

ний використовувались відомі дослідницькі електричні мережі IEEE. Результати аналізу показали, що розроблений метод в представленому вигляді має обмежену область застосування і тому виникає необхідність розробки нового методу без визначених в ході дослідження недоліків. Також в ході дослідження встановлено, що для будь-якої електричної мережі існує власний оптимальний рівень введення джерел розподіленої генерації, який хоч і зростає при збільшенні кількості цих джерел в мережі, однак не залежить від розмірності мережі і невідомий без попередніх досліджень. Бібл. 11, рис. 8, табл. 4.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, метод Монте-Карло, оптимальний рівень введення, оптимізація, розподілена генерація.

L. Lukianenko, I. Goncharenko

Institute of electrodynamics of the National academy of sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Critical examination of the previously developed Monte-Carlo method for distributed generation optimal placement

Constant growth of distributed generation (DG) in power systems has not only positive changes. Incorrect placement of DG can worsen steady-state parameters of a power grid, for example, voltage profile. Method for optimal DG placement had been developed previously [1, 4, 5, 10, 11]. The object of this paper was to critically examine the proposed method performance on different power grids. Examination of the method has been carried out on the IEEE 9-, 14-, 39- and 57-bus test systems. The results of simulation tests show that this method has limited usage. Performance of the method greatly depends on power grid. In particular, method extremely fast finds optimal DG placement in 14-bus test system; however, optimal DG placement in 57-bus test system requires to perform the amount of calculations, which is comparable to the amount of possible solutions. Besides, simulation data analysis shows that there is some optimal penetration of DG in the power grid, which rises with the number of DG sources in the power grid, but does not depend on the power grid size and is unknown without previous examination. References 11, figures 8, tables 4.

Key words: distributed generation, Monte-Carlo method, optimal penetration, optimization, renewable energy sources.

Надійшла 06.12.2016

Received 06.12.2016

УДК 621.316

СПОСІБ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СТРУМУ СИСТЕМИ МЕРЕЖА – ТИРИСТОРНИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

О.І. Чиженко, докт. техн. наук, **І.В. Трач**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: trachi@ied.org.ua

Запропоновано спосіб регулювання реактивної потужності, що генерується тиристорним регульованим компенсатором (ТРК) у мережу, який полягає у тому, що у процесі плавного регулювання здійснюється перемикавання під навантаженням відпайок обмоток індуктивних реакторів Rk_3 , чим забезпечується суттєве покращення якості вхідного струму ТРК (він же струм мережі) шляхом зменшення місткості у ньому вищих гармонік. Бібл. 3, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: електрична мережа, ТРК, регулювання реактивної потужності, якість струму, коефіцієнт гармонік струму.

При розробці тиристорних компенсаторів (ТРК) для компенсації реактивної потужності в електричних мережах одним з важливіших питань є якість вхідного струму приладу, місткість у ньому вищих гармонік. Не менш важливе питання – якими матеріальними затратами досягається бажаний результат, зокрема, представляє вагомий інтерес яка встановлена потужність пристрою та елементів, з яких він складається, які їх масогабаритні показники. З'ясування кореляції між цими питаннями у конкретному ТРК є метою цієї роботи. Цей аналіз проводиться з урахуванням впливу параметрів електричної мережі.

У роботі [1] було проаналізовано електромагнітні квазістатичні процеси, що протікають у моделі системи мережа – мостовий ТРК з плавним регулюванням у широкому діапазоні реактивної потужності. Отримано аналітичні співвідношення у замкнутому вигляді для струмів і напруги на елементах моделі, за якими було визначено інтегральні показники для вхідного струму ТРК (він же й струм мережі) і з'ясовано, що коефіцієнт гармонік K_r струму мережі у цій моделі не перевищує 3 %. Для подальшого зменшення значень K_r , тобто для покращення якості струму мережі, пропонується використовувати у цій системі модифікований варіант мостового ТРК. На рис. 1 зображена схема моделі системи з модифікованим ТРК. Вона відрізняється від розглянутої в роботі [1] наявністю проміжних відпайок у обмотках реакторів Rk_3 та допоміжних керованих вентилів $S1...S6$ для підключення цих відпайок. Інші позначення на рис. 1 співпадають з прийнятими у роботі [1].

