

## ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ІНДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ НА РЕЖИМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Чиженко О.І., докт.техн.наук, Трач І.В., канд.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
 e-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)

Досліджено вплив технологічних змін індуктивного опору  $x_a$  електричної мережі на характеристики та параметри тиристорного мостового компенсатора реактивної потужності, який встановлено з метою підтримання належних значень  $\cos\varphi$ . З'ясовано, що при збільшенні цього опору максимальне значення реактивної потужності, що може генерувати у мережу тиристорний компенсатор (ТРК), теж збільшується, але при цьому глибина регулювання реактивної потужності зменшується. Для покращення якості вхідного струму ТРК, тобто зменшення його коефіцієнта гармонік до значень менших 5%, пропонується в процесі регулювання під навантаженням змінювати індуктивність реактора, який увімкнено між конденсаторною батареєю і тиристорним мостом. Ці зміни відбуваються стрибкоподібно шляхом перемикавання за допомогою симисторів відпайок обмоток цих реакторів. При налаштуванні вхідного LC контуру ТРК на чотирикратну частоту з'являється можливість приєднання індуктивно-тиристорного регулятора безпосередньо до вершин трикутника встановленої в мережі конденсаторної батареї без втручання в її обладнання. Завдяки цьому з'являється можливість плавного регулювання реактивної потужності, яка генерується у мережу конденсаторною батареєю. Бібл. 13, табл. 3, рис. 2.

**Ключові слова:** індуктивність електричної мережі, тиристорний регулюємий компенсатор реактивної потужності, якість вхідного струму, коефіцієнт гармонік, глибина регулювання реактивної потужності.

Актуальною задачею при експлуатації електричних мереж є компенсація в них реактивної потужності, яка спрямована на підтримання у мережах належного значення  $\cos\varphi$ . Для вирішення цієї задачі застосовують різні засоби [10, 11, 13], зокрема ефективним є використання тиристорних регульованих компенсаторів реактивної потужності (ТРК). Зазвичай пристрої компенсації реактивної потужності встановлюють у кінці гілки фідерів радіальної електричної мережі для того, щоб зменшити повний струм, що протікає по усій довжині гілки фідера від місця встановлення пристрою до місця живлення фідера. Це призводить до покращення профілю напруги, зменшує активні втрати електричної енергії, збільшує пропускну спроможність фідерів [9, 12].

В електричних мережах в залежності від режимів споживачів протягом доби відбуваються відхилення її параметрів, зокрема змінюється повний опір електричної мережі у вузлах та відповідна індуктивність мережі  $L_a$ . Це пов'язано з характерними добовими, тижневими та річними змінами навантажень (тобто  $\cos\varphi_{\text{нав}}$  навантаження) в залежності від потреб технологій, що застосовуються на різних підприємствах [4], а також внаслідок змін конфігурації електричної мережі – підключенням або відключенням тих чи інших споживачів. Динаміка зміни параметра  $L_a$  впливає й на зміни режимів встановленої в мережі обладнання, зокрема ТРК.

Метою роботи є аналіз впливу відхилень  $\Delta L_a$  індуктивності  $L_a$  на режими та характеристики встановлених у мережі тиристорних компенсаторів реактивної потужності. Відхилення  $\Delta L_a$  індуктивності  $L_a$  вимірюємо у відсотках від її величини.

Розглянемо випадок підключення шестипульсового ТРК (рис. 1) на відстані від розподільчого трансформатора. У цьому ТРК відхилення  $\Delta L_a$  змінює параметри вхідного LC-контура (тобто контура  $L_a - L_k - L_2 - C$ ), власна частота якого  $\eta f$ , де  $f$  – частота живлячої мережі (при подальших розрахунках  $f = 50$  Гц) суттєво залежить від значень цієї індуктивності, а саме [3, 4]

