

УДК 621.313.32

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

*А.О. Омельчук, А.М. Скрипник, кандидати технічних наук,*

*Б.П. Савченко, слухач магістратури*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Проведені обґрунтування необхідності системної компенсації реактивної потужності, виконаний аналіз нормативних документів щодо компенсації реактивної потужності в мережах електричної системи. Обґрунтовано необхідність створення алгоритму управління параметрами і режимами роботи всіх джерел реактивної потужності з метою забезпечення її балансу у вузлах навантаження і економічної роботи електричних мереж всіх рівнів.*

*Джерела реактивної потужності, баланс реактивної потужності, алгоритм управління, оптимальні параметри, режим роботи, питомі транспортні витрати.*

Важливим інструментом державної політики повинна стати підтримка заходів в області енергозбереження, що дозволить сформувати енергозберігаючі компанії, котрі пропонують і реалізують оптимальні наукові, проектно-технологічні, виробничі рішення, направлені на зниження енергоємності.

Важливим завданням в області практичних дій з енергозбереження являється запуск за допомогою регулятивних механізмів роботи щодо нормалізації потоків реактивної потужності і її компенсації. Це покладе початок глобальному процесу зниження втрат електричної енергії в електричних мережах, що рівнозначно будівництву нових генеруючих потужностей тільки при значно менших витратах.

Перша причина зменшення  $\cos\varphi$  навантаження електричних мереж - це зміни в характері навантаження електроспоживання. Поширення

технологічного устаткування на напівпровідниковій базі, збільшення долі освітлювального навантаження одночасно із зменшенням в ній долі ламп розжарювання, збільшення долі нелінійного навантаження у складі побутової техніки привели до значного завантаження розподільних електричних мереж потоками реактивної потужності. Другою причиною - є недосконалість законодавства.

**Мета дослідження** – техніко-економічне завдання вибору потужності і розміщення КУ в електричних мережах розділяється на дві складові: підтримка балансу реактивної потужності в електричній системі і зниження втрат потужності і електроенергії в розподільних мережах.

**Матеріали та методика досліджень.** Автори публікації [4] пропонують вирішення цієї задачі шляхом розв'язанням системи нелінійних рівнянь вузлових напруг у формі балансу потужностей, наприклад, методом Ньютона.

Представляє інтерес використання методу питомих транспортних витрат (ПТВ) для визначення місць розташування та оптимізації параметрів ДРП в електричних мережах енергосистем. Це частинні похідні від витрат активної потужності за реактивною потужністю, яка передається від джерел генерації до конкретного споживача шляхами його електроспоживання. Локальний характер ПТВ забезпечує простоту розрахунків їх значень та ефективність використання результатів на практиці.

Для кожної ділянки  $i - j$  електричної мережі ПТВ визначаються як:

$$\lambda_{ij}^l = \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial Q_{ij}} = \frac{2Q_{ij}}{U_i^2} R_{ij} \quad (1)$$

де  $\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij}$  – втрати активної потужності на ділянці  $i - j$

електричної мережі;  $Q_{ij}$  – перетікання реактивної потужності на ділянці мережі від вузла  $i$  до вузла  $j$ ;  $U_i$  – рівень напруги  $i$ -го вузла;  $R_{ij}$  – активний опір ділянки  $i - j$  електричної мережі.

Розрахунки ПТВ за схемою складної (розгалуженої) електричної мережі виконується згідно з шляхами електропостачання від джерел живлення до

вузлів споживання розімкнутої мережі та до місць розподілу перетоків у замкнутій мережі. Для розподільних мереж, які на даний час за технологічними умовами експлуатуються розімкнутими (35 кВ і нижче), джерелами живлення можуть вважатися шини електричних підстанцій з первинними обмотками трансформаторів напругою 110 кВ і вище. Величина ПТВ  $\lambda'_{ij}$  по шляхах від вузлів живлення  $s$  до вузлів споживання  $f$  розраховуються як алгебраїчна сума ПТВ ділянок мережі, що знаходяться між вузлами  $s$  і  $f$  згідно з виразом (1), тобто

$$\lambda'_{sf} = \sum_s^f \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial Q_{ij}} = \frac{2Q_{ij}}{U_i^2} R_{ij} \quad (2)$$

**Результати досліджень.** Аналіз системних аварій у світовій енергетиці останніх десятиліть показує, що майже усі вони супроводжувались розвитком лавини напруги – прогресуючим зниженням напруги по усій мережі, викликаним дефіцитом реактивної потужності. Тому забезпечення запасів реактивної потужності потрібне не лише для підвищення економічності функціонування мереж, але і для забезпечення надійності і живучості великих систем, їх здатності протистояти розвитку каскадних аварій. Це, мабуть, повинно бути зафіксовано в нормативних документах, що визначають можливість експлуатації мережевих підприємств.