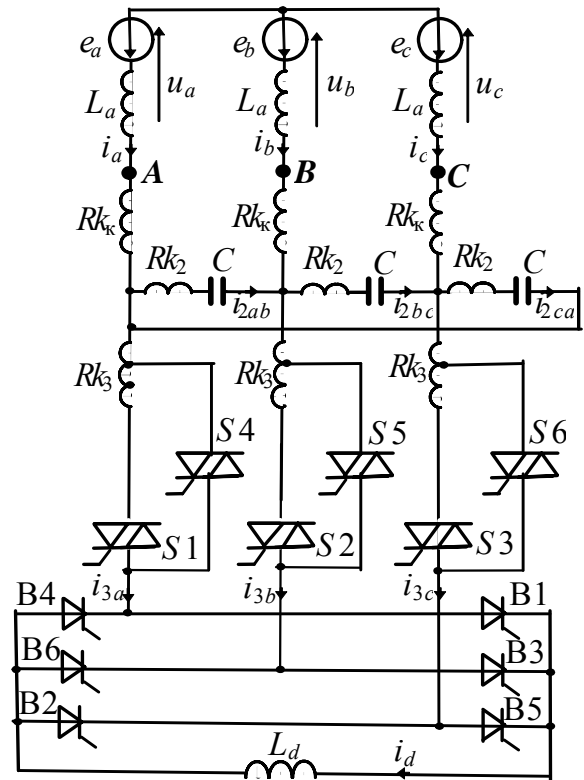


Рис. 1

Для порівняння різних модифікацій ТРК оцінимо спочатку встановлену потужність його обладнання у режимі, коли відпайки обмоток реакторів Rk_3 не перемикаються (при цьому нехай вентиля $S4...S6$ постійно відкриті). Приймаємо, що максимальна реактивна потужність, яка генерується у мережу трьома фазами ТРК, дорівнює $Q_{max} = 20,91$ квар, тоді максимальна реактивна потужність Q_f , що генерується однією фазою ТРК, складає $Q_{fmax} = Q_{max} / 3 = 6,97$ квар. З роботи [2] відомо, що зміною кута регулювання α вентилів $B1...B6$ (від режиму ХХ вентильного мосту, зібраного на вентилях $B1...B6$, до режиму його КЗ, який має місце, коли одночасно пропускають струм постійно по чотири вентиля) у ТРК здійснюється плавне регулювання реактивної потужності Q_f у діапазоні

$$Q_{fmin} = \frac{x_C - 3x_3 - x_2}{(x_C - x_2)(x_1 + x_3) - 3x_1x_3} E^2 \leq Q_f \leq \frac{3}{x_C - x_2 - 3x_1} E^2 = Q_{fmax}, \quad (1)$$

де $x_C = 1/\omega C$; $x_1 = \omega(L_a + L_k)$, L_a – індуктивність розсіювання мережі; L_k, L_2, L_3 – індуктивності реакторів Rk_1, \dots, Rk_3 відповідно; $x_2 = \omega L_2$; $x_3 = \omega L_3$; $\omega = 2\pi f$, f – частота живлячої мережі (далі $f = 50$ Гц); $E = 220$ В – діюче значення фазної напруги мережі.

Якщо ввести у розгляд множники особистих частот коливальних контурів у колі ТРК [1] $\mu^2 = x_C/x_2$; $\eta^2 = x_C/(3x_1 + x_2)$, то для Q_{fmax} матимемо

$$Q_{fmax} = \frac{3\eta^2 E^2}{\eta^2 - 1 x_C}. \quad (2)$$

Звідки

$$x_C = \frac{3\eta^2 E^2}{\eta^2 - 1 Q_{fmax}}, \quad x_2 = \frac{x_C}{\mu^2}. \quad (3)$$

Вхідний контур ТРК здебільшого настроюють на відсутню у мережі третю гармоніку, а фільтр $L_2 - C$ на найвагомішу п'яту гармоніку струму, тобто $\eta = 3$, $\mu = 5$. При таких значеннях параметрів η і μ з формул (3) маємо $x_C = 23,436$ Ом; $C = 135,8$ мкФ; $x_2 = 0,937$ Ом; $L_2 = 2,984$ мГн. Максимальний струм через елементи C і L_2 протікає у режимі ХХ вентильного мосту (усі вентиля $B1...B6$ закриті), він дорівнює $I_{CL2max} = I_{fmax} / \sqrt{3} = Q_{fmax} / \sqrt{3} E$, тобто у випадку, що розглядається $I_{CL2max} = 18,292$ А. У режимі ХХ вентильного мосту в моделі (рис. 1)

протікає синусний струм (вищі гармоніки у струмі відсутні), тому встановлена потужність конденсаторної батареї та реакторів Rk_2 визначаються так:

$$S_{3C} = 3I_{CL2\max}^2 x_C; \quad S_{3L2} = 3I_{CL2\max}^2 x_2. \quad (4)$$

При обраних параметрах ТРК: $S_{3C} = 23,52$ кВА; $S_{3L2} = 0,941$ кВА.

Параметр x_1 знаходиться з рівняння у правій частині співвідношення (1), яке можна переписати у вигляді

$$x_1 = \frac{x_C - x_2}{3} - \frac{E^2}{Q_{f\max}} = \frac{\mu^2 - 1}{3\mu^2} x_C - \frac{\eta^2 - 1}{3\eta^2} x_C = \frac{\mu^2 - \eta^2}{3\mu^2\eta^2} x_C. \quad (5)$$

Для випадку, що розглядається, з рівняння (5) знаходимо $x_1 = x_a + x_k = 0,556$ Ом. Для розподільного трансформатора потужністю 63 кВА параметр $x_a = 0,135$ Ом. Якщо до цього параметра додати x_a проводів лінії передачі та інше, то в результаті можна отримати приблизне значення $x_a = 0,2$ Ом. Таким чином, для реактора Rk_k маємо: $x_k = \omega L_k = 0,356$ Ом; $L_k = 1,133$ мГн. Через цей реактор протікає фазний струм мережі I_f , який у режимі XX вентиляного моста – синусний, тобто максимальне значення цього струму дорівнює $I_{f\max} = Q_{f\max}/E$. У нашому випадку $I_{f\max} = 31,682$ А, звідки встановлена потужність цих реакторів $S_{3L_k} = 3(I_{f\max})^2 x_k = 1,072$ кВА.

Величина параметра x_3 залежить від глибини регулювання реактивної потужності, що подається ТРК у мережу, і знаходиться з рівняння у лівій частині співвідношення (1). Наприклад, при глибині регулювання 50 % у лівій частині цього рівняння підставляємо $Q_{f\min} = 0,5 Q_{f\max}$. Це рівняння відповідає режиму КЗ вентиляного моста (коли постійно одночасно відриті по чотири вентиля з шести (В1...В6)), тому вхідний струм – синусний (вищі гармоніки в ньому відсутні). Після тотожних перетворень з рівняння у лівій частині співвідношення (1) знаходимо

$$x_3 = \frac{(\mu^2 - 1)\eta^2}{\mu^2} \cdot \frac{E^2 + x_1 Q_{f\min}}{3\eta^2 \frac{E^2}{x_C} - (\eta^2 - 1)Q_{f\min}}. \quad (6)$$

