



УКРАЇНА

(19) UA (11) 78377 (13) C2  
(51) МПК (2006)  
H02J 3/18МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД(54) СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ  
ЗМІННОЇ НАПРУГИ

1

(21) а200503305

(22) 11.04.2005

(24) 15.03.2007

(46) 15.03.2007, Бюл. № 3, 2007 р.

(72) Данилець Олександр Петрович, Кашкалов  
Володимир Іванович, Коваль Анатолій Васильович  
(73) ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "МА-  
РІУПОЛЬСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ ІМ.  
ІЛІЧА"

(56) SU 107456, 01.10.1956

CH 617045, 30.04.1980

DE 3148060, 23.06.1983

SU 1053092, 07.11.1983

SU 1422300, 07.09.1988

RU 34818, 10.12.2003

(57) Спосіб регулювання компенсації реактивної потужності в електричній мережі змінної напруги, що базується на створенні за допомогою багатоступінчастої системи конденсаторів основних випереджаючих компенсуючих реактивних струмів і компенсації відстаючих реактивних струмів, який **відрізняється** тим, що за допомогою допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів створюють додаткові випереджаючі компенсуючі реактивні струми, величина яких менша за величину основного випереджаючого струму, і при монотонному змінненні відстаючого реактивного струму

2

компенсацію спочатку проводять додатковими випереджаючими реактивними струмами допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів і після їх повного використання – черговим основним випереджаючим реактивним струмом, причому одночасно з початком використання чергового основного випереджаючого реактивного струму припиняють використання додаткових випереджаючих реактивних струмів, що складає один цикл регулювання, далі цикли використання допоміжних і чергових основних випереджаючих реактивних струмів повторюють до досягнення максимуму повної компенсації реактивної потужності, а при стрибкоподібній зміні відстаючого реактивного струму більше, ніж на величину одного основного випереджаючого реактивного струму, компенсацію спочатку проводять основними випереджаючими реактивними струмами і, коли некомпенсований відстаючий реактивний струм досягає величини, меншої за основний випереджаючий реактивний струм, компенсацію здійснюють додатковими випереджаючими реактивними струмами допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів, причому додаткові випереджаючі реактивні струми та один основний випереджаючий реактивний струм вибирають у співвідношенні 0,1 : 0,2 : 0,2 : 0,4 : 1.

Запропонований винахід відноситься до галузі електропостачання і компенсації реактивної потужності і може бути застосований в електричних мережах напругою від 0,4/0,23кВ і вище.

Добре відомий і застосовується у промисловості спосіб регулювання компенсації реактивної потужності (РП) шляхом підключення (відключення) до (від) електричної мережі визначеної кількості конденсаторів. Потужність ступенів конденсаторів визначається за одиничним кодом 1:1:1... або ж за двоїчним кодом 1:2:4.... Інколи обирають і інше співвідношення потужностей ступенів конденсаторів. Зазначені способи регулювання компенсації реактивної потужності в електричних мережах багаторазово висвітлені в технічній літературі, на-

приклад:

1. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. 2-е изд., М., Энергоатомиздат, 1983.

2. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. 2-е изд., М., Энергоатомиздат, 1983.

При користуванні для регулювання компенсації РП одиничним кодом потужність конденсаторів всіх ступенів є однаковою, при користуванні ж для цього двоїчним кодом потужність кожного наступного ступеня конденсаторів подвоюється по відношенню до попереднього ступеня. При користуванні одиничним кодом для регулювання РП від

(13) C2

(11) 78377

(19) UA

нуля до якогось найбільшого значення, скажімо, 1500кВАр, необхідно в нашому прикладі 15 ступенів по 100кВАр на кожному ступені. При користуванні ж двоїчним кодом для цього необхідно 4 ступеня з потужністю 100:200:400:800кВАр на ступенях №№1...4.

Регулювання компенсації РП з використанням коду 1:1:1... здійснюється таким чином. З появою в точці електричної мережі, де здійснюється компенсація, реактивної потужності, величина якої близька до потужності ступеня конденсаторів, вмикають, тобто підключають до електричної мережі, ступінь №1 конденсаторів, який здійснює компенсацію РП. Якщо через деякий час РП знову зростає і знову досягає величини, близької до потужності одного ступеня конденсаторів, то вмикають другий ступінь конденсаторів - ступінь №2.1 так далі, при зростанні РП далі по черзі вмикають ступені конденсаторів №3, №4 тощо.

