

Для лінії 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська” досліджено небезпечні комутаційні процеси та наведено максимальні кратності перенапруг, що їх супроводжують.

1. Кадомская К. П., *Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник.* / К.П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 320 с. 2. Равлик О. М. *Програмный комплекс для дослідження електротехнічних систем* / О. Равлик, Т. Гречин, Г. Лисяк // *Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці: 1-а Міжнародна наук.–техн. конф., 19–22 вересня 1995 р.: тези доп.* – Львів, 1995. – С. 79. 3. Улахович Д. А. *Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособ.* – СПб.: БХВ – Петербург, 2009. – 816 с. 4. Чеботарев В. И. *Волновые процессы в длинных линиях: учеб. пособ. для самостоятельной работы студентов физических специальностей.* – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 117 с.

УДК 621.316.727

Є. І. Федів, О. М. Сівакова

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електропостачання промислових підприємств міст  
і сільського господарства

## КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З СИЛОВИМИ ВИПРЯМЛЯЧАМИ

© Федів Є. І., Сівакова О. М., 2016

**Запропоновано спосіб узгодженого керування декількома силовими випрямлячами технологічних установок систем електроспоживання для забезпечення динамічної компенсації реактивної потужності в електромережі живлення.**

**Ключові слова:** система електроспоживання, реактивна потужність, силовий випрямляч, закриваючий тиристор.

**With the purpose of providing dynamic compensation of reactive power in power network, we offer the method of coordinated control for several power rectifiers of technological mechanisms of power supply systems.**

**Key words:** power supply system, reactive power, power rectifier, gate off thyristor.

### Постановка проблеми

Для ефективного та надійного електропостачання вузлів навантажень важливо підтримувати постійний баланс реактивної потужності і в усталених, і перехідних режимах роботи розподільної електромережі. Баланс реактивної потужності в усталених режимах забезпечує належну якість електроенергії та економічну ефективність роботи розподільних електромереж. Дефіцит реактивної потужності в перехідних режимах системи електроспоживання, що виникає за заниженого рівня чи провалу напруги живлення, приводить до порушення стійкості роботи електродвигунного навантаження. Для комплексного забезпечення балансу реактивної потужності потрібні плавно регульовані швидкодійні джерела реактивної потужності з можливістю їх форсування під час електромеханічних перехідних процесів.

### Аналіз останніх досягнень та публікацій

Практично єдиними джерелами реактивної потужності, які відповідають зазначеним вимогам, в системах електроспоживання можуть бути синхронні двигуни технологічних установок, облад-

нані пристроями АРЗ для форсування збудження. В [1–3] автори показали можливість роботи силових випрямлячів у режимах генерації реактивної потужності, за умови виконання їх на повністю керованих напівпровідникових вентилях. Отже, для систем електроспоживання з силовими випрямлячами технологічних установок можна отримати додаткове джерело реактивної потужності, яке можна використати для розв’язання задач забезпечення балансу реактивної потужності і в нормальних експлуатаційних режимах, і під час складних та тривалих перехідних електромеханічних процесів у вузлах навантаження.

### Задача досліджень

Дослідити умови забезпечення балансу реактивної потужності в системах електроспоживання засобами керування силовими випрямлячами технологічних установок.

### Виклад основного матеріалу

У нормальних режимах роботи керування випрямлячами здійснюють за вимогами основної технології. Традиційно керовані силові випрямлячі є споживачами реактивної потужності за рахунок штучного зсуву основної гармоніки струму щодо напруги живлення під час їх керування зміною моментів часу вступання в роботу напівпровідникових вентилів. За наявності у вузлі навантаження декількох керованих випрямлячів технологічних установок, з метою сприяння балансу реактивної потужності в розподільній електромережі, пропонується частину з них експлуатувати в режимі роботи з випередженням основної гармоніки струму живлення за рахунок узгодженого керування ними зміною моментів закривання напівпровідникових вентилів, тобто в режимі генерації в електромережу реактивної потужності.

Для прикладу розглянемо вузол навантаження з двома паралельно працюючими трифазними випрямлячами В1 та В2, виконаними за мостовою схемою. Випрямляч В1 виконаний на звичайних напівкерованих тиристорах, а випрямляч В2 – на повністю керованих чи двоопераційних (закриваючих) тиристорах (рис. 1). До складу вузла електричного навантаження з силовими перетворювачами зазвичай входять системи керування, фільтри вищих гармонік струму та обмеження комутаційних перенапруг.