$$\eta = [x_c / (3x_{L1} + x_{L2})]^{1/2}, \quad (1)$$

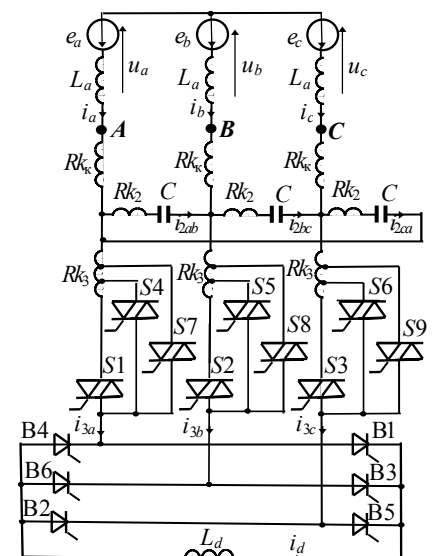


Рис. 1

де  $x_{L1} = \omega L_1$ ,  $L_1 = L_a + L_k$ ,  $L_k$  – індуктивність додаткового реактора  $Rk_k$ , який встановлюється для забезпечення необхідного значення  $\eta$  (тобто відповідного налаштування контура, якщо індуктивності мережі  $L_a$  для цього не вистачає),  $x_C = 1/\omega C$ ,  $C$  – ємність плеча трикутника конденсаторної батареї, реактивна потужність якої плавно регулюється ТРК,  $x_{L2} = \omega L_2$ , де  $L_2$  – індуктивність реактору  $Rk_2$ , що забезпечує належні режими функціонування конденсаторів  $C$ . У моделі системи мережа–ТРК на рис. 1 мережа змодельована трифазною системою ЕРС  $e_a, e_b, e_c$  з послідовно увімкненими до них індуктивностями  $L_a$ . При розрахунках режимів у моделі нехтуємо активними опорами мережі та елементів ТРК. Досліджується загальний випадок, не пов'язаний з розглядом конкретного навантаження (воно у обраній моделі відсутнє). Останнє може варіюватися у діапазоні, що обмежується тільки параметрами встановленого у мережі трансформатора. Така модель є коректною тому, що повний опір трансформатора на порядки менший опора приєднаного до трансформатора навантаження, тобто вплив конкретного навантаження на параметри моделі – надмалий.

Значення параметра  $\eta$  істотно впливає на якість вхідного струму, на вміст у ньому вищих гармонік. Чим менше  $\eta$ , тим вища якість вхідного струму, тим більш відфільтровані у ньому вищі гармоніки: для симетричного трифазного шестипульсного мостового ТРК (рис. 1) – це непарні некрратні трьом гармоніки. У роботах [5, 6] розглядалися режими, коли  $\eta=3$  (тобто вхідний  $LC$  контур ТРК налаштовано на відсутню у мережі третю гармоніку). Але це не завжди є оптимальним з точки зору масогабаритних показників обладнання ТРК. У багатьох випадках налаштування потребує встановлення потужних додаткових реакторів  $Rk_k$ , які значно погіршують техніко-економічні показники пристрою.

З формули (1) видно, що чим більше значення індуктивності мережі  $L_a$ , тим (при незмінних параметрах  $x_C$  і  $x_{L2}$ ) на меншу частоту  $\eta f$  настроєно вхідний контур, тобто збільшення параметра  $L_a$  у мережі супроводжується покращенням якості її струму. З іншого боку, чим менше значення параметра  $\eta$ , тим гірші масогабаритні показники обладнання ТРК. Таким чином, при розробці ТРК оптимальний вибір  $\eta$  з урахуванням обох цих факторів є актуальною проблемою.

Індуктивність  $L_a$  не може бути меншою суми індуктивності  $L_{тр}$  обмоток типового трансформатора, що встановлено у мережі, і індуктивності  $L_{лін}$  лінії передачі, тобто  $L_{a\min} = L_{тр} + L_{лін}$ . При виборі параметра  $\eta$  значення  $L_a = L_{a\min}$  з точки зору якості вхідного струму можна вважати найгіршим.

Нехай в мережі 10 кВ встановлено трансформатор ТМГ-1000/10/0.4-У1, який має напругу короткого замикання (КЗ) 6% [7] та індуктивність розсіювання обмоток  $L_{тр} = 27,2$  мкГн ( $x_{тр} = 0,0085$  Ом). Коефіцієнт завантаження трансформатора 0,9, повна потужність навантаження – 900 кВА,  $\cos \varphi = 0,8$ , тобто активна потужність 720 кВт, реактивна – 540 кВАр. Опір гілки від трансформатора до місця встановлення ТРК  $x_{лін}$  має індуктивний характер. У місці встановлення ТРК напруга номінальна.