Коли при включеному стані кількох ступенів конденсаторів РП починає зменшуватись, то спочатку вимикають (відключають від електричної мережі) останній включений (найбільший за номером) ступінь конденсаторів, скажімо, №9. При подальшому зменшенні споживання РП з електричної мережі по черзі відключають від неї ступені №8, потім №7 і так далі, при необхідності аж до №1.

Регулювання компенсації РП з використанням коду 1:2:4... здійснюється інакше. Із зростанням РП від нуля до величини, близької до потужності першого ступеня конденсаторів (найменшої потужності 100кВАр), вмикають ступінь №1 100кВАр. При подальшому зростанні некомпенсованої РП до величини, близької до згаданих 100кВАр, вмикають ступінь №2 потужністю 200кВАр і одночасно вимикають ступінь №1 100кВАр, що призводить до повної компенсації РП. Коли через деякий час РП знову зростає близько до 100кВАр, то знову вмикають ступінь №1 100кВАр. Подальше зростання РП призводить до вмикання ступеня №3 потужністю 400кВАр і одночасного вимикання ступенів №№1,2 сумарною потужністю 300кВАр. Далі при необхідності вмикають ступінь №1, потім №2 з одночасним відключенням ступеня №1, потім знову вмикають ступінь №1 і нарешті вмикають ступінь №4 конденсаторів 800кВАр, вимикаючи ступені №№1, 2, 3. Далі знову можуть вмикатися-вимикатися ступені 1-4 так, як зазначено вище, аж доки не буде досягнута потужність компенсуючих конденсаторів 1500кВАр - всі ступені 1-4 конденсаторів ввімкнено.

При зменшенні споживання з мережі РП регулювання її компенсації проводять подібно до описаного, але в зворотньому порядку: спочатку вимикають ступінь №1 100кВАр, з подальшим зменшенням споживання РП вимикають ступінь №2 200кВАр та одночасно вмикають ступінь №1 100кВАр і так далі.

Ступені конденсаторів в наведених способах називатимемо основними, а створювані ними в електричній мережі струми - основними випереджаючими компенсуючими реактивними струмами.

Спільним недоліком обох способів є значна потужність зони нечутливості регулювання компенсації РП, яка близька до потужності одного ступеня - в наведених прикладах це 100кВАр. Пояснюється це тим, що тариф за перекомпенсацію РП - тобто за генерацію РП в електричну мережу - є втричі більшим за тариф споживання РП з мережі. Це правило запроваджено Національною комісією з регулювання електроенергетики з 2001 року.

Недоліком способу регулювання компенсації за кодом 1:2:4... є велика кількість комутацій (1 комутація=1 ввімкнення+1 вимкнення) ступенів конденсаторів. Найбільшу кількість комутацій має ступінь №1, вдвічі меншу кількість комутацій має ступінь №2, вчетверо меншу кількість їх - ступінь №3 тощо.

Конденсатори не призначені для частих ввімкнень під напругу, бо при цьому у конденсаторі впродовж кількох мікросекунд протікають надструми, які перевищують номінальний струм у 100-1000 разів, що поступово руйнує діелектрик ізоляційних обкладинок конденсатора і той через деякий час виходить з ладу. Зазначимо, що коли один чи більше ступенів конденсаторів ввімкнено під напругу раніше і тепер вмикається черговий ступінь конденсаторів, то надвеликі струми короткочасно протікають через конденсатори всіх ступенів. Отже, цей спосіб регулювання компенсації РП призводить до значного скорочення строку служби конденсаторів.

Часто для обмеження надструмів у конденсаторах ступенів при ввімкненні їх на напругу електричної мережі застосовують включені послідовно з конденсаторами резистори або реактори (індуктивний опір). Резистори після закінчення процесу підключення до мережі конденсаторів шунтують контактами комутаційних апаратів (контактор, магнітний пускач тощо), реактори ж залишають без шунтування. Недоліком застосування резисторів є подвоєння кількості комутаційних апаратів, недоліком використання реакторів є постійні втрати активної енергії в їх активному опорі.