При глибині регулювання 50 %: $x_3 = 15,6$ Ом; $L_3 = 50$ мГн, $d = x_3/x_1 = 28,06$. Оскільки при максимальному навантаженні реактора Rk_3 струм через нього є синусним, то реактивна потужність $Q_{L3\max}$, що при цьому споживається цим реактором у одній фазі, дорівнює $Q_{L3\max} = Q_{f\max} - Q_{f\min}$. Ця величина і є встановленою потужністю фази цього реактора, тобто потужність усіх трьох реакторів Rk_3 дорівнює $S_{3L3} = 3(Q_{f\max} - Q_{f\min})$. У випадку глибини регулювання 50 % у ТРК з обраними вище параметрами $S_{3L3} = 0,5Q_{\max} = 10,455$ кВА. Максимальний струм реактора Rk_3 , що визначає величину перерізу проводу, яким намотана котушка реактора, знаходиться за формулою

$$I_{L3\max} = \sqrt{\frac{Q_{f\max} - Q_{f\min}}{x_3}}. \quad (7)$$

У ТРК, що розглядається, $I_{L3\max} = 14,9$ А, $S_{L3} = S_{3L3}/3 = 3,485$ кВА.

При глибині регулювання величини Q_{\max} 50 %, як було показано в роботі [1], параметр L_d має бути якнайменшим. Виберемо параметр $b = L_d/L_1 = 0,1$ (при цьому $L_d = 0,177$ мГн). Значення $b = 0$ – небажане, оскільки наявність невеликої індуктивності L_d покращує режим роботи вентилів В1...В12. При такому значенні параметра b вагоме регулювання реактивної потужності у ТРК практично відбувається тільки при кутах регулювання $\alpha \geq \pi/3$. Кут α відмірюється від точки перетину кривих напруги фаз мережі. При $\alpha < \pi/3$ реактивна потужність, що генерується таким ТРК у мережу, практично незмінна і близька до значення $Q_{\min} = 3Q_{f\min}$. У нашому випадку при глибині регулювання 50 % – $Q_{\min} = 10,455$ квар.

Діючі значення випрямлених струму i_d і напруги u_d при кутах керування α на більш значимому їх інтервалі $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi/2$ підраховуються за формулами

$$I_{Ld} = \frac{\sqrt{6}E}{x_1} \sqrt{\frac{3}{\pi} \left(\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} i_{d1}^2(\vartheta) d\vartheta + \int_{\pi-\alpha}^{\pi/3+\alpha} i_{d2}^2(\vartheta) d\vartheta \right)},$$

$$U_{Ld} = \sqrt{6}E \sqrt{\frac{3}{\pi} \left(\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} u_{d1}^2(\vartheta) d\vartheta + \int_{\pi-\alpha}^{\pi/3+\alpha} u_{d2}^2(\vartheta) d\vartheta \right)},$$
(8)

де $\vartheta = \omega t$, t – поточна часова координата; функціями $i_{d1}(\vartheta)$ і $u_{d1}(\vartheta)$ позначено миттєві значення струму i_d і напруги u_d для інтервалу електричних кутів ϑ , що відповідає нерівності $\alpha \leq \vartheta \leq \pi - \alpha$, а функціями $i_{d2}(\vartheta)$ і $u_{d2}(\vartheta)$ позначено те ж саме тільки для інтервалу $\pi - \alpha \leq \vartheta \leq \pi/3 + \alpha$; аналітичні вирази для функцій $i_{d1}(\vartheta)$, $i_{d2}(\vartheta)$, $u_{d1}(\vartheta)$ і $u_{d2}(\vartheta)$ наведено у роботі [1]. При виведенні формул (8) враховувалося, що у шестипульсному мостовому ТРК період випрямлених струму і напруги дорівнює $\pi/3$, тому в цих формулах інтегрування здійснюється на відрізку $\alpha \leq \vartheta \leq \pi/3 + \alpha$. Максимальних значень струм i_d і напруга u_d набувають при КЗ вентильного моста – у випадку, що розглядається, приблизно при $\alpha = \pi/3$. Підставивши у формулах (8) під інтегралами замість $i_{d1}(\vartheta)$, $i_{d2}(\vartheta)$, $u_{d1}(\vartheta)$ і $u_{d2}(\vartheta)$ їх вирази з роботи [1], для нашого випадку при $\alpha = \pi/3$ і глибини регулювання 50 % підраховуємо: $I_{Ld\max} = 19,8$ А, $U_{Ld\max} = 0,34$ В. Звідки встановлена потужність $S_{Ld} = I_{Ld\max} U_{Ld\max}$ дроселя L_d дорівнює $S_{Ld} = 6,7$ ВА.

Для сумарної встановленої потужності $S_{\Sigma L}$ всіх індуктивних елементів ТРК маємо

$$S_{\Sigma L} = S_{3Lk} + S_{3L2} + S_{3L3} + S_d, \quad (9)$$

для ТРК з обраними параметрами – $S_{\Sigma L} = (1,072 + 0,941 + 10,455 + 0,007)$ кВА = 12,475 кВА.

Таким чином, недоліками ТРК за розглянутою схемою є те, що на кожний кіловольтампер реактивної потужності, яка ним генерується, необхідно S_{3C}/Q_{\max} кВА встановленої потужності конденсаторної батареї (у випадку, що розглядається, $23,52 / 20,91 = 1,125$ квар), а також дуже вагома встановлена потужність реакторів. Ці недоліки притаманні ТРК, реалізованим за принципом непрямої компенсації [3].

