиницях. Одиниці відповідає амплітудне значення струму навантаження ТРН i_R при повністю відкритих тиристорах $VS3$ - $VS4$.

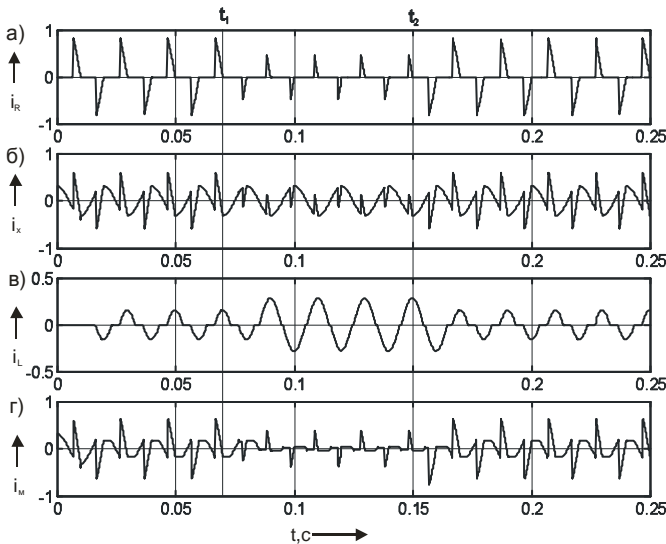


Рис.3 – Результати моделювання

У момент часу $t_1=0,07$ с відбувається збільшення кута керування тиристорами ТРН. При $t=t_2=0,15$ с кут відкривання тиристорів ТРН

зменшується. Відповідно в моменти часу t_1 та t_2 змінюється струм навантаження i_R (рис.3, а) та сумарний струм навантаження і конденсатора ТКРП i_x (рис.3, б). З рис.3, в видно, як СК на зміну струму навантаження відповідає зміною кута відкривання тиристорів ФР. На рис.3 г показано струм, споживаний від джерела живлення.

З результатів моделювання випливає, що система реагує на зміну струму навантаження із запізненням на 0,01÷0,015 с (залежно від моменту зміни струму навантаження).

Таким чином, розроблений принцип керування тиристорним компенсатором з метою оптимальної компенсації струму навантаження, що відрізняється від відомого [6] вдвічі вищою швидкістю. Результати математичного моделювання підтвердили, що максимальне запізнення запропонованого компенсатора складає півтора півперіоду (0,015 с). Результати досліджень можуть бути основою для розробки швидкодіючих оптимальних методів керування трифазними компенсаторами.

1.G.Fusco, A.Losi, M.Russo. Adaptive Voltage Regulator Design for Static VAR Systems. Control Engineering practice, No. 9, 2001.

2.Ивакин В.Н., Сысоева Н.Г., Худяков В.В. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы / Под ред. В.В.Худякова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 336 с.

3.Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности: Пер. с англ. / Под ред. Р.М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.

4.Яценко А.А., Точилин В.В., Пономарев В.А., Матюнин Ю.В. Кибернетическая модель системы пофазового управления тиристорным компенсатором реактивной мощности // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – №8. – С.99-104.

5.Худяков В.В., Чванов В.А. Управляемый статический источник реактивной мощности // Электричество. – 1969. – №1. – С.29-35.

6.A.Exposito, F.Vazquez, C.Mitchell. Microprocessor-Based Control of an SVC for Optimal Load Compensation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, 1992. – p.706-712.

7.Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем. – Харьков: Вища шк., 1986. – 160 с.

Отримано 26.02.2007

УДК 621.315.66

І.М.ПІЛІПЕНКО

ВАТ «Полтаваобленерго»

В.Ф.РОЙ, д-р фіз.-матем. наук

Харківська національна академія міського господарства

ДИНАМІКА ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ЛЕП У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Досліджуються причини відмов елементів повітряних ЛЕП під дією різноманітних зовнішніх факторів і пропонуються заходи щодо підвищення надійності їх функціональ-