Як прототип обрано спосіб регулювання компенсації РП за кодом 1:1:1... [Ильяхов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. 2-е изд., М., Энергоатомиздат, 1983], який є найближчим до запропонованого винаходу по технічній суті і результату, що досягається.

В основу винаходу поставлена задача підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в електричній мережі змінної напруги шляхом більш тонкого регулювання компенсації. Поставлена задача вирішується тим, що в способі регулювання компенсації, який базується на створенні за допомогою багатоступінчастої системи конденсаторів основних випереджаючих компенсуючих реактивних струмів і компенсації таким чином відстаючих реактивних струмів, згідно винаходу за допомогою допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів створюють додаткові випереджаючі компенсуючі реактивні струми величиною, в кілька разів меншою за величину основного випереджаючого струму основного ступеня конденсаторів, і при монотонному змінненні відстаючого реактивного струму компенсацію спочатку проводять додатковими випереджаючими реактивними струмами допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів і після їх повного використання - черговим основним випереджаю-

чим струмом, причому одночасно з початком використання чергового основного випереджаючого реактивного струму припиняють використання допоміжних випереджаючих реактивних струмів, далі цикли використання допоміжних і чергових основних випереджаючих реактивних струмів повторюють аж до досягнення якомога повної компенсації реактивної потужності; а при стрибкоподібній зміні відстаючого реактивного струму більше, ніж на величину одного основного випереджаючого реактивного струму, компенсацію спочатку проводять основними випереджаючими реактивними струмами і коли некомпенсований відстаючий реактивний струм досягає величини, меншої за основний випереджаючий реактивний струм/ компенсацію здійснюють допоміжними випереджаючими реактивними струмами допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів. Причому додаткові випереджаючі реактивні струми та один основний випереджаючий реактивний струм вибирають у співвідношенні 0,1: 0,2: 0,2: 0,4: 1.

Сутність способу, що заявляється, пояснюється кресленням, де на Фіг.1 зображена однолінійна схема заміщення трифазної електричної мережі змінної напруги, яка живить навантаження (струмоприймачі) і до (від) якої вмикають (вимикають) ступені конденсаторів, генеруючих випереджаючі компенсуючі реактивні струми.

На Фіг.1 електрична мережа змінної напруги 1 живиться від джерела живлення 2, підключеного до мережі 1. Остання живить навантаження 3 підприємства, яке здебільшого складається з таких струмоприймачів, як асинхронні двигуни 4, що комутуються (вмикаються і вимикаються до і від мережі 1) комутаційними апаратами (КА) 5. Навантаженням (струмоприймачем) може бути також дугова сталеплавильна піч, індукційна нагрівальна піч тощо. Майже всі струмоприймачі споживають з електричної мережі 1 разом з активною потужністю і реактивну потужність, яку і треба компенсувати. Компенсацію РП здійснюють додатковими випереджаючими компенсуючими реактивними струмами  $I_7, I_8, I_9, I_{10}$  допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів 6, до якої входять конденсатори 7, 8, 9, 10 зі струмами відповідно  $I_7, I_8, I_9, I_{10}$ , що підключаються (відключаються) до (від) мережі 1 комутаційними апаратами 11 послідовно з реакторами 12, а також основними випереджаючими компенсуючими реактивними струмами  $I_{13}, I_{14}, I_{15}, I_{16}, \dots, I_n$  основних конденсаторів 13, 14, 15, 16, ..., n, які створюють основну багатоступінчасту систему конденсаторів 17, кожен з яких комутується своїм КА 18.

Сигнал, пропорційний реактивній потужності (реактивному струму), яку (який) споживає навантаження 3, отримують з датчика, включеного в

електричну лінію, що з'єднує джерело живлення 2 з мережею 1, причому найчастіше датчик розміщують поруч з мережею 1.

Потужність основних ступенів конденсаторів 13-16, ..., n обирають однаковими. Вважатимемо, що потужність кожного основного ступеня у відносних величинах дорівнює одиниці, а потужності додаткових ступенів конденсаторів 7, 8, 9, 10 допоміжної системи 6 у відносних величинах співвідносяться як 0,1: 0,2: 0,2: 0,4. Сума потужностей додаткових ступенів 7-10 у відносних величинах складає 0,9, тобто на 0,1 менше потужності одного основного ступеня.