При навантаженні мережі 720 кВт при  $\cos \varphi = 0,8$  розглянемо випадок, коли ТРК здатний компенсувати максимально можливу у такій системі реактивну потужність (остання обмежується реактивною складовою потужності встановленого трансформатора), тобто потужність ТРК  $Q_{\max} = 540$  кВАр. Виходячи з зазначеного вище по формулах, наведених у роботах [5, 6], для необхідної ємності отримуємо  $C = 3700$  мкФ ( $x_C = 0,86$  Ом). Для мінімізації потужності елементів ТРК приймаємо експериментально встановлене значення параметра  $\mu = \sqrt{x_C / x_{L2}} = 125$ , звідки маємо  $L_2 = x_C / \mu^2 \omega = 0,18$  мкГн  $\approx L_{тр}$ . Таке значення індуктивності порівняно з індуктивністю  $L_{тр}$  з'єднувальних проводів у плечах конденсаторної батареї, тобто реактори  $Rk_2$  у такому ТРК можна вважати відсутніми.

З метою подальшого суттєвого покращення масогабаритних показників даного ТРК приймаємо  $\eta = 4$ , коли можна відмовитися від встановлення додаткових реакторів  $Rk_k$ . Для цього місце підключення ТРК вибираємо таким, щоб параметр  $x_{лін} = 0,0093$  Ом, при цьому маємо падіння напруги

5,4%. Таким чином, мінімальне значення параметру  $x_a = \omega L_a$  у мережі, що розглядається, становить близько 0,018 Ом, тобто  $L_a = 57$  мкГн. Таке значення є цілком реальним для мереж 10 кВ.

Підставивши у (1) значення  $x_{L1} = x_a = x_{\text{тр}} + x_{\text{лін}} = 0,018$  Ом,  $x_2 = \omega L_{\text{тр}} = 5,5 \cdot 10^{-6}$  Ом та  $x_C = 0,86$  Ом, отримуємо  $\eta = 4$ . Нагадаємо, що в системі мережа–шестипульсний ТРК гармоніка з частотою  $4f$  відсутня, тобто налаштування вхідного контура на  $\eta = 4$  не викликає резонансні явища.

Регулятор, який складається з керованого вентиляного моста, зібраного на вентилях В1...В6, та увімкнених перед ним реакторів  $Rk_3$  з індуктивністю  $L_3$ , шляхом зміни кута керування  $\alpha$  цих вентилів (керування вентилями симетричне) здійснює плавне регулювання реактивної потужності  $Q_{(1)Rk3}$ , що споживається реакторами  $Rk_3$  на першій гармоніці струму. Таким чином, потужність  $Q_{(1)Rk3}$  є монотонною функцією кута регулювання  $\alpha$ , що далі позначаємо  $Q_{(1)Rk3}(\alpha)$ . У такому ТРК кути керування  $\alpha$  можуть змінюватися у діапазоні  $\pi/6 \leq \alpha \leq \pi$ . Цей регулятор (регулюючу частину ТРК) будемо називати реакторно-тиристорним регулятором.

Реактивна потужність, що генерується ТРК у мережу, дорівнює  $Q = Q_{(1)C} - Q_{(1)Rk3}(\alpha)$ , де  $Q_{(1)C}$  – реактивна потужність, що генерується конденсаторною батареєю на першій гармоніці. Розглянемо випадок, коли глибина регулювання реактивної потужності у ТРК становить 50%. Для розрахунків основних елементів ТРК та приблизних встановлених потужностей їхнього обладнання застосовуємо методику та формули, наведені у роботах [5, 6].

У результаті для елементів  $C, L_3$  і  $L_d$  відповідно отримуємо:

$$U_{C_{\max}} = 406,5 \text{ В}, S_C = U_{C_{\max}} I_{C_{\max}} = 192 \text{ кВА}, S_{3C} = 3S_C = 576 \text{ кВА}; L_3 = 1,9 \text{ мГн} (x_3 = \omega L_3 = 0,59 \text{ Ом}), \\ I_{L3_{\max}} = 389,6 \text{ А}, S_{L3} = U_{L3_{\max}} I_{L3_{\max}} = 90 \text{ кВА}, S_{3L3} = 3S_{L3} = 270 \text{ кВА}; L_d = 0,1 L_1 = 5,7 \text{ мкГн}, I_{Ld_{\max}} = 515,6 \text{ А}, \\ S_{Ld} = U_{Ld_{\max}} I_{Ld_{\max}} = 147 \text{ ВА}.$$

Таким чином при  $\eta = 4$  сумарна встановлена потужність  $S_{\Sigma L}$  всіх індуктивних елементів ТРК становить:  $S_{\Sigma L} = S_{3L3} + S_{Ld} = (270 + 0,147) \text{ кВА} = 270,1 \text{ кВА}$ .