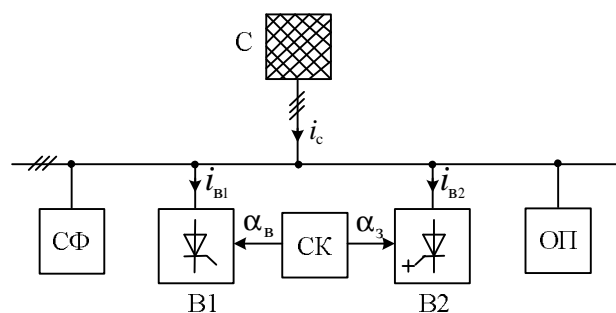


Рис. 1. Принципова схема вузла навантаження: В1, В2 – силові випрямлячі; СК – система керування; СФ – система фільтрів; ОП – обмежувач перенапруг

кутів  $\alpha_3$ . Тобто випрямляч В2 працюватиме зі зсувом першої гармоніки струму живлення у бік випередження відносно напруги джерела, а значить генеруватиме реактивну потужність. Часова діаграма вхідного струму такого випрямляча наведена на рис. 2, б. З метою наочності ілюстрації уведених понять на рис. 2 наведені часові діаграми струмів випрямлячів для випадку відсутності згладжувального реактора ( $L_d = 0$ ).

Проведено гармонічний аналіз струму у фідері живлення  $i_c(\vartheta) = i_{B1}(\vartheta) + i_{B2}(\vartheta)$ . За припущення живлення від джерела заданої напруги, ідеального згладжування випрямленого струму

( $L_d = \infty$ ) та нехтування кутом комутації вентилів випрямляча В1 ( $\gamma = 0$ ) отримані такі формули для амплітуд косинусної та синусної членів розкладу вхідного струму в ряд Фур'є:

$$A_{mn,c} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin\left(n \frac{\pi}{3}\right)}{n} \left\{ I_{d,B1} \cos\left[n\left(\alpha_B + \frac{\pi}{3}\right)\right] + I_{d,B2} \cos\left[n\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{3}\right)\right] \right\},$$

$$B_{mn,c} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin\left(n \frac{\pi}{3}\right)}{n} \left\{ I_{d,B1} \sin\left[n\left(\alpha_B + \frac{\pi}{3}\right)\right] + I_{d,B2} \sin\left[n\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{3}\right)\right] \right\},$$

де  $n$  – номер гармоніки струму;  $I_{d,B1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{E_m}{R_{d,B1}} \cos(\alpha_B)$ ,  $I_{d,B2} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{E_m}{R_{d,B2}} \sin\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{6}\right)$  – середні значення випрямлених струмів випрямлячів;  $E_m$  – амплітуда фазової ЕРС джерела живлення;  $R_{d,B1}$ ,  $R_{d,B2}$  – резистанси навантаження випрямлячів.

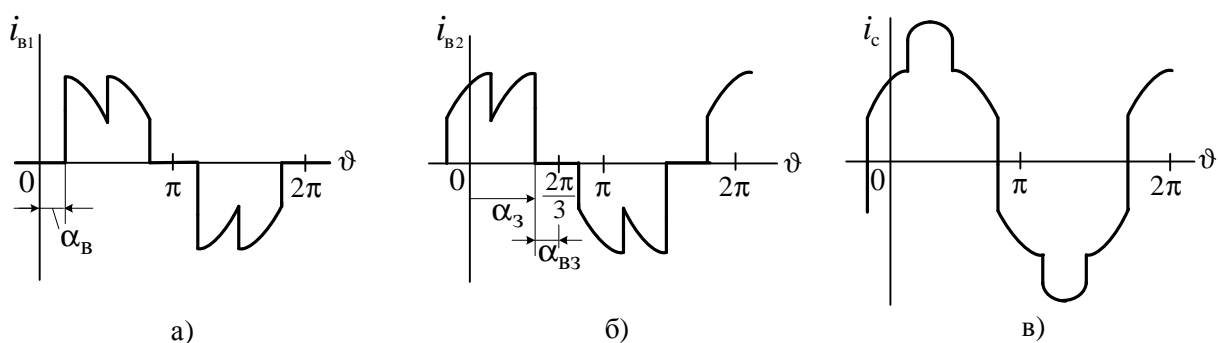


Рис. 2. Часові діаграми струмів однієї фази на вході трифазних мостових випрямлячів з активним навантаженням: а – керованих відкриттям вентилів; б – керованих закриттям вентилів; в – сумарний струм живлення випрямлячів

Наведені вирази дають змогу обчислити амплітуду та фазу кожної з гармонік струму живлення для розрахунку енергетичних характеристик та оцінки електромагнітної сумісності роботи випрямлячів з електромережею живлення.