При монотонній зміні (збільшенні або зменшенні) РП регулювання компенсації РП в електричній мережі 1 згідно способу, що заявляється, здійснюється наступним чином. Перед цим зауважимо, що у відносних величинах випереджаючих струмів конденсаторів додаткових і основних ступенів знаходяться у тому ж співвідношенні, що і їх реактивні потужності, тобто  $I_7: I_8: I_9: I_{10} = 0,1: 0,2: 0,2: 0,4$ , а  $I_{13}: I_{14}: I_{15}: I_{16}: \dots: I_n = 1:1:1:1: \dots: 1$ . Зростання споживання РП супроводжується пропорційним зростанням відстаючого реактивного струму  $I_p$ , який потрібно компенсувати. Коли цей струм досягає значення  $I_p=0,1$ , вмикають ступінь 7 конденсаторів допоміжної системи 6, цей ступінь генерує в мережу 1 випереджаючий реактивний струм  $I_7 = -0,1$  (випереджаючі реактивні струми мають протилежний знак відносно відстаючих реактивних струмів). Алгебраїчна сума  $I_p + (-I_7)$  в даному випадку дорівнює нулю, що означає повну компенсацію як відстаючого реактивного струму, так і реактивної потужності.

Коли з подальшим зростанням (через деякий час) некомпенсований відстаючий струм  $I_p$  знов досягне значення 0,1, одночасно вмикають ступінь 8 конденсаторів системи 6 з  $I_8 = -0,2$  і вимикають ступінь 7: знову має місце повна компенсація відстаючого реактивного струму, який на цей час  $I_p = 0,2$ .

Подальше зростання  $I_p$  на 0,1 - при цьому  $I_p = 0,3$  - супроводжують знову вмиканням ступеня 7 конденсаторів і повністю компенсують відстаючий струм  $I_p=0,3$  випереджаючими струмами конденсаторів  $I_7 + I_8 = -0,1 - 0,2 = -0,3$ .

Отже після кожного зростання  $I_p$  на величину 0,1 вмикають (а при потребі вимикають) необхідний ступінь конденсаторів допоміжної системи 6. Послідовність комутацій ступенів 7 - 10 під час регулювання компенсації РП в межах зміни відстаючого реактивного струму  $I_p = 0 \dots 0,9$  наведена в таблиці, де значення відстаючого реактивного струму подані у відносних одиницях.

Таблиця

	$I_p$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
№№ ступенів системи 6	7	+		+		+		+		+
	8		+	+			+	+	+	+
	9								+	+
	10				+	+	+	+	+	+

+ - ступінь ввімкнено

Коли відстаючий реактивний струм досягає значення  $I_p = 1$ , то вмикають основний ступінь конденсаторів 13 з випереджаючим реактивним струмом  $I_{13} = -1$  і одночасно вимикають всі ступені 7-10 допоміжної системи 6. При подальшому зростанні  $I_p$  на величину від 0,1 до 0,9 додаткові ступені 7-10 вмикають та вимикають згідно з вищеописаним, тобто у відповідності до даних таблиці 1. Якщо тепер при включеному основному ступені конденсаторів 13  $I_p$  досягне значення  $I_p = 1$ , то знову - одночасно - відключають ступені 7-10 і підключають до мережі 1 основний ступінь 14 з випереджаючим струмом  $I_{14} = -1$ . І так далі, тобто якщо  $I_p$  буде зростати і надалі, то спочатку будуть „працювати” - згідно з табл. - додаткові ступені 7-10, за ними вмикають наступний основний ступінь і одночасно вимикають ступені 7-10. Так до останнього основного ступеню.