Вагомою перевагою ТРК, що аналізується, яка зумовлює його ефективність застосування на практиці, є висока якість його вхідного струму (тобто струму мережі), що знімає необхідність у потужних послідовних LC-фільтрах вищих гармонік, які зазвичай встановлюються на вході ТРК при альтернативних схемах. Для оцінки якості вхідного струму ТРК, що розглядається, використовуємо такі формули:

$$I(U)_z = N \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} (i(u)_{zA1}^2 + i(u)_{zB1}^2 + i(u)_{zC1}^2) d\vartheta + \int_{\pi-\alpha}^{\pi/3+\alpha} (i(u)_{zA2}^2 + i(u)_{zB2}^2 + i(u)_{zC2}^2) d\vartheta \right]};$$

$$I_{f(1)} = -\frac{6}{\pi} \cdot \frac{E}{x_1} \left[\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} (i_{A1}(\vartheta) \sin(\vartheta - \pi/6) + i_{C1}(\vartheta) \sin(\vartheta + \pi/6)) d\vartheta + \int_{\pi-\alpha}^{\pi/3+\alpha} (i_{A2}(\vartheta) \sin(\vartheta - \pi/6) + i_{C2}(\vartheta) \sin(\vartheta + \pi/6)) d\vartheta \right], \quad (10)$$

$$K_{\Gamma} = \sqrt{I_f^2 - I_{f(1)}^2} / I_{f(1)}.$$

Формули (10) справедливі для струмів і напруги на елементах ТРК, що розташовані тільки у колі змінного струму; в першій формулі $N = \sqrt{3}E / x_1$, якщо вона використовується для підрахунку діючого значення струму на елементі ТРК, і $N = \sqrt{3}E$, якщо для діючого значення напруги позначення $I(U)_z$ у першій формулі вказує на те, що за цією формулою може підраховуватися як діюче значення струму, так і напруги z -го елемента кола ТРК, тобто z – це спільне узагальнене позначення елементів C , L_k , L_2 , L_3 (при підрахуванні діючих значень струмів і напруги на конкретному з цих елементів, індекс z замінюється одним з індексів із

C, L_K, L_2, L_3 , які позначають конкретний елемент кола); $i(u)_{zA1}, i(u)_{zB1}, i(u)_{zC1}$ – миттєві значення струму i_z або напруги u_z z -го елемента відповідно у фазах A, B, C на інтервалі електричного кута ϑ , що відповідає нерівності $\alpha \leq \vartheta \leq \pi - \alpha$; $i(u)_{zA2}, i(u)_{zB2}, i(u)_{zC2}$ – те ж саме тільки для інтервалу $\pi - \alpha \leq \vartheta \leq \pi/3 + \alpha$; у другій формулі i_{A1} та i_{C1} – миттєві значення вхідного фазного струму відповідно фаз A і C на інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \pi - \alpha$; i_{A2} та i_{C2} – те ж саме тільки для інтервалу $\pi - \alpha \leq \vartheta \leq \pi/3 + \alpha$; аналітичні вирази для миттєвих значень струмів і напруги усіх елементів кола ТРК наведено у роботі [1]; у третій формулі K_r – коефіцієнт гармонік вхідного (мережі) струму.

При виведенні формул (10) враховувалася симетрія за фазами, яка притаманна електромагнітним процесам ТРК, що розглядається.

Підставляючи у формули (10) вирази для миттєвих значень струмів і напруги на елементах ТРК, здійснюємо розрахунок інтегральних характеристик цих струмів і напруги на цих елементах. Результати розрахунків для інтервалу кутів керування $60 \text{ ел. град.} \leq \alpha \leq 90 \text{ ел. град.}$ (їм відповідає діапазон регулювання $0,5Q_{\max} \leq Q \leq 0,96Q_{\max}$) зведено до табл. 1.

На рис. 2 для цього ж випадку при $d = 28,06$ побудовано залежність $K_{r(d=28)}(Q)$ коефіцієнта гармонік K_r [%] від реактивної потужності Q , що генерується трьома фазами ТРК у мережу. По осі абсцис на рис. 2 відкладається відносна величина Q/Q_{\max} . Частини характеристик на рис. 2, що відповідають інтервалу регулювання $0,96 Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$ (йому співвідносяться кути регулювання $90 \text{ ел. град.} \leq \alpha \leq 180 \text{ ел. град.}$, при яких у ТРК має місце режим перервних випрямлених струмів) побудовано за розрахунками, проведеними у ліцензійній версії програмного комплексу Matlab R2014a для моделі ТРК, що розроблена у пакеті SimPowerSystem.

Таблиця 1

Розрахунок для випадку $Q_{\max} = 20,91$ квар; $x_1 = 0,556$ Ом; $\eta = 3$; $\mu = 5$; $d = 28,06$; $b = 0,1$											
α , [град]	60	63	66	69	72	75	78	81	84	87	90
Q , [квар]	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,4	17,4	18,3	19,1	20,0
I_f , [А]	15,8	17,4	18,901	20,428	21,939	23,4	24,9	26,3	27,7	29,0	30,2
$I_{f(1)}$, [А]	15,8	17,4	18,900	20,427	21,938	23,4	24,9	26,3	27,7	29,0	30,2
K_r , [%]	0,001	0,47	0,67	0,70	0,64	0,56	0,47	0,40	0,33	0,27	0,23
I_C , [А]	17,60	17,67	17,74	17,80	17,87	17,94	18,00	18,06	18,12	18,17	18,22
U_C , [В]	413	414	416	417	419	420	422	423	425	426	427
I_{L3} , [А]	14,7	13,2	11,8	10,4	9,07	7,72	6,39	5,09	3,83	2,61	1,47
U_{L3} , [В]	229	218	206	194	180	166	151	134	116	95,1	69,2
I_{Ld} , [А]	19,8	17,7	15,7	13,7	11,8	9,9	8,1	6,4	4,7	3,2	1,8

З графіка $K_{r(d=28)}(Q)$ та таблиці видно, що для усього діапазону регулювання (при глибині регулювання 50 %) коефіцієнт гармонік не перевищує 0,7 %.