Наприклад, значення реактивної потужності зсуву, яка передається від джерела живлення до вузла навантаження з випрямлячами, можна оцінити за виразом  $Q_{1,c} = \frac{3}{2} E_m I_{m1,c} \sin(\varphi_{1,c})$ , де

$I_{m1,c} = \sqrt{A_{m1,c}^2 + B_{m1,c}^2}$  – амплітуда струму основної гармоніки;  $A_{m1,c}$ ,  $B_{m1,c}$  – значення коефіцієнтів розкладу для першої гармоніки струму живлення, які обчислюють за виразами:

$$A_{m1,c} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ I_{d,B1} \cos\left(\alpha_B + \frac{\pi}{3}\right) + I_{d,B2} \cos\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{3}\right) \right],$$

$$B_{m1,c} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ I_{d,B1} \sin\left(\alpha_B + \frac{\pi}{3}\right) + I_{d,B2} \sin\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{3}\right) \right].$$

З урахуванням того, що за точку відліку кутів керування прийнято момент часу появи додатної анодної напруги на вентилях випрямляча, кут зсуву основної гармоніки струму відносно напруги живлення визначаємо, як:

$$\varphi_{1,c} = \arctg\left(\frac{A_{m1,c}}{B_{m1,c}}\right) - \frac{\pi}{6}.$$

Для двох комплектів випрямлячів В1 та В2, під час їх роботи в режимі узгодженого навантаження зі струмами  $I_{d,B1} = I_{d,B2} = I_d$ , що забезпечується рівністю модулів кутів керування вентилями  $\alpha_B = \alpha_{B3}$ , амплітуду струму основної гармоніки можна визначити за формулою

$$I_{m1,c} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} I_d \sqrt{1 + \cos(2\alpha_B)},$$

де  $\alpha_{B3} = \frac{2\pi}{3} - \alpha_B$  – кут випередження закривання вентилів випрямляча В2, що для закриваючого тиристора є аналогією терміну для кута  $\alpha_B$  – запізнення відкривання вентилів випрямляча В1 (рис. 2).

Узагальнюючи наведені вище залежності, можна розрахувати енергетичні показники та характеристики вузла навантаження з  $k = r + s$  випрямлячами, поділених на дві групи, на основі таких виразів для амплітуд косинусної та синусної складової розкладу в ряд Фур'є струму живлення вузла:

$$A_{mn,c} = \frac{12E_m}{\pi^2} \frac{\sin\left(n\frac{\pi}{3}\right)}{n} \left\{ \sum_{i=1}^r \left[ \frac{\cos(\alpha_{B_i})}{R_{d_i}} \cos\left[n\left(\alpha_{B_i} + \frac{\pi}{3}\right)\right] \right] + \sum_{j=1}^s \left[ \frac{\sin\left(\alpha_{3_j} - \frac{\pi}{6}\right)}{R_{d_j}} \cos\left[n\left(\alpha_{3_j} - \frac{\pi}{3}\right)\right] \right] \right\}, \quad (1)$$

$$B_{mn,c} = \frac{12E_m}{\pi^2} \frac{\sin\left(n\frac{\pi}{3}\right)}{n} \left\{ \sum_{i=1}^r \left[ \frac{\cos(\alpha_{B_i})}{R_{d_i}} \sin\left[n\left(\alpha_{B_i} + \frac{\pi}{3}\right)\right] \right] + \sum_{j=1}^s \left[ \frac{\sin\left(\alpha_{3_j} - \frac{\pi}{6}\right)}{R_{d_j}} \sin\left[n\left(\alpha_{3_j} - \frac{\pi}{3}\right)\right] \right] \right\}, \quad (2)$$

де  $r$  – кількість випрямлячів, керованих відкриванням вентилів, а  $s$  – кількість випрямлячів, керованих закриванням вентилів.