Для порівняння розрахуємо встановлену потужність обладнання ТРК тієї самої потужності, що працює у тих самих умовах, але при  $\eta = 3$ , як це було прийнято у роботах [5, 6]. Для налаштування у такому ТРК вхідного  $LC$  контура на частоту  $3f$  потрібно введення допоміжних реакторів  $Rk_k$  з індуктивністю  $L_k = 5,1$  мГн і встановленою потужністю  $S_{Lk} = \omega L_k (I_{f_{\max}})^2 = 10,7$  кВА, де  $I_{f_{\max}} = 818,2$  А – максимальне діюче значення фазного струму такого ТРК,  $S_{3Lk} = 3S_{Lk} = 32,1$  кВА.

Таким чином, встановлена потужність індуктивних елементів ТРК з параметром  $\eta = 4$  на 32,1 кВА (тобто на 10,6% ) менша, ніж у ТРК з  $\eta = 3$ , який працює у тих самих умовах. Але ТРК з параметром  $\eta = 3$  має при звичайному регулюванні кращі показники якості вхідного струму.

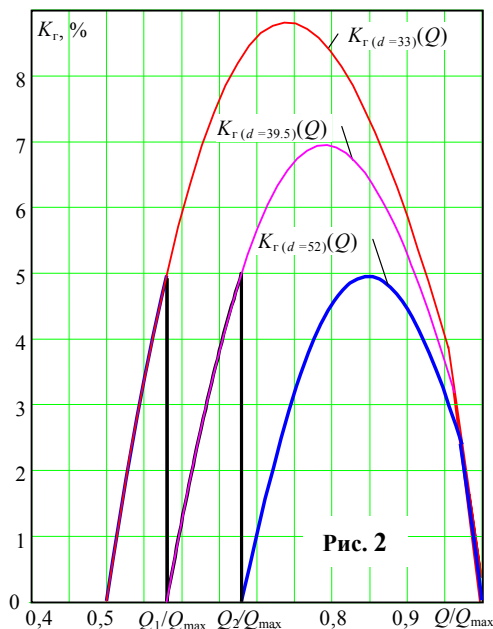
Вміст вищих гармонік у струмі мережі визначається коефіцієнтом гармонік  $K_r$ . Міжнародними стандартами [8] на величину цього коефіцієнта накладаються жорсткі обмеження в залежності від значення відношення  $I_{SC}/I_L$ , де згідно з позначеннями цього стандарту:  $I_{SC} = U/z_{к3}$  – струм короткого замикання мережі;  $z_{к3}$  – опір КЗ (у нашому випадку опір  $z_{к3}$  складається з опору КЗ трансформатора та опору ЛЕП);  $I_L$  – максимальний струм навантаження. Для системи, що розглядається, це відношення становить  $I_{SC}/I_L < 20$ . Стандартом [8] для таких систем регламентовано максимальне значення коефіцієнта гармонік  $K_{r_{\max}} = 5\%$ .

Характеристики, що ілюструють залежність коефіцієнту гармонік  $K_r(Q)$  від реактивної потужності, що генерується ТРК, для випадку  $\eta = 3$  представлені у роботах [5, 6], де також наведено розрахунки параметрів такого ТРК.

На рис. 2 наведено регулювальні характеристики  $K_r(Q)$  ТРК з  $\eta = 4$  ( $K_{r(d=33)}(Q), K_{r(d=39,5)}(Q)$  і  $K_{r(d=52)}(Q)$ ) для різних значень  $d = x_{L3}/x_{L1}$ , а саме  $d = 33; 39,5; 52$ . По осі ординат відкладаються

значення  $K_r$  у відсотках, а по осі абсцис – відносна реактивна потужність  $Q/Q_{\max}$ , що генерується ТРК у мережу,  $Q_1=312,8$  кВАр ( $Q_1/Q_{\max}=0,579$ ),  $Q_2=366,4$  кВАр ( $Q_2/Q_{\max}=0,678$ ).

Як видно з цих характеристик, при глибині регулювання реактивної потужності 50%, що можливо при значенні  $d=33$  (при цьому  $L_3=1,9$  мГн), максимальні значення коефіцієнта  $K_{r\max}$  сягають 9%, що перевищує його регламентовану стандартом [8] величину. Для зменшення максимальних значень  $K_{r\max}$  було запропоновано оригінальний спосіб регулювання [3].