Негативний результат відсутності балансу реактивної потужності у вузлах навантаження проявляється також в наступному:

- зростає число випадків відключення споживачів і збільшуються розміри навантажень, відключених захистами при зниженні напруги під час коротких замикань в електричних мережах і циклів (режимів) АПВ або АВР в електричних мережах, що говорить про недостатню стійкість навантаження до зовнішніх збурень у зв'язку з відсутністю запасу по напрузі на шинах приєднання.

- в багатьох регіонах енергосистеми є висока імовірність введення в дію максимуми навантажень графіків аварійного відключення споживачів через перевантаження ліній електропередачі і трансформаторів підстанцій, у тому числі і необґрунтованими потоками реактивної потужності.

- передчасний дефіцит активної потужності у ряді вузлів і в цілих регіонах через істотне зростання втрат активної потужності в електричних мережах і граничне завантаження ліній електропередачі надмірними потоками реактивної потужності не тільки погіршили техніко-економічну ефективність електромережевого бізнесу, але і привели до заборони приєднання нових споживачів або збільшення потужності приєднаних.

Проблема з вибором параметрів і режимів роботи джерел реактивної потужності (ДРП) в електричних мережах і, тим більше, проблема перетоків і балансу реактивної потужності із набуттям чинності методики [2] стала неврегульованою і актуальною для розподільних мереж. Автори концепції нової (чи вдосконаленої) методики оплати за реактивну енергію, посиляючись на уже не чинні нормативні документи [1,6] і ряду інших публікацій, зокрема, статті [7], ігнорують діючі документи [3]. Це призводить до того, що проблему унормування перетоків реактивної енергії на межі балансової приналежності мереж споживачів та електропостачальних організацій намагаються перекласти на споживачів. Тобто споживачі повинні сплачувати за продукцію, але купувати тоді і стільки, скільки йому дозволять, ігноруючи ринковий підхід до реалізації електроенергії. Звичайно, нині пролобіювати можна цей підхід, як і деякі інші, нелогічні з точки зору ринкових відносин. На жаль, подібні приклади є (згадаймо нормативи щодо приєднання до електромереж, формування тарифів на електроенергію, відповідальність електропостачальних організацій за неякісну електроенергію тощо). Це поведінка монополіста на ринковому просторі.

На допомогу споживачам для реалізації положень [2] був розроблений і введений у дію норматив [3], згідно з яким проект улаштування компенсації реактивної потужності (КРП) виконується за рахунок коштів споживачів на підставі параметрів їх мереж та параметрів режимів роботи електроприймачів. І чому споживачі повинні вирішувати задачу балансу реактивної потужності в мережах електропостачальних організацій і оптимізації перетоків реактивної потужності? Тим більше, що споживачі сплачують кошти згідно [2] на розв'язання цієї задачі.

А задачу балансу реактивної потужності (стійкості електричної системи тощо) розв'язувати необхідно, оскільки ця проблема із введенням в дію [2] тільки загострилась. В нинішніх нормативно-правових умовах, на відміну від попередніх, задачу балансу реактивної потужності у вузлах навантаження системи необхідно вирішувати знизу (від розподільних мереж, де повна невизначеність, обумовлена суб'єктивним ставленням споживачів до КРП) до верху (в системоутворюючих мережах).

Прикро, що деякі електропостачальні організації та інспекції з енергозбереження вимагають від споживачів забезпечення певної величини коефіцієнта потужності  $\text{tg}\varphi$  на межі балансової приналежності мереж споживачів і електропостачальних організацій, посилаючись на [6], або п.3.32 [1]. По-перше, документ [1] є нормою технологічного проектування електричних систем і мереж 35 кВ і вище. По-друге, стосовно споживачів, тоді рекомендації п.3.32 [1] відносно нормування  $\text{tg}\varphi$  і компенсації реактивної потужності вступають у протиріччя з [2,3], оскільки останні набули чинності пізніше, про це додатково свідчить і зміст п. 3.32 [1].

Перший абзац п.3.32 [1] спонукає в мережах системи забезпечувати запас стійкості і нормативні рівні напруги, до чого споживачі згідно з документами [2], [3] не зобов'язані. Другий абзац свідчить про те, що на час набуття чинності документа [1] методик [2] і [3] не існувало.

Таким чином, актуальною постає задача забезпечення балансу реактивної потужності в електричній системі, а отже компенсації реактивної потужності в електричних мережах різних рівнів напруги, чому не заперечують методики [2] і [3].

