УДК 621.316

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНИХ СТРУМІВ ВІДДАЛЕНИХ СПОЖИВАЧІВ В УМОВАХ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ

Зубюк Ю. П. , Трач І. В.

Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ)

Розглянуто проблеми компенсації реактивних струмів віддалених споживачів за допомогою конденсаторних установок. Проаналізовані алгоритми регулювання ємності конденсаторних установок в умовах несинусоїдальності напруги з використанням похідної напруги.

Постановка проблеми. В поточний період в Україні спостерігається ускладнення проблем електропостачання віддалених, в т.ч. сільськогосподарських електроспоживачів, що, зокрема, викликано задачами їх сучасної автоматизації, впровадження напівпровідникових пристроїв (в т.ч. перетворювачів частоти для електродвигунів), інтеграції в електричні системи відновлюваних джерел електроенергії тощо. Проблеми зниження показників якості електроенергії (відхилень, коливань, несиметрії та несинусоїдальності струмів/напруг) значно ускладнюють важливу енергоощадну задачу компенсації реактивної потужності. Все це вимагає дослідження та пошуку нових рішень, що підвищують ефективність та надійність компенсувальних пристроїв, в т.ч. найбільше розповсюджених - конденсаторних установок (КУ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За умов несинусоїдальності та несиметрії напруг/струмів алгоритми керування виключно за величиною та знаком реактивної потужності (РП) за першою гармонікою не є в достатній мірі ефективними. Наразі не існує загальновизнаного визначення поняття «реактивна потужність за несинусоїдальних режимів». Останнім часом не згасає дискусія з цього поняття серед профільних науковців, про що свідчить суттєва кількість публікацій в фахових виданнях, наприклад в [1-3]. При цьому, різні групи фахівців (розробники перетворювальної та вимірювальної техніки, фахівці з теоретичних основ електротехніки, систем електроспоживання тощо) пристосовують для своїх задач те чи інше визначення. Відома американська фірма з вимірювань Fluke Corporation в калібраторі 6100A передбачила можливість вимірювання восьми РП згідно наступних алгоритмів (за авторами визначень РП): 1) Budeanu, 2) Fryze, 3) Kusters & Moore, 4) Shepherd & Zakikhani, 5) Sharon, 6) Czarnecki, 7),8)- робочі групи IEEE та IEC. Очевидно, що можливість отримання різних значень РП робить невизначеним її величину для здійснення ефективної компенсації реактивних струмів. В той же час фахівцям з електропостачання, яким доводиться вирішувати практичні задачі компенсації РП, необхідні алгоритми керування, які б дозволили забезпечити мінімальні втрати та максимальну ефективність використання електроенергії існуючими засобами.

Мета статті. Пропонується застосування альтернативних алгоритмів регулювання ємності КУ для компенсації реактивних струмів віддалених/сільськогосподарських споживачів електроенергії в умовах суттєвої несинусоїдальності напруги, тобто коли традиційні алгоритми регулювання (величиною та знаком РП/ коефіцієнтом потужності) не є в достатній мірі коректними.

Основні матеріали дослідження. В [4] пропонувалось в сучасних умовах використовувати алгоритм керування ємністю КУ для забезпечення мінімальних втрат ΔP в мережі з активно-індуктивними (*RL*) елементами засобами застосування поперечної КУ ємністю C, для виконання умови $\partial\Delta P/\partial C=0$. Для такого однофазного кола "джерело - *RL*-навантаження" можливим алгоритмом керування відповідною КУ є наступний:

$$C_{\text{КУ}} = -\frac{\overline{iu'}}{\overline{(u')^2}} \qquad (1)$$

де i – струм навантаження, u' - похідна напруги на навантаженні.

Алгоритм (1) видається ефективним при побудові несиметричної КУ з різними ємностями в фазах, кожна з яких обчислюється за вказаним виразом за вимірами у відповідних фазах мережі. Підходи до визначення $C_{KУ}$ за алгоритмом (1), розглядались ще на початку 80-х рр., зокрема канадськими фахівцями з вимірювальної техніки Кастерсом і Муром (Kusters & Moore). Основним недоліком вказаного алгоритму вважалось те, що вираз коректний лише за умови практичної незмінності напруги в точці приєднання, однак в [3] встановлено, що цей алгоритм має практичне значення в певних умовах застосування, особливо для віддалених споживачів [3]. В [2] наголошувалось, що в більшості практичних застосувань алгоритм (1) ефективно забезпечував максимально можливий коефіцієнт потужності при компенсації ємністю.