У роботі [1] цей спосіб використано для регулювання реактивної потужності однофазного ТРК. В цих роботах під навантаженням змінювалася індуктивність дроселя у колі постійного струму вентильних мостових перетворювачів. Стосовно ТРК за схемою рис. 1 цей спосіб полягає у змінненні під навантаженням (тобто в процесі регулювання величини  $Q$ ) індуктивності  $L_3$  реакторів  $Rk_r$  (тобто на відміну від попереднього змінюються індуктивності реакторів у колі змінного струму ТРК аналогічно тому, як це розглядалося у роботі [2] для трифазного РЗН). А саме, при переході із одного діапазону регулювання величини  $Q$  на інший індуктивності  $L_3$  змінюються шляхом перемикавання відпайок обмоток реакторів за допомогою допоміжних симисторів  $S1\dots S9$ . Це супроводжується стрибкоподібним змінненням параметра  $d$ , що у результаті призводить до покращення якості вхідного струму ТРК. У випадку, що розглядається, достатньо застосування лише двох відпайок у обмотці реактору  $Rk_3$ , тобто обвитка реактора поділяється на

3 секції. При цьому всій обмотці реактору  $Rk_3$ , індуктивність якої  $L_{3(d=52)}=2,98$  мГн, відповідає значення  $d=52$  (має місце, коли  $S1\dots S3$  відкриті, а  $S4\dots S9$  – закриті), секції обмотки з індуктивністю  $L_{3(d=39,5)}=2,3$  мГн –  $d=39,5$  (відкриті  $S4\dots S6$ , а  $S1\dots S3$  та  $S7\dots S9$  – закриті), а секції обмотки з індуктивністю  $L_{3(d=33)}=1,9$  мГн –  $d=33$  (відкриті  $S7\dots S9$ , а  $S1\dots S6$  – закриті). Регульовальна характеристика  $K_r(Q)$  (на рис. 2 зображена жирною ломаною кривою) згідно з цим способом складається з окремих частин трьох характеристик  $K_{r(d=33)}(Q)$ ,  $K_{r(d=39,5)}(Q)$  і  $K_{r(d=52)}(Q)$  таким чином, що в діапазоні регулювання, що задається нерівністю  $0,5Q_{\max} \leq Q \leq Q_1$  ( $0,5 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,579$ ) вона співпадає з характеристикою  $K_{r(d=33)}(Q)$ ; в діапазоні, який відповідає нерівності  $Q_1 \leq Q \leq Q_2$  ( $0,579 \leq Q/Q_{\max} \leq 0,678$ ) – співпадає з характеристикою  $K_{r(d=39,5)}(Q)$ ; в діапазоні величини  $Q$  з нерівності  $Q_2 \leq Q \leq Q_{\max}$  ( $0,678 \leq Q/Q_{\max} \leq 1$ ) – з характеристикою  $K_{r(d=52)}(Q)$ . Тобто завдяки переключенням відпайок обмоток реакторів  $Rk_3$  та переходом однієї характеристики на іншу досягається значення  $K_r \leq 5\%$  в усьому діапазоні регулювання  $0,5 \leq Q/Q_{\max} \leq 1$ .

Максимальні значення струму  $I_{L3\max}$  через реактор  $Rk_3$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1			
Параметри	$d=33$	$d=39,5$	$d=52$
$L_3$ , мГн	1,9	2,3	2,98
$I_{L3\max}$ , А	389	356	310

Як видно, перша секція обмотки реактору повинна бути виконана проводом, розрахованим на струм 389 А, друга секція – на струм 356 А, а третя – на струм 310 А. При застосуванні для різних секцій обмотки намоточних проводів різного перерізу може бути досягнута економія міді проводів у порівнянні з випадком, коли вся обмотка реактору

$Rk_3$  виконується одним проводом, розрахованим на струм  $I_{L3(d=33)\max}=389$  А.

Із зростанням індуктивності мережі  $L_a$  зростає і максимальне значення  $Q_{\max}$  реактивної потужності, яке ТРК може генерувати у мережу, у той же час зменшується глибина  $\Delta Q$  регулювання цієї потужності. Розрахунки, що ілюструють, як змінюються характеристики ТРК з параметром  $d = 33$  при зміні індуктивності мережі, наведено у табл. 2.