Нехай тепер відстаючий реактивний струм  $I_p$  починає монотонно зменшуватись. Перед цим, наприклад,  $I_p$  мав значення  $I_p = 4$  і при цьому були ввімкнені основні ступені конденсаторів 13-16 з  $I_p = I_{13} + I_{14} + I_{15} + I_{16} = -4$ , що забезпечує повну компенсацію РП. Якщо тепер реактивний струм зменшився на 0,1, то вимикають останній за номером основний ступінь конденсаторів з тих, що були ввімкнені, - у нашому випадку це ступінь 16, - і вмикають всі додаткові ступені 7-10 конденсаторів, забезпечуючи повну компенсацію РП. Подальше зменшення  $I_p$  на 0,1 призведе до вимкнення ступеня 7. При новому зменшенні  $I_p$  на 0,1 вимкнеться ступінь 8 і одночасно ввімкнеться ступінь 7 і так далі. Коли з подальшим зменшенням  $I_p$  додаткові ступені 7-10 буде вимкнено (з досягненням повної компенсації РП), ввімкненими залишаться основні ступені 13-15. Нове зменшення  $I_p$  на 0,1 призведе, по аналогії з вищеописаним, до вимкнення основного ступеня 15 і ввімкнення додаткових ступенів 7-10. Подібна процедура повторюється аж до почергового вимкнення основних ступенів 14, 13, а потім і додаткових ступенів 7-10 згідно з табл., тобто до моменту, коли  $I_p = 0$ .

Після проведеного розгляду можна бачити, що компенсація РП з використанням допоміжної багатоступінчастої системи конденсаторів 6 зменшує некомпенсовану частку РП у 10 разів: без неї некомпенсована частка РП близька до потужності основного ступеня конденсаторів 13, 14, ..., n, а в способі, що заявляється, ця частка в 10 разів менша і дорівнює потужності додаткового ступеня 7, потужність якого становить 0,1 від потужності ос-

новного ступеня конденсаторів.

Для зменшення до безпечного рівня стрибків струмів при ввімкненні додаткових ступенів 7-10 на напругу мережі 1 послідовно з конденсаторами цих ступенів включені індуктивні реактори 12 з невеликим індуктивним опором, достатнім для обмеження стрибка струму. Завдяки невеликій потужності конденсаторів ступенів 7-10 потужність реакторів 12 також невелика і втрати активної потужності в їх активному опорі в 10-100 разів менші тих, які були би у тому разі, якби такі реактори були включені послідовно з конденсаторами основних ступенів.

Розглянемо тепер стрибкоподібну зміну РП. Нехай раптове збільшення відстаючого реактивного струму від нуля складає  $I_p = 2, 3$ . Тоді вмикають основні ступені конденсаторів 13, 14 і додаткові ступені 7, 8. Сума їх компенсуючих випереджаючих струмів  $I_7 + I_8 + I_{13} + I_{14} = -(0,1 + 0,2 + 1 + 1) = -2,3$ , що забезпечує повну компенсацію РП. Подальше стрибкоподібне збільшення відстаючого реактивного струму на 1,2 призводить до ввімкнення ще одного основного ступеня 15, додаткового ступеня 10 і одночасного вимкнення додаткового ступеня 8, що забезпечує компенсуючий випереджаючий реактивний струм 3, 5 і повну компенсацію РП. Якщо тепер раптове зменшення відстаючого реактивного струму складе 2, 3, то вимикають основні ступені конденсаторів 15, 14, додаткові ступені 10, 7 і вмикають додатковий ступінь 8, забезпечуючи повну компенсацію РП. В цьому разі  $I_p = 1,2$  і  $I_8 + I_{13} = -1/2$ . Робота способу регулювання компенсації РП при інших цифрах стрибкоподібних змін відстаючого реактивного струму зрозуміла з вищеописаного.

Розглянутий спосіб регулювання компенсації РП вже знайшов практичне використання при модернізації діючих конденсаторних установок, які здійснюють компенсацію РП в промислових електричних мережах змінної напруги, що дало відчутний економічний ефект. Зазначимо, що в конденсаторних установках з автоматичним керуванням компенсації РП, які випускають промислові підприємства України (у містах Вінниця, Київ, Дніпропетровськ, Київська обл. тощо) використовують вищезгадані способи регулювання компенсації РП по одиничному (1:1:1:...) або двоїчному (1:2:4:...) кодам, про значні недоліки яких вже було сказано вище. Це ж саме стосується і зарубіжних конденсаторних установок, які завозяться до України.