Із введенням методики [2] енергосистемою втрачена правова основа для взаємодії із споживачами у частині оптимізації реактивної потужності, тому необхідна нормативна база, яка б стимулювала електропостачальні організації активніше залучатись до впровадження заходів щодо забезпечення балансу і компенсації реактивної потужності в електричній системі [4].

Проте недостатність інформації щодо режимів електроспоживання споживачів і відсутність можливості вплинути на них ускладнює повний контроль над процесом управління реактивною потужністю.

Така ситуація з неконтрольованістю перетікання реактивної потужності призводить до абсолютно негативних наслідків як для енергосистеми, так і для споживачів електроенергії.

По-перше, недотримання споживачами встановлених норм щодо коефіцієнта реактивної потужності створює додаткові втрати для енергосистеми, а по-друге, зниження пропускної спроможності мереж погіршує показники роботи електронергетичних компаній, що створює ризик призупинення електропостачання для споживачів. Особливо це небезпечно для перевантажених розподільних мереж, через недостатні темпи їх реконструкції і розвитку.

Більшість аварійних переривів в електропостачанні викликана перевантаженням мереж і їх нездатністю пропускати підвищені навантаження, не дивлячись на цілком допустимі розрахункові режими. Своєчасна оптимізація реактивної потужності в мережах могла б запобігти тяжким наслідкам.

У наш час вже не йдеться про економію при будівництві електричних мереж, а споживач вимагає найголовнішого – надійного, безперебійного та якісного електропостачання. Одним із позитивних заходів у цьому напрямку є централізований контроль і управління розосередженими джерелами реактивної потужності, розміщених у розподільчих мережах 35 – 10 кВ та в мережах споживачів 0,38 кВ. Тільки в цьому випадку можливе оптимальне використання реактивної потужності, генерованої як лініями електропередавання напругою вище 35 кВ, так і додатковими джерелами. Передача електроенергії – це безперервний процес в єдиній електричній системі, що вимагає централізованого управління важливою складовою цього процесу – перетоками і балансом реактивної енергії.

Процес управління реактивною потужністю потрібно здійснювати без впливу форм власті на окремі ланки електричної системи.

На початку необхідно провести інвентаризацію і модернізацію засобів обліку реактивної потужності та діючих ДРП.

Окрім цього, на особливо проблемних ділянках електричних мереж необхідно встановлювати компенсуючі пристрої, як це робиться в інших країнах.

Значення оптимізації реактивної потужності важко переоцінити. Час вимагає і від енергетиків і від споживачів підвищеної дисципліни і відповідальності в вирішенні цього питання для досягнення і тими, й іншими високих показників при експлуатації електричних мереж різного рівня напруги та якісного їх розвитку в майбутньому.

В нових нормативних умовах регулювання перетікання реактивної енергії споживачі не мають обмежень щодо об'ємів і режимів її споживання. Тому реактивна потужність на межі балансової приналежності електричної мережі може змінюватись у межах від 0 (повна компенсація реактивної потужності споживачами) до максимального, прийнятого за розрахункове, реактивного навантаження споживачів (перетікання реактивної енергії до споживачів виключно з електричної системи).

Незважаючи на рівень компенсації реактивної потужності у мережі споживачів і за відсутності впливу на це електропостачальних організацій, доцільно економічно мінімізувати технологічні втрати електроенергії в розподільних мережах. Обґрунтування місць встановлення ДРП можна здійснювати як в мережах споживачів, так і в мережах електропостачальних організацій. Оптимізація параметрів і місця встановлення ДРП в розподільних мережах розглядалась у ряді публікацій [4, 5, 7]. Критерієм оптимального використання ДРП в таких мережах, обґрунтування параметрів і режимів роботи ДРП може бути мінімум сумарних приведених затрат, або максимум чистого дисконтованого доходу від їх роботи [3, 4].

Оскільки робота ДРП, крім зменшення втрат електроенергії, впливає і на втрати напруги в електромережі, тоді складність впровадження ДРП іноді пов'язують з необхідністю забезпечення жорстких вимог щодо режиму напруги у вузлах навантаження розподільних мереж, тобто складністю одночасного

вирішення питань зниження втрат електроенергії і регулювання напруги в електромережі.

Наявність регуляторів напруги під навантаженням у вузлах живлення розподільну мережу з точки зору режиму напруги можна вважати як незалежну від режиму напруги електричної мережі вищого рівня. Тому задача оптимізації рівнів напруги у розподільній мережі і нормованих відхилень напруги у споживачів повинна вирішуватися за допомогою як регульованих надбавок у силових трансформаторів, так і інших засобів регулювання напруги за необхідністю.