$\Delta L_a, \%$	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
$\eta$	4	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0
$Q_{\max}, \text{кВАр}$	540	542	544	546	549	552	555	558	561	565	570
$\Delta Q, \%$ при $Q_{\max} - \text{varia}$	50	47,9	45,4	43,3	41,1	39,1	37,0	35,0	33,0	31,4	29,6
$\Delta Q, \%$ при $Q_{\max} = 540 \text{кВАр}$	50	47,5	45,0	42,6	40,2	37,8	35,4	33,0	30,6	28,2	25,7
$K_{\Gamma \max}, \%$	9	7,25	5,75	4,75	4,05	3,4	2,8	2,35	1,95	1,63	1,35

Як видно з табл. 2, спосіб регулювання, що базується на перемиканні відпайок обмоток реакторів  $Rk_3$ , є доцільним лише для трьох перших стовпчиків, для яких  $4 \geq \eta \geq 3,7$  де  $K_{\Gamma} > 5\%$ , а саме для опору мережі, що знаходиться у діапазоні  $0,018 \text{ Ом} \leq x_a \leq 1,075 \cdot 0,018 \text{ Ом} = 0,0194 \text{ Ом}$ . При  $\eta < 3,7$  у реакторі  $Rk_3$  задіяно лише одну найбільш потужну обмотку (симистори  $S7 \dots S9$  весь час відкриті). Зростання індуктивності мережі до 10% призводить до зменшення глибини регулювання з 50% до 40%.

У табл. 3 наведено розрахунки для діапазону  $4 \geq \eta \geq 3,76$  у випадку  $d=39,5$ , здійснені при зміні параметру  $L_a$  з кроком 1%. З табл. 2 і 3 та рис. 2 випливає, що для підтримання на всій глибині регулювання  $Q$  належної якості вхідного струму ( $K_{\Gamma} \leq 5\%$ ) при  $\eta > 3,8$  необхідно використовувати одразу всі три секції обмотки реактора  $Rk_3$ . Тобто у процесі регулювання величини  $Q$  на усьому можливому її діапазоні у разі її зростання струм  $i_3$  почергово перемикається: у граничному значенні  $Q=Q_1$  з секції з  $d=33$  на секцію з  $d=39,5$ , а при досягненні граничного значення  $Q=Q_2$  – з секції з  $d=39,5$  на секцію з  $d=52$ . При зменшенні  $Q$  перемикання струму через ці секції здійснюється у зворотному порядку. При  $3,8 \geq \eta > 3,7$  знадобляться лише дві секції обмотки, а саме секції з  $d=39,5$  і з  $d=52$ . Перехід струму  $i_3$  з одної секції на іншу здійснюється при  $Q=Q_2$ . Секції перемикаються під навантаженням симисторами  $S1 \dots S9$ , внаслідок чого на всій глибині регулювання  $Q$  досягається рівень коефіцієнта гармонік  $K_{\Gamma} \leq 5\%$ . При  $\eta \leq 3,7$  згідно з табл. 2 необхідність у відпайках у реакторі  $Rk_3$  відпадає, тому що при цих значеннях  $\eta$  на всій глибині регулювання  $Q$  коефіцієнт  $K_{\Gamma}$  задовольняє норми.

$\Delta L_a, \%$	0	1	2	3	4	5	6
$\eta$	4,0	3,96	3,92	3,88	3,84	3,80	3,76
$K_{\Gamma \max}, \%$	7,3	6,5	6,0	5,5	5,2	4,7	4,4

Процеси, проілюстровані у табл. 1 і 2, тотожні тим, що відбувались би у системі, коли місце підключення ТРК змішувалося по лінії подалі від трансформатора, а відхилення індуктивності  $\Delta L_a$  були б пов'язані виключно із збільшенням параметра  $x_{\text{лін}}$ , що мають місце по мірі зростання відстані між ТРК та трансформатором.

Тобто ці таблиці можуть використовуватись при оптимізації вибору місця підключення ТРК до лінії.

Важливою перевагою пристрою без вхідних реакторів  $Rk_k$  є можливість приєднання реакторно-тиристорного регулятора до діючої конденсаторної установки з фіксованим значенням реактивної потужності, завдяки чому здійснюється плавне регулювання реактивної потужності мережі без втручання в обладнання конденсаторних установок.

**Висновки.** 1. Технологічні відхилення індуктивного опору мережі (її індуктивності) суттєво впливають на характеристики встановлених у ній ТРК, зокрема на зменшення глибини регулювання реактивної потужності, що генерується ТРК.

2. У ТРК, що розглядається, є можливість перейти від прийнятого у роботах [3, 4] налаштування вхідного  $LC$  контуру ТРК на частоту  $3f$  до налаштування цього контуру на  $4f$ . При цьому встановлена

потужність обладнання реакторів ТРК зменшується на 10,6%. Для забезпечення належної якості вхідного струму у такому ТРК застосовується спосіб регулювання, коли в процесі регулювання за спеціальним алгоритмом здійснюється перемикання під навантаженням відпайок обмотки реактора  $Rk_3$ .