Для вирішення практичних задач конденсаторної компенсації реактивних струмів навантажень існуючими засобами задача мінімізації втрат в мережах за допомогою конденсаторів є нагальною, і вирішується вона в умовах стандартизованих відхилень ємності конденсаторів, різних рівнях відхилення напруги при комутаціях конденсаторів в різних точках мережі тощо. В даній роботі аналізувались практичні варіанти застосування алгоритму (1) для симетричних трифазних електромереж. Визначення ефективності алгоритму здійснювалось за відношенням коефіцієнтів потужності (обчислених різними способами), а саме $K_{PF} = PF_1/PF_2$, де PF_1 - коефіцієнт потужності за (1), PF_2 – максимальний розрахунковий коефіцієнт потужності. Коефіцієнт PF_2 розраховувався за відношен-

ням активної до повної потужності для заданої схеми: джерело напруги з вищими гармонічними складовими - лінія електропередачі - трансформатор- лінія електропередачі- *RL*-навантаження з паралельно підімкненою КУ. У якості приклада розглянуто електричну мережу, в якій від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ, потужністю 630 кВА, через лінії електропередачі 10 кВ та 0,4 кВ живиться *RL*-навантаження.

Потужність короткого замикання у точці приєднання КУ становить 4,377 МВА. Параметри електричної мережі подані у відносних одиницях (в.о.). За базисні одиниці прийнято: активний опір $R_б$ = 0,2305 Ом та частоту ω_1 =1. Параметри електричної мережі мають два варіанти: 1) *Re* =0,0743 в.о., *Le*=0,0862 в.о., номінальне навантаження Z_{load}=1 в.о.; 2) електрична мережа, порівняно з варіантом 1), має подвійну довжину лінії електропередачі 0,4 кВ з наступними параметрами: *Re* =0,1046 в.о., *Le* = 0,0989 в.о. Електрорушійна сила (ЕРС) має наступний склад : E_1=1 , E_5=0,03E_1, E_7=0,015E_1, E_{11}=0,005E_1, ω_1 =1. Коефіцієнт несинусоїдальності ЕРС (*англ.- THDU*) складає: $THDU$= [sqrt(E_5^2+E_7^2+E_{11}^2)]/E_1·100 = 3,39%.

На рис. 1 зображено залежність коефіцієнта потужності *PF(C)* для двох варіантів параметрів мережі, при варіації параметрів навантаження : *cos* φ та коефіцієнта завантаження $K_З$ =*S/Sn,* де *S, Sn*- потужності навантаження розрахункова та номінальна відповідно.

Варіант 1. *Re* =0,0743 в.о., *Le* =0,0862 в.о. Варіант 2 (подовжена ЛЕП 0,4 кВ). *Re* =0,1046 в.о., *Le* =0,0989 в.о. На рис.1 позначено: крива 1 – для $K_З$ =1,0 (номінальне навантаження); крива 2– для $K_З$ =0,8; крива 3– для $K_З$ =0,5. Максимальні значення PF_{max} відмічені квадратними позначками a, b, c.

Аналіз залежності коефіцієнту потужності *PF* від ємності *C*, показує, що при номінальному навантаженні ($K_З$ =1,0, криві 1) графік *PF(C)* достатньо плавний і не має яскраво виражених локальних екстремумів, а максимальні коефіцієнти потужності PF_{max} (позначені “a”) знаходяться в області плавних кривих.

При малих навантаженнях ($K_З$ =0,5, криві 3) максимальні коефіцієнти потужності PF_{max} (позначені “c”) знаходиться у області локальних екстремумів. Розташування максимальних коефіцієнтів потужності PF_{max} в області локальних екстремумів погіршує ефективність алгоритму (1). Наявність локальних екстремумів є результатом резонансу напруги на одній із гармонік джерела ЕРС. Аналіз впливу резонансних явищ на ефективність алгоритма (1) керування КУ є об’єктом нагальних досліджень. Для кожного режиму навантаження відношення коефіцієнтів потужності K_{PF} розраховувалось для різних коефіцієнтах завантаження $K_З$ з діапазону 0,5-1,0 та коефіцієнтів потужності *RL*-навантаження для першої гармоніки *cos*φ з діапазону 0,707...0,85. У табл. 1, як приклад, наведено результати розрахунку відношення K_{PF} для заданої електричної мережі.