Подальшого покращення якості вхідного струму ТРК (він же струм мережі) можна досягти, якщо у процесі регулювання величини Q при деякому її значенні $Q = Q_0$ здійснити стрибкоподібну зміну параметра d . Технічно це досягається перемиканням відпайки в обмотках реакторів Rk_3 за допомогою вентилів $S1 \dots S6$. Перемикання відпайки здійснюється за проміжок часу, коли у струмі i_{L3} через реактор Rk_3 має місце нульова пауза. На рис. 3 за співвідношеннями, отриманими у роботі [1], побудовані часові діаграми для струму $i_{L3}(\vartheta)$ при різних значеннях кута управління α вентилями $V1 \dots V6$. На цьому рисунку $\alpha \leq \vartheta \leq 2\pi + \alpha$ по осі абсцис відкладаються значення кута ϑ у електричних градусах, а по осі ординат – миттєві значення відносної величини $i_{L3} / (\sqrt{3}E / x_1)$. З діаграм рис. 3 видно, що при $\alpha > 60$ ел. град. нульова пауза у струмі i_{L3} завжди існує, тому перемикання відпайки вентилями $S1 \dots S6$ при цих кутах відбувається у звичайному режимі.

Роботу модифікації ТРК з відпайкою у реакторі Rk_3 пояснимо за допомогою характеристик, наведених на рис. 2. На інтервалі регулювання реактивної потужності $0,5Q_{\max} \leq Q \leq Q_0$ вентилялі $S1 \dots S3$ закриті, а $S4 \dots S6$ – відкриті (див. схему рис. 1). У цьому випадку струм про-

тікає через частину обмотки реактора Rk_3 . На рис. 2 регулюванню на цьому інтервалі відповідає характеристика $K_{\Gamma(d=28)}(Q)$ зі значенням параметра $d = 28,06$. Індуктивність задіяної при цьому в роботі частини обмотки реактора Rk_3 при такому значенні параметра d , як було показано вище, дорівнює $L_{3(28)} = 50$ мГн. Через цю частину обмотки протікає струм, максимальне значення якого становить $I_{L3\max(d=28)} = 14,9$ А.

Щойно при регулюванні в бік зростання реактивна потужність досягає значення $Q = Q_0$, вентиля $S4 \dots S6$ закриваються, а $S1 \dots S3$, навпаки, відкриваються, внаслідок чого струм i_{L3} протікає вже через усю обмотку реактора Rk_3 , індуктивність задіяної у роботі обмотки реактора стрибкоподібно зростає, опір x_3 – теж, відповідно до цього діюче значення струму I_{L3} зменшується. Таким чином, на діапазоні $Q_0 \leq Q \leq Q_{\max}$ регулювання подовжується вже при іншому значенні параметра d – на характеристиках рис. 2 цьому діапазону відповідає крива $K_{\Gamma(d=32)}(Q)$ – характеристика для випадку, коли параметр $d = 32$. При значенні $d = 32$ (за умови незмінності інших параметрів ТРК) $L_{3(d=32)} = 57$ мГн, $x_{3(d=32)} = 17,8$ Ом. Значення Q_0 отримуємо з рівняння у лівій частині формули (1), підставивши у ньому розраховані для $d = 32$ параметри: $x_{1(d=32)} = 0,556$ Ом, $x_{2(d=32)} = 0,937$ Ом, $x_C = 23,436$ Ом і $x_{3(d=32)} = 17,8$ Ом. У результаті знаходимо $Q_{0f} = 4,228$ квар, $Q_0 = 3Q_{0f} = 12,683$ квар. Максимальне діюче значення струму $I_{L3\max(d=32)}$ через обмотки, що вступили у роботу внаслідок закриття вентилів $S4 \dots S6$ і відкриття вентилів $S1 \dots S3$, підраховуємо за формулою (7), де $Q_{f\min} = Q_{0f} = 4,228$ квар і $x_3 = 17,8$ Ом, у результаті отримуємо $I_{L3\max(d=32)} = 13,1$ А. Тобто ця частина обмотки може виконуватися проводом з перерізом, що відповідає меншій щільності струму. У цьому випадку різниця $I_{L3\max(d=28)} - I_{L3\max(d=32)} = 1,8$ А відносно невелика, але в інших випадках, як буде показано далі, вона може набирати суттєво більших значень, що зумовлює при запропонованому способі регулювання економію міді проводів обмоток та зниження масогабаритних показників реакторів Rk_3 .

Головною перевагою такого способу регулювання є покращення якості вхідного струму ТРК. Дійсно, при регулюванні величини Q за цим способом описаному вище переходу з одного значення параметра d на інший, наприклад з $d = 28,06$ на $d = 32$, на рис. 2 відповідає стрибкоподібний перехід з однієї характеристики $K_{\Gamma(d=28)}(Q)$ на характеристику $K_{\Gamma(d=32)}(Q)$. В результаті для інтервалу регулювання $0,5Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$ модифікованому ТРК (з перемиканням у процесі регулювання відпайки в обмотках реакторів Rk_3) на рис. 2 відповідає ламана крива $K_{\Gamma}(Q)$, що цілком вміщує характеристику $K_{\Gamma(d=32)}(Q)$, яка відповідає значенню $d = 32$ і застосовується для діапазону $Q_0 \leq Q \leq Q_{\max}$, і початкову (в порядку зростання величини Q) частину характеристики $K_{\Gamma(d=28)}(Q)$ – з $d = 28,06$, яка реалізується при $0,5Q_{\max} \leq Q \leq Q_0$. Як видно з рис. 2, ця ламана крива цілком лежить нижче значення $K_{\Gamma} = 0,575$ %, а після стрибка параметра d спочатку суттєво нижче характеристики $K_{\Gamma(28)}(Q)$, тобто є значно кращою за характеристику немодифікованого ТРК з незмінним у процесі регулювання параметром $d = 28,06$.