3. Відмова від вхідного реактора  $Rk_k$  дає можливість приєднання реакторно-тиристорного регулятора до вже діючих у мережі конденсаторних установок фіксованої реактивної потужності, завдяки чому з'являється властивість плавного регулювання реактивної потужності в мережі без втручання в обладнання конденсаторної установки.

1. Волков И.В., Чиженко А.И. Способ плавного регулирования реактивной мощности с коррекцией качества входного тока тиристорных компенсаторов реактивной мощности // Электронное моделирование – 2012.– Т.34 – № 2. – С.77 – 84.
2. Волков И.В., Чиженко А.И., Курило И.А. Трехфазный вентильно-дроссельный преобразователь переменного напряжения // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 26. – С.90–94.
3. Волков И.В., Липківський К.О., Чиженко О.І. Спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні. Патент України № 48865 А МКИ 7 Н 02 Р 13/30, Н 02 М5/10, 2002.
4. Нестерович В.В. Требования, предъявляемые к устройствам, служащим для измерения частотных характеристик электрических сетей / Тезисы докладов междунауч.-техн. конф. «Университетская наука-2015», 19-20 мая 2015. – Мариуполь, 2015. – Т. 1. – С. 236-237.
5. 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 // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2016. – Вип. 45. – С. 20–29.
6. Чиженко О.І., Трач І.В. Спосіб покращення якості струму у системі мережа–тиристорний компенсатор реактивної потужності // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2017. – Вип. 46. – С.22–30.
7. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. – Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України.
8. IEEE Std519-2014. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems/ Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854, <http://standards.ieee.org>
9. Felipe G. Duque, Leonardo W. de Oliveir. Allocation of capacitor banks in distribution systems through a modified monkey search optimization technique // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 73. – Pp. 420–432.
10. Mykhalskiy V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Matrix converter control strategy maximizing reactive power transfer // Proceeding of the International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine. – June 02-06, 2014. – Pp. 26–31.
11. Pravin Sonawane. Optimal capacitor placement and sizing for enhancement of distribution system reliability and power quality using PSO / International Conference for Convergence of Technology (I2CT). – 2014. – Pp. 1.–7.
12. Sayyad Nojavan, Mehdi Jalali, Kazem Zare. Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach // Electric Power Systems Research. – 2014. – Vol. 107. – Pp. 53-124.
13. K.L.Sireesha, K.Bhushana Kumar. Power Quality Improvement in Distribution System Using D-STATCOM // IJEAR. – 2014. – Vol. 4. – Issue Spl-1. – Pp.58–62.

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА РЕЖИМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

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

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Украина,

e-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)

Прослеживается влияние технологических изменений индуктивного сопротивления электрической сети на характеристики и параметры тиристорного мостового компенсатора реактивной мощности, установленного в ней с целью поддержания надлежащих значений  $\cos \varphi$ . Установлено, что с увеличением этого сопротивления максимальное значение реактивной мощности, генерируемой в сеть тиристорным регулируемым компенсатором (ТРК), тоже увеличивается, но при этом сужается глубина регулирования реактивной мощности. Для улучшения качества входного тока ТРК, т.е. уменьшения его коэффициента гармоник до значений меньших 5%, предлагается в процессе регулирования под нагрузкой осуществлять уменьшение индуктивности реактора, включенного между конденсаторной батареей и тиристорным мостом. Эти изменения осуществляются скачкообразно путем переключения с помощью симисторов отпайок обмоток этих реакторов. При настройке входного контура ТРК на четырехкратную частоту появляется возможность подключения индуктивно-тиристорной части регулятора непосредственно к установленным в сети конденсаторным батареям без какого-либо вмешательства в их оборудование. Благодаря этому возникает возможность плавного регулирования реактивной мощности действующей в сети конденсаторной установки фиксированной мощности. Библ. 13, табл. 3, рис. 2.

**Ключевые слова:** индуктивность электрической сети, тиристорный регулируемый компенсатор реактивной мощности, качество входного тока, коэффициент гармоник, глубина регулирования реактивной мощности.

## AN IMPACT OF CHANGES IN THE INDUCTANCE OF DISTRIBUTION NETWORK ON THE MODES AND PARAMETERS OF EQUIPMENT OF THYRISTOR COMPENSATOR OF REACTIVE POWER

Chyzenko O.I., Trach I.V.