В табл.1: Z_{load}= *Re* + *j* ω_1 *Le* - повний опір навант-ження, ω_1 =1 в.о.- частота першої гармоніки ЕРС.

З наведених результатів видно, що найбільші значення K_{PF} мають місце для варіанту 2 електричної мережі, що свідчить про більшу ефективність застосування алгоритму (1) для цього варіанту.

Таблиця 1 – Відношення коефіцієнтів потужності: PF_1 за (1) до розрахункового максимального значення PF_2

K_{PF} = PF_1/PF_2			
Варіант 1. Параметри мережі R_e =0,0743 в.о., L_e =0,0862 в.о.			
$K_З$	Z_{load}, в.о.		
	0,707+ j0,707	0,8+j0,6	0,85+j0,526
1,0	0,983	0,930	0,970
0,8	0,919	0,935	0,984
0,5	0,991	0,977	0,905
Варіант 2 (подовжена ЛЕП 0,4 кВ). Параметри мережі R_e =0,1046 в.о, L_e =0,0989 в.о.			
$K_З$	Z_{load}, в.о.		
	0,707+ j0,707	0,8+j0,6	0,85+j0,526
1,0	0,996	0,991	0,986
0,8	0,979	0,966	0,975
0,5	0,961	0,998	0,989

Таким чином, застосування алгоритму (1) може забезпечувати точність, достатню для вирішення практичних задач компенсації реактивних струмів, зокрема для віддалених споживачів. Для трифазних мереж значення $C_{КУ}$, що мінімізує втрати в мережі, може визначатись за виразом (2):

$$C_{КУ} = -\frac{\overline{i_A u'_{A0}} + \overline{i_B u'_{B0}} + \overline{i_C u'_{C0}}}{\overline{(u'_{A0})^2} + \overline{(u'_{B0})^2} + \overline{(u'_{C0})^2}} \qquad (2)$$

де i_A,i_B,i_C - струми в фазах *A,B,C* активно-індуктивного навантаження, напруги u_{A0}=u_A-u_0; u_{B0}=u_B-u_0; u_{C0}=u_C-u_0 при з`єднанні однофазних ємностей КУ в зірку [4].

Слід зазначити, що сучасна елементна база КУ дозволяє застосовувати: широку шкалу типономіналів конденсаторів, зокрема для номінальних напруг 0,4...0,69 кВ номінальні одиничні потужності 0,5...120 кВАр, а для середньої напруги одинична потужність сягає 1 МВАр; серійні антирезонансні дроселі для відлаштування від резонансних режимів на частотах вищих гармонік (частота резонансного контуру 134, 189, 214 Гц), ефективну комутаційну (резистивні пускачі, вакуумні контактори тощо) та захисну багатофункціональну апаратуру. Сучасні регулятори коефіцієнту потужності мають чутливість 2 мА і виконують функції захисту від перевантажень за струмом та напругою, в тому числі і за рахунок вищих гармонічних складових. Без контролю власного стуму КУ, перевантаження за струмом можна контролювати шляхом обчислення коефіцієнта завантаження конденсатора вищими гармонічними складовими (*англ.*-capacitor harmonic load-CHL), який обчислюється за формулою (3), як це наприклад застосовується в чеських регуляторах типу NOVAR:

$$CHL = \sqrt{\sum_{2}^{n} \left(\frac{nU_n}{U_{ном}}\right)^2} * 100,\% \qquad (3)$$

де *n*- номер гармонічної складової напруги; $U_{ном}$, , U_n напруги:номінальна та *n*-й гармонічної складової.