Стрибок параметра d при регулюванні величини Q супроводжується й стрибком кута α . Це пов'язано з тим, що значенню $Q = Q_0$ на кривих $K_{\Gamma(d=28)}(Q)$ і $K_{\Gamma(d=32)}(Q)$ відповідають різні значення α . Тому для забезпечення неперервності та монотонності регулювання величини Q в ТРК за період перемикання відпайки реактора Rk_3 система керування вентилями одночасно має відпрацьовувати і відповідну стрибкоподібну зміну кута α . Для визначення значень кутів α , що відповідають значенню $Q = Q_0$ на обох характеристиках ($K_{\Gamma(d=28)}(Q)$ і $K_{\Gamma(d=32)}(Q)$), необхідно розв'язувати трансцендентні рівняння. Розгляд цих рівнянь виходить за межі цієї роботи.

На практиці перемикання відпайок обмоток реакторів Rk_3 здійснюється не при значенні $Q = Q_0$, а при дещо більшому значенні реактивної потужності $Q = Q_0 + \partial Q$, яке відповідає куту $\alpha = \pi/3 + \partial\alpha$, при якому у струмі i_{L3} є нульова пауза, під час якої і здійснюється згадане перемикання. Величини ∂Q і $\partial\alpha$ залежать від швидкодії напівпровідникових пристроїв, що використовуються як вентиля $B1 \dots B6$.

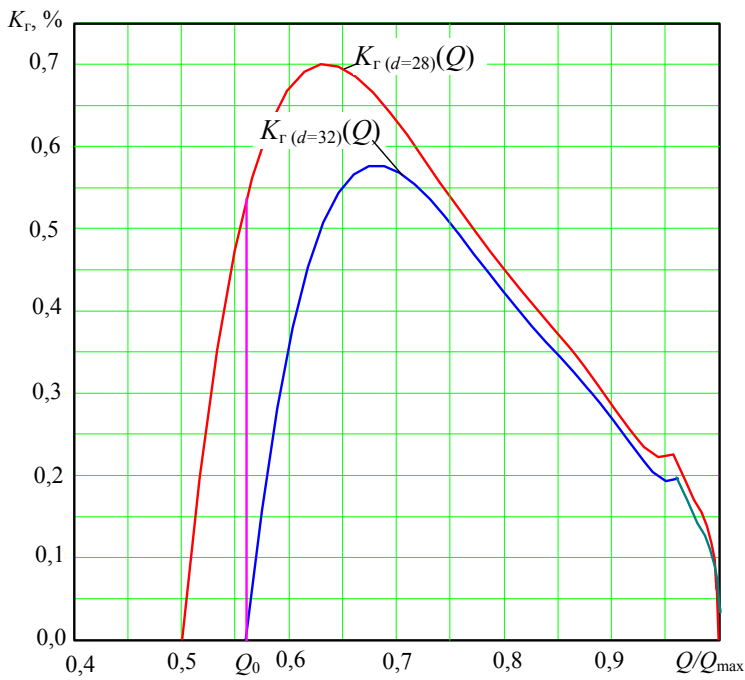


Рис. 2

$=1,5 \cdot 10^{-3}$ Ом; $S_{3L2} = 1,5$ вар. При цьому всі розрахунки параметрів та характеристик ТРК здійснювалися за методикою, наведеною вище, для значення $\mu = 125$. У цьому випадку індуктивність $L_2 = 4,8$ мкГн зів'язана з індуктивністю розсіювання з'єднувальних проводів, тобто індуктивні реактори Rk_2 у ТРК відсутні. Застосувавши для випадку $\mu = 125$ формули (6), отримуємо:

1) для глибини регулювання 50 % (при цьому $Q_{f \min} = 0,5 Q_{f \max}$) $x_3 = 16,6$ Ом; $d = x_3/x_1 = 19,1$; $L_{3(d=19)} = 53$ мГн; $I_{L3 \max}(d=19) = 14,5$ А; $S_{3L3} = 10,46$ квар;

2) для глибини регулювання 40 % (при цьому $Q_{f \min} = 0,6 Q_{f \max}$) $x_3 = 21$ Ом; $d = x_3/x_1 = 24,2$; $L_{3(d=24)} = 67$ мГн; $I_{L3 \max}(d=24) = 11,5$ А; $S_{3L3} = 8,4$ квар.

Для ТРК з параметром $\mu = 125$ на рис. 4 побудовано характеристики $K_r(d=19)(Q)$ і $K_r(d=24)(Q)$, відповідно до значень параметрів $d = 19,1$ та $d = 24,2$.

Як видно з рис. 4, якщо в ТРК застосовується звичайний спосіб регулювання за характеристикою $K_r(d=19)(Q)$, то коефіцієнт гармонік K_r при регулюванні сягає значень 2,7 %. Коли ж застосовується запропонований спосіб регулювання з перемиканням при значенні $Q = Q_0 = 0,6 Q_{f \max}$ відпайки обмотки реактора Rk_3 , що супроводжується стрибкоподібною зміною параметра d , то значення K_r зменшуються і не перебільшують 2 %. На рис. 4 стрибкоподібній зміні параме-