Institute of electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

e-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)

*An impact of technology changes of inductive resistance of electrical network can be observed on the characteristics and parameters of the bridge thyristor compensator of reactive power established in it to maintain proper values of  $\cos\varphi$ . It is determined that with the increase of this resistance, a maximum value of reactive power generated into the network by thyristor compensator of reactive power, also increases, whereas a depth of reactive power control narrows. Thus, when increasing inductive resistance of the network by 25%, the depth of reactive power control, calculated value of which is  $x_a$  for the constant parameter, will be reduced almost by half. To improve the quality of input current of thyristor compensator of reactive power (aka line current), i.e. to reduce its harmonic distortion to the values lower than 5%, it is proposed to decrease the reactor inductance, which is connected between capacitor bank and thyristor bridge, during the process of on-load changing. These changes are carried out step-wise by switching the taps of reactors' windings using additional thyristors. Thus, when the depth of reactive power control is 50% and the input LC circuit of thyristor compensator of reactive power is tuned to quadruple frequency (with respect to the mains power frequency), the number of taps that is needed is two. When inductive resistance of the network increases, the frequency of LC circuit setup decreases, which leads to the reduction of taps until their complete absence. When tuning the input circuit of thyristor compensator of reactive power to quadruple frequency, it is possible to connect inductive-thyristor part of the controller directly to the capacitor banks installed in the network without any interference into their equipment. This results in a smooth control of reactive power in the network of capacitor unit with a fixed power. References. 13, Table 3, Figures 2.*

*Key words:* inductive resistance, thyristor compensator of reactive power, quality of input current, harmonic distortion, depth of reactive power control.

1. Volkov I.V., Chyzenko A.I. Method of Smooth Regulation of the Reactive Power with Correction of Quality of input Current of Thyristor Compensators of the Reactive Power // *Elektronnoe modelirovanie*. – 2012. – Vol. 34 – No 2. – Pp.77 – 84. (Rus)
2. Volkov I.V., Chyzenko A.I., Kurilo I.A. Three-phase thyristor-reactor inverter AC voltage // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2010. – No 26. – Pp. 90 – 94. (Rus)
3. Volkov I.V., Lypkivsky K.O., Chyzenko O.I. Method of smooth regulation of alternating voltage on the active-inductive load. Patent of Ukraine № 48865 A MKI 7 H 02 P 13/30, H 02 M5/10, 2002.
4. Nesterovych V.V. The requirements for device for measuring the frequency characteristics of electrical networks / *University Science 2015: Abstracts of the International scientific and engineering. conf.* – Pryazovskyi State Technical University. - 18-19 may 2015.-Mariupol. (Rus)
5. Chyzenko A.I., Trach I.V. The analysis of electromagnetic processes in the system of the electric network - thyristor compensator of reactive power in standby smooth control of reactive power. Assessing the impact of the bridge options thyristor compensator of reactive power on its EMC network // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2016. – No 45. – Pp. 20 –29. (Rus)
6. Chyzenko A.I., Trach I.V. A method of improving the quality of the current in the system “network – controlled bridge thyristor compensator of reactive power” // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2017. – No 46. – Pp. 22 – 30. (Rus)
7. General purpose oil power transformers 35 kV and including. Specifications. –State Committee for Standardization and Certification Ukraine.
8. IEEE Std519-2014. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems/ Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854, <http://standards.ieee.org>
9. Felipe G. Duque, Leonardo W. de Oliveir. Allocation of capacitor banks in distribution systems through a modified monkey search optimization technique // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2015. – Vol. 73. – Pp. 420–432.
10. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Matrix converter control strategy maximizing reactive power transfer // *Proceeding of the International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kyiv, Ukraine. – June 02-06, 2014. – Pp. 26–31.
11. Pravin Sonawane. Optimal capacitor placement and sizing for enhancement of distribution system reliability and power quality using PSO/ *International Conference for Convergence of Technology (I2CT)*. – 2014. – Pp. 1.–7.
12. Sayyad Nojavan, Mehdi Jalali, Kazem Zare. Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach // *Electric Power Systems Research*. – 2014. – Vol. 107. – Pp. 54-124.
13. K.L.Sireesha, K.Bhushana Kumar. Power Quality Improvement in Distribution System Using D-STATCOM / *IJEAR*. – 2014. – Vol. 4. – Issu Spl-1. – Pp. 58–62.

Надійшла 20.10.2016  
Остаточний варіант 20.04.2017