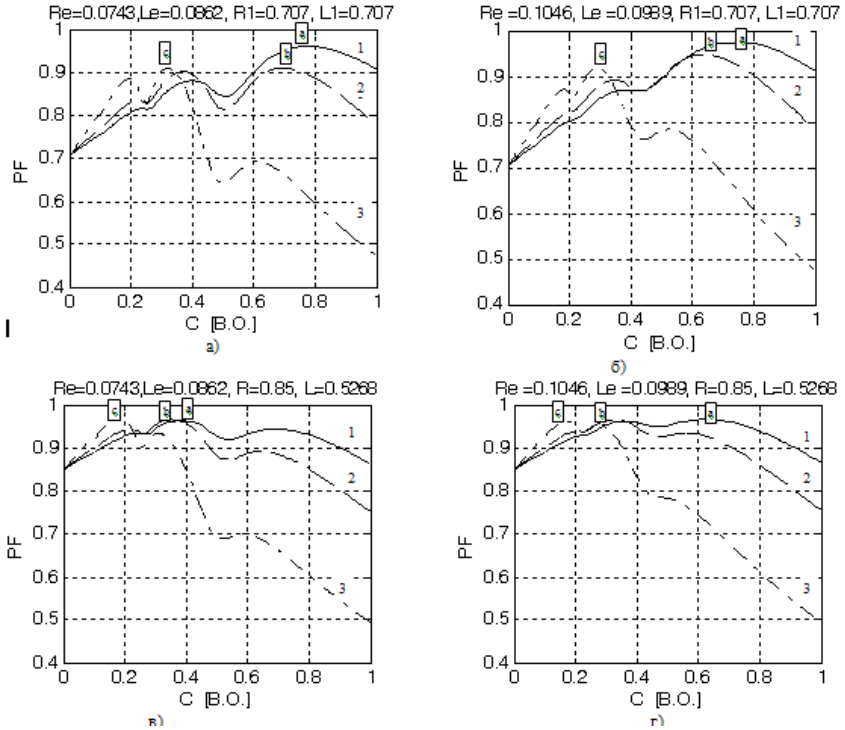

Рисунок 1 - Залежність коефіцієнта потужності *PF* від ємності *C* за умов:
а) *cosφ* =0,707; *Re*=0,0743, *Le*=0,0862, б) *cosφ* =0,707;*Re* =0,1046, *Le* =0,0989, в) *cosφ* =0,85; *Re*=0,0743, *Le*=0,0862, г) *cosφ* =0,85, *Re* =0,1046, *Le* =0,0989

Застосування КУ одночасно з сучасними високоточними регуляторами/стабілізаторами напруги на вході, також суттєво підвищує ефективність як розглянутих алгоритмів, так і КУ в цілому.

Висновки. Пристрої регулювання ємності компенсувальних КУ за алгоритмами (1) та (2) можуть бути достатньо ефективними для зменшення втрат в системах електропередавання і електроспоживання віддалених, в т.ч. сільськогосподарських споживачів, оскільки традиційні параметри (величина та знак РП , коефіцієнт потужності) далеко не завжди є ефективними за умов несинусоїдальності напруги і не можуть вважатися беззаперечними параметрами регулювання ємності КУ. Алгоритм (1) за вказаних умов видається ефективним для здійснення компенсації реактивних струмів відповідних навантажень, в тому числі при побудові несиметричних структур компенсувальних пристроїв при його пофазному застосуванні.

Список використаних джерел

1. Cepisca C., Andrei H., Ganatsios S., Veyssiere M. Energy Measurement Techniques for non-sinusoidal situations // METSIM`2002 International Conf. on Metrology & Measurement Systems, June 27-28, 2002, Politehnika University, Bucharest, Romania, ACTA ELECTROTEHNICA,Vol.44, Number 2, 2003–p.91-96.

2. Balci M.E., Hocaoglu M.H. Quantitative comparison of power decompositions // Electric Power Systems Research- 78-2008.- p. 318-329.

3. Czarnecki L.S. Moce w obvodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami pradow i napiec / Oficyna Wydavnicza Politechniki Warszawskiej // Warszawa-2005.- 212 p.

4. Кизилов В. У. Альтернативний підхід до регулювання ємності конденсаторних установок / В. У. Кизилов, Ю. П. Зубюк // Промислова електроенергетика та електротехніка "Промелектро". - №1 – 2009. – С.35-38.

Анотація

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ ТОКОВ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Зубюк Ю. П. Трач И. В.

Рассмотрены проблемы компенсации реактивных токов удаленных потребителей с помощью конденсаторных установок. Проанализированы алгоритмы регулирования емкости конденсаторных установок в условиях несинусоидальности напряжения с использованием производной приложенного напряжения.

Abstract

THE COMPENSATION OF REMOTE CONSUMERS REACTIVE CURRENTS IN THE NONSINUSOIDAL VOLTAGES CONDITIONS

Yu. Zubyuk., I. Trach

The problems of compensation of remote consumers reactive currents by capacitor banks are considered.The algorithms of capacitor banks capacitance control in the nonsinusoidal voltages conditions with the use of the voltage derivative are analyzed.