За допомогою отриманих виразів (1), (2) можна розв'язувати задачі пошуку оптимальних алгоритмів управління одночасно працюючими випрямлячами в системі електроспоживання за заданими критеріями, наприклад, забезпечення заданого значення коефіцієнта реактивної потужності на ввіді живлення вузла навантаження, або мінімізація гармонічного спотворення синусоїдальності кривої струму живлення чи його  $n$ -ї гармонічної складової.

На рис. 3 наведені регульовальні характеристики випрямлячів вузла навантаження з двома випрямлячами, керованими за умовою  $\alpha_B = \alpha_{B3}$ .

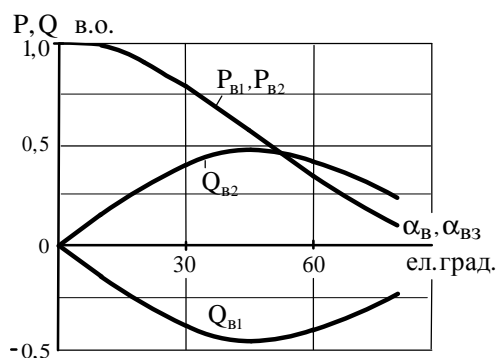


Рис. 3. Залежності активної та реактивної потужностей на вході випрямлячів від кута управління вентилями

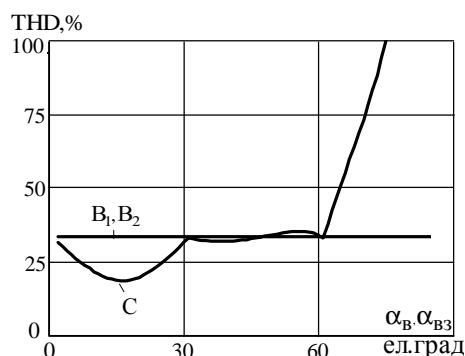


Рис. 4. Залежності коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струмів живлення від кута управління вентилями

За базову потужність прийнято активну потужність на виході некерованого режиму випрямляча ( $\alpha_B = \alpha_{B3} = 0$ ). Як бачимо, особливістю керованого випрямляча, як джерела реактивної потужності, є сприятливий характер регульовальної характеристики за реактивною потужністю в

широкому діапазоні кутів управління (до 45 ел. град). Тобто, сумарно, за прийнятих умов керуванні випрямлячі не споживають з мережі живлення реактивної потужності зсуву. Потреба випрямляча В1 в реактивній потужності зсуву забезпечується її генерацією випрямлячем В2. Якщо випрямляч В1 виконати на повністю керованих вентилях, то в режимах зі заниженими рівнями напруги живлення, чи на час її провалу, випрямляч В1 системою керування переводять у режим генерації реактивної потужності і отримують значний ресурс для покриття дефіциту реактивної потужності під час електромеханічного перехідного процесу роботи електричних двигунів у системі електроспоживання.

Проаналізовано вплив запропонованого узгодженого способу керування випрямлячами у вузлі навантаження на їх електромагнітну сумісність з розподільною мережею живлення. З цією метою досліджено вплив режиму роботи випрямлячів на два показники, пов'язані з державним стандартом на якість електроенергії, оскільки гармонічні складові струму, розтікаючись по елементах мережі, приводять до спотворення напруги на шинах приєднання приймачів електроенергії. Це – коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму живлення трифазних мостових випрямлячів

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=6k \pm 1}^{40} (I_n)^2}}{I_1} \cdot 100 \% , \text{ та } K_{I(n)} = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \% - \text{коефіцієнт } n\text{-ї гармонічної складової струму,}$$

де  $k=1,2,\dots$ , які опосередковано характеризують можливе спотворення напруг у живильній електромережі. Що більші значення вказаних коефіцієнтів, то більший ступінь негативного впливу випрямлячів на якість електроенергії в системі електропостачання.