При оптимізації параметрів і режимів роботи ДРП пріоритетним має бути забезпечення балансу реактивної потужності у вузлах навантаження з одночасним зниженням втрат електроенергії в розподільній електричній мережі.

Зниження величини ПТВ безпосередньо пов'язане з зменшенням як втрат активної потужності, так і втрат напруги, і можливе за рахунок генерації реактивної потужності встановлених у розімкнутій розподільній мережі додаткових ДРП.

Додаткові ДРП бажано встановлювати у вузлах найбільшого споживання реактивної потужності або у мережах нижчого рівня напруги, що живляться від цих вузлів. Особливо актуальним встановлення ДРП у вказаних вузлах є тоді, коли по даному шляху електропостачання живляться ще споживачі, що знаходяться за вузлами найбільшого споживання реактивної потужності, у яких якість електричної енергії може бути заниженою.

Оптимальним використанням ДРП можна вважати зниження ПТВ до досягнення у всіх вузлах споживання розподільної мережі допустимих рівнів напруги згідно ПУЕ, або ж, в ряді випадків, до досягнення точки переходу від зниження ПТВ до його збільшення, що можливе при видачі реактивної потужності відповідного ДРП в мережу. Величина генерації реактивної відповідних ДРП визначається в результаті розрахунків і надається в результуючій інформації.



Використання ДРП для зниження ПТВ розглянемо на прикладі фрагменту схеми розподільчої мережі напругою 10 кВ, наведеної на рис.1, з параметрами ділянок та вузловими навантаженнями, наданими в табл.1 і 2.

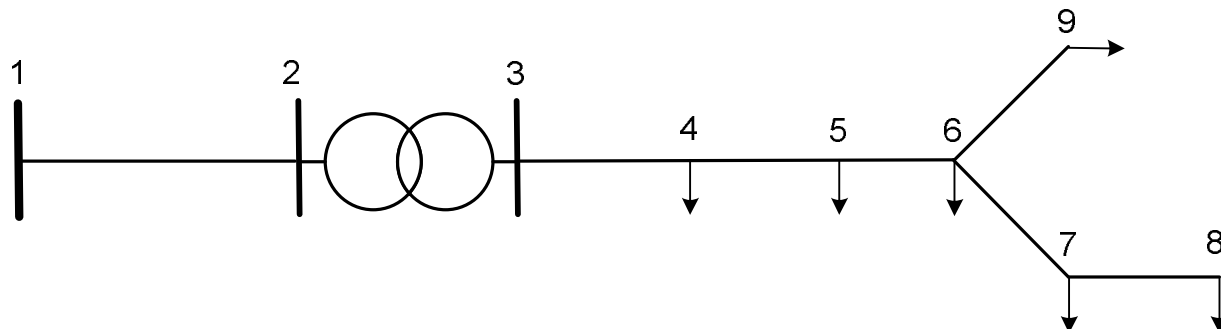


Рис. 1. Фрагмент схеми електричної мережі

### 1. Параметри ділянок мережі

Ділянка мережі	Номинальна напруга, кВ	Марка проводу, тип трансформатора	L, км	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$b_0$ , мкСм/км	R, Ом	X, Ом	K, у.о.
1-2	110	АС-150	28	0,198	0,42	2,707	5,54	11,76	-
2-3	110/10	ТМН-6300	-	-	-	-	14,7	220,4	10,4 5
3-4	10	АС-70	0,5	0,428	0,4	-	0,22	0,20	-
4-5	10	АС-70	0,4	0,428	0,4	-	0,17	0,16	-
5-6	10	АС-70	0,6	0,428	0,4	-	0,26	0,24	-
6-7	10	АС-50	0,7	0,63	0,4	-	0,44	0,28	-
6-9	10	АС-35	0,7	0,91	0,4	-	0,65	0,28	-
7-8	10	АС-50	0,5	0,63	0,4	-	0,32	0,20	-

### 2. Вузлові навантаження мережі

№ вузла	4	5	6	7	8	9
P, кВт	520	460	1420	380	360	380
Q, кВАр	250	220	1400	180	170	180
cosφ	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9

Результати розрахунку усталеного режиму у вигляді вузлових напруг та перетоків реактивної потужності наведено в табл. 3.

Сумарні втрати активної потужності  $\Delta P_{\Sigma}=131,72$  кВт, а сумарна величина ПТВ  $\lambda_{\Sigma}''=35,597722$  кВт/кВАр.

Значне навантаження та занижений коефіцієнт потужності у вузлі 6 призводить до зниження якості електроенергії у вузлах суміжних та розрахованих за ним і, як наслідок, до значних втрат електроенергії.