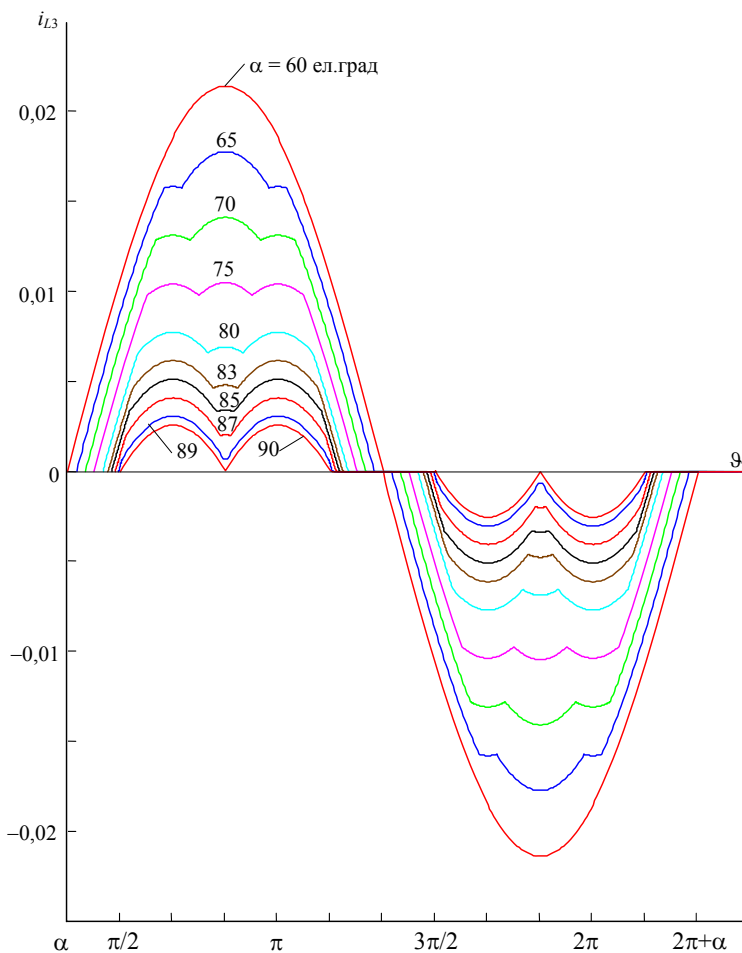


Рис. 3

тра d відповідає перехід з однієї регульовальної характеристики $K_r(Q)$ на іншу. При цьому різниця струмів $I_{L3\max(d=19)} - I_{L3\max(d=24)} = 3$ А, що обумовлює суттєву економію міді у перерізу проводу обмотки реактора Rk_3 , яка задіяна в діапазоні регулювання $0,6Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$ (індуктивність цієї частини обмотки складає $L_{3(d=24)} - L_{3(d=19)} = 14$ мГн), чим забезпечує також зменшення масогабаритних показників реакторів Rk_3 .

Сумарна встановлена потужність індуктивних реакторів у ТРК з параметром $\mu = 125$ складає:

$$S_{\Sigma L} = S_{3LK} + S_{3L2} + S_{3L3} + S_d =$$

$$= (2,0 + 0,0015 + 10,46 + 0,025) \text{ квар} =$$

$$= 12,49 \text{ квар}.$$

Таким чином, встановлена потужність індуктивних елементів у цьому ТРК, незважаючи на видалення з нього реакторів Rk_2 , практично така ж сама, що і у випадку $\mu = 5$. Це пояснюється тим, що у розглянутому випадку для забезпечення незмінним значення параметра $\eta = 3$ необхідно збільшити встановлену потужність реакторів Rk_k . На практиці не має потреби жорстко дотримуватись значення $\eta = 3$, можливі невеликі його варіації, тобто не має потреби радикально підвищувати встановлену потужність реактора Rk_k . У результаті оптимізації параметра η можливе зменшення показника $S_{\Sigma L}$.

Розрахунки діючих значень напруги та струмів ТРК з параметром $\mu = 125$, виконані для інтервалу регулювання $0,5Q_{\max} \leq Q \leq 0,95Q_{\max}$ за формулами (8) і (10), зведено до табл. 2. При значенні $Q = Q_0 = 0,6Q_{\max} = 12,55$ квар у ТРК здійснюється перемикання відпайок у обмотках реакторів Rk_3 , що відображено у табл. 2.