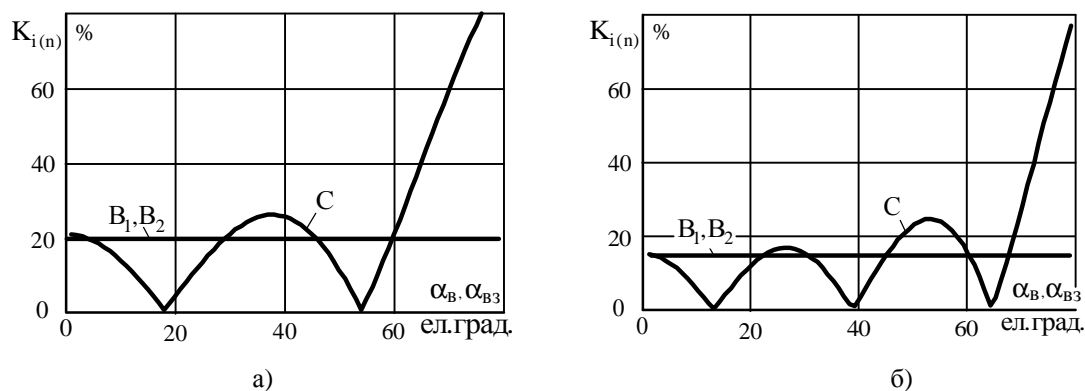


Рис. 5. Залежності коефіцієнта  $n$ -ї гармонічної складової струмів на вході випрямлячів (В1, В2) та мережі живлення (С) від кута управління вентилями для:  
а – 5-ї гармоніки струму; б – 7-ї гармоніки струму

Аналіз показав, що за умови узгодженого симетричного керування вентилями випрямлячів В1 і В2, окрім скомпенсованого зсуву фаз струмів основної частоти, в діапазоні кутів керування  $\alpha_B = \alpha_{B3} = 0 \div 30$  ел. град отримуємо покращення синусоїдальності форми сумарного струму, що споживає вузол навантаження від джерела живлення, стосовно струмів на вході кожного з випрямлячів (рис. 4). У вказаному діапазоні кутів керування струм від джерела живлення за умови ідеального згладжування випрямленого струму має триступеневу форму на кожному з півперіодів основної частоти  $(0, I_d, 2I_d)$ , а струми на вході випрямлячів – класичну двоступеневу форму  $(0, I_d)$ . У діапазоні кутів керування  $\alpha_B = \alpha_{B3} = 30 \div 60$  ел. град струми живлення вузла та окремих випрямлячів за ступенем спотворення синусоїдальності форми практично збігаються, бо перелічені струми мають двоступеневу форму. За кутів керування  $\alpha_B = \alpha_{B3} > 60$  ел. град різко зростає несинусоїдальність форми струму живлення вузла навантаження, бо протилежний зсув фаз струмів на

вході випрямлячів разом зі скороченням тривалості провідного стану вентилів приводить до перервного характеру сумарного струму на кожному півперіоді промислової частоти.

На рис. 5 наведені розраховані залежності домінуючих 5-ї та 7-ї гармонічних складових у сумарному струмі живлення трифазних мостових випрямлячів від кутів керування вентилями, висновки з яких подібні до описаного вище характеру зміни коефіцієнта  $THD$ . Практично прямо-лінійний характер залежностей для коефіцієнтів  $THD$  і  $K_{I(n)}$ , які описують вхідні струми випрямлячів (рис. 4, 5), є підтвердженням відомого співвідношення, що для режимів неперервного ідеально згладженого випрямленого струму відносно значення амплітуди вищих гармонік у струмі

живлення трифазного мостового випрямляча можна наближено визначити, як  $\frac{I_{m(n)}}{I_{m(1)}} \approx \frac{1}{n}$ .

### Висновки

1. Запропонований спосіб узгодженого керування силовими випрямлячами в системі електроспоживання сприяє забезпеченню балансу реактивної потужності в різних режимах роботи електромережі живлення.

2. Отримані результати дослідження дають змогу оцінити баланс реактивної потужності в системі електроспоживання з довільною кількістю випрямлячів, які працюють у заданому режимі, а також оцінити їх вплив на якість електричної енергії. 3. Виявлено діапазон кутів узгодженого керування випрямлячами зі зниженим рівнем спотворення синусоїдальності кривої струму від джерела живлення.

*1. Никонець Л. О. Енергетичні характеристики трифазного випрямляча вузла навантаження в режимі видачі реактивної потужності / Л. О. Никонець, О. М. Сівакова, Є. І. Федів // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2008. – № 30. – С. 210–216. 2. Федів Є. І. Силові випрямлячі систем електропостачання з покращеним коефіцієнтом реактивної потужності / Є. І. Федів, О. М. Сівакова // Вісник Приазовського технічного університету: зб. наук. пр. – Вип. 18. – Ч. 2. – Маріуполь, 2008. – С. 60–64. 3. Сівакова О. М. Особливості фазового керування силовими випрямлячами електропостачальних систем / О. М. Сівакова, Є. І. Федів // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2008. – № 615: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 133–140.*