### 3. Результати розрахунку усталеного режиму

№ вузлів	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, кВ	112,0	111,51	10,10	9,97	9,88	9,77	9,72	9,71	9,74
№ ділянок	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	6-9	7-8	
Q,кВАр	2900,63	2880,41	2498,77	2200,99	1958,27	352,28	180,48	170,31	

Для підвищення якості електроенергії у споживачів, що живляться по даному фрагменту мережі, доцільно у вузлі 6 встановити ДРП. Так, при досягненні генерації реактивної потужності встановленого ДРП 1220 кВАр якість електроенергії покращилась (напруга у вузлі розподільної мережі 10 кВ установилась в діапазоні 10,37-10,06 кВ), величина ПТВ знизилась до величини 18,256236 кВт/кВАр, а загальні втрати  $\Delta P_{\Sigma}$  зменшились до величини 93,01 кВт.

Порогове значення ПТВ 9,946609 кВт/кВАр (точка переходу від зменшення до збільшення) настає при генерації реактивної потужності у вузлі 6 рівній 2500 кВАр. Значення вузлових напруг та реактивних перетоків фрагменту схеми наведено в табл. 4.

### 4. Значення вузлових напруг та реактивних перетоків при досягненні генерації ДРП до 2500 кВАр

№ вузлів	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, кВ	112,0	111,8	10,63	10,56	10,52	10,47	10,43	10,41	10,44
№ ділянок	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	6-9	7-8	
Q, кВАр	199,67	188,23	-69,49	-335,18	-569,58	352,02	180,52	170,30	

При цьому сумарні втрати активної потужності  $\Delta P_{\Sigma}$  знизилась до 80,52 кВт, тобто загальна економія втрат складає 131,72 - 80,52=51,2 кВт.

За покращення якості електроенергії та зниження втрат активної потужності власникам ДРП необхідно встановлювати грошову компенсацію, відповідну величині виданої в мережу реактивної потужності.

При виконанні оптимізаційних розрахунків величина кроку зміни генерації відповідного ДРП використовується величина сумарних ПТВ в розімкнутих мережах, ПТВ по шляхах живлення до встановлених ДРП в замкнутих мережах, а для прискорення процесу розрахунків вказані величини ПТВ з врахуванням коефіцієнту прискорення.

Вирішення задачі забезпечення балансу реактивної потужності із залученням ДРП виключає будь-які проблеми з режимом напруги у вузлах мережі 110 кВ і вище з забезпеченням умов статичної стійкості електричної системи, незалежно від об'ємів перетікання реактивної енергії між мережами різних рівнів напруги.

### **Висновки**

Із набуттям чинності методики [2] проблема балансу реактивної потужності у вузлах навантаження електричної системи стала некерованою.

У нинішніх нормативно-правових умовах задачу балансу реактивної потужності у вузлах навантаження системи необхідно вирішувати шляхом централізованого управління природними і обґрунтовано встановленими джерелами реактивної потужності на всіх рівнях електричної системи.

При оптимізації параметрів і режимів роботи ДРП в розподільній електричній мережі пріоритетним має бути зниження втрат електроенергії, а режим напруги у вузлах навантаження не повинен впливати на обґрунтування параметрів ДРП.

Характерним параметром режиму роботи ДРП є питомі втрати активної потужності на транспортування реактивної потужності.

### **Список літератури**

1. ГКД 341.004.003.-94. Нормы технологического проектирования энергетических систем и электрических сетей 35 кВ и выше. – 28 с.

2. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01.2002/ Офіційний вісник України. – 2002. – №48. – С. 71 – 147.
3. СОУ – Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача). – 48 с.
4. Омельчук А.О. Щодо балансу реактивної потужності в мережах живлення в нових нормативних умовах перетоків реактивної енергії в Україні / А.О.Омельчук, А.М.Скрипник, В.С.Трондюк// Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК».– 2011.– №161.– С. 111 – 119.
5. Резніченко Т.П., Омельчук А.О. Про ефективність компенсації реактивної потужності в районних електричних мережах// Енергетика и электрификация. –2001. – №6. – С. 26 – 29.
6. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительный сетях.– М.: Энергия, 1974. – 73 с.
7. Паламарчук О.П., Демов О.Д., Григораш Ю.А., Бандура І.О. Спрощений розрахунок плати за реактивну енергію// Промелектро. –2010. – №2. – С. 9 – 11.
8. Скрипник А.М. Використання методу питомих транспортних витрат для сезонної оптимізації конфігурації схем / А.М.Скрипник, А.О.Омельчук, О.В. Хоменко