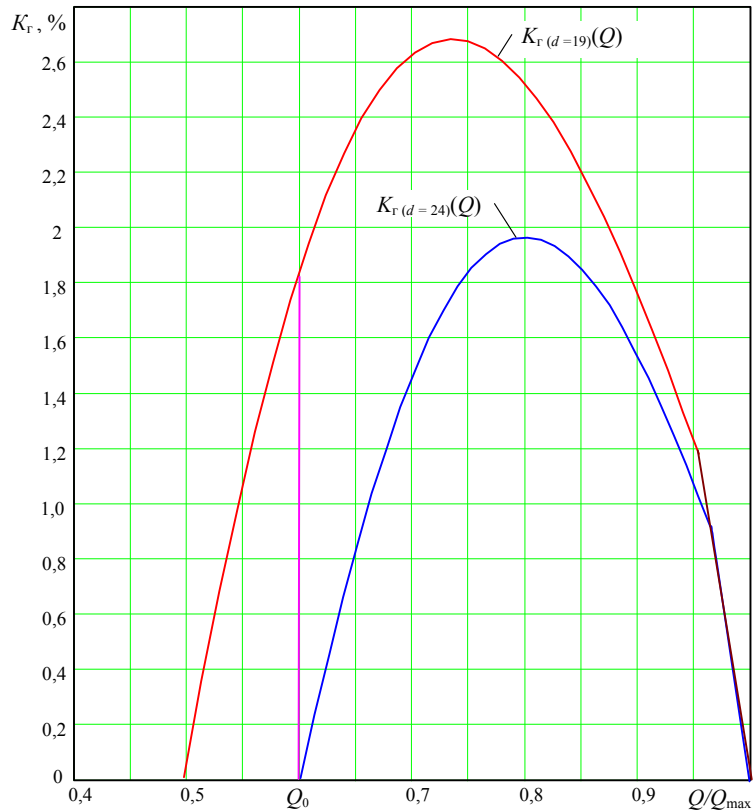


Рис. 4

Таблиця 2

Розрахунок для випадку $Q_{\max} = 20,91$ квар; $x_1 = 0,868$ Ом; $\eta = 3$; $\mu = 125$; $b = 0,1$																
	$d = 19,1$					$d = 24,2$										
α , [град]	60	62	64	66	66,45	61	63	66	69	72	75	78	81	84	87	90
Q , [кВАр]	10,4	11,1	11,7	12,4	12,55	12,8	13,3	14,1	14,9	15,7	16,5	17,3	18,0	18,8	19,5	20,1
I_f , [А]	15,8	16,8	17,81	18,802	19,03	19,4	20,2	21,4	22,6	23,8	25,0	26,2	27,3	28,4	29,5	30,5
$I_{f(1)}$, [А]	15,8	16,8	17,80	18,799	19,02	19,4	20,2	21,4	22,6	23,8	25,0	26,2	27,3	28,4	29,5	30,5
K_r , [%]	0,007	0,68	1,23	1,72	1,81	0,23	0,66	1,20	1,60	1,85	1,96	1,93	1,79	1,55	1,25	0,92
I_C , [А]	17,27	17,3	17,4	17,47	17,48	17,5	17,55	17,6	17,7	17,8	17,9	17,95	18,0	18,1	18,15	18,2
U_C , [В]	405	406	408	409	410	410	411	413	415	417	419	420	422	424	425	427
I_{L3} , [А]	14,1	13,2	12,3	11,5	11,26	10,9	10,2	9,13	8,08	7,04	6,00	4,99	3,98	3,00	2,05	1,16
U_{L3} , [В]	234	227	219	212	210	233	225	214	202	188	174	159	142	122	100	73,3
I_{Ld} , [А]	19,0	17,7	16,4	15,2	14,9	14,7	13,8	12,1	10,6	9,1	7,7	6,3	5,0	3,7	2,5	1,4

Висновки. 1. Запропоновано ефективний спосіб регулювання реактивної потужності, що генерується ТРК за схемою рис. 1 у мережу, який полягає у тому, що у процесі регулювання здійснюється перемикання під навантаженням відпайок обмоток індуктивних реакторів Rk_3 , чим забезпечується покращення якості вхідного струму ТРК (струму мережі) шляхом зменшення місткості у ньому вищих гармонік.

2. Запропонований спосіб регулювання дає змогу тільки при одній відпайці реактора Rk_3 суттєво знизити коефіцієнт гармонік вхідного струму ТРК (струму мережі) до 0,525 % (для $\mu = 5$, тобто при відношенні $x_C/x_2 = 5^2$) і до менш ніж 2 % (для $\mu = 125$, тобто при відношенні $x_C/x_2 = 125^2$). Використання декількох відпайок у реакторі Rk_3 , що перемикаються під навантаження у процесі регулювання реактивної потужності, забезпечить ще більш радикальне зменшення цього показника якості вхідного струму.

3. Впровадження запропонованого методу регулювання сприяє економії міді у обмотках реакторів Rk_3 , чим покращує їх масогабаритні показники та такі показники ТРК у цілому.

4. Запропонований спосіб дає змогу без суттєвих втрат у якості вхідного струму відмовитись у обладнанні ТРК від цілої групи реакторів, а саме від реакторів Rk_2 .

1. Чиженко О.І., Трач І.В. Аналіз електромагнітних процесів у системі мережа–ТРК у режимі плавного регулювання реактивної потужності. Оцінка впливу параметрів мостового ТРК на його електромагнітну сумісність з мережею // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 45. – С. 20–29.
2. Чиженко А.И. Трехфазный вентильный индуктивно-емкостный источник реактивной мощности. – Киев, 1990. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики; № 662).
3. Auetul Gelen, Tankut Yalcinoz. An educational software package for Thyristor Switched Reactive Power Compensators using Matlab/Simulink // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2010. – N 18. – P. 366–377.

УДК 621.316

А.И. Чиженко, докт. техн. наук, **И.В. Трач**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Способ улучшения качества тока системы сеть – тиристорный компенсатор реактивной мощности

Предложен способ регулирования генерируемой тиристорным регулируемым компенсатором (ТРК) в сеть реактивной мощности, который заключается в том, что в процессе плавного регулирования осуществляется под нагрузкой переключение отпаяк обмоток индуктивного реактора Rk_3 , чем достигается существенное улучшение качества входного тока ТРК (он же ток сети), путем уменьшения в нем содержания высших гармоник. Библ. 3, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: электрическая сеть, ТРК, регулирование реактивной мощности, качество тока, коэффициент гармоник тока.

A.I. Chyzhenko, I.V. Trach

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

A method of improving the quality of the current in the system “network – controlled bridge thyristor compensator of reactive power”

Method of smooth controlling the reactive power in the electrical network using a thyristor reactive power compensator is proposed. Smooth control is carried out under a load by switching taps inductive reactor coils. Significant improvement in the quality of the input current is accomplished by reducing higher harmonics therein levels. Referenses 3, figures 4, tables 2.

Key words: network, thyristor reactive power compensator, regulation of reactive power, switching taps, inductive reactor coils, power quality, current harmonic distortion.

Надійшла 22.09.2016

Received 22.09.2016

УДК 621.314.5

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В МАГІСТРАЛЬНІ МЕРЕЖІ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

А.В. Білик

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: andret-2@mail.ru

Досліджено аспекти використання систем постійного струму в складі магістральних мереж змінної напруги. Розглянуто питання, пов'язані з гармоніками в мережах з системами високої напруги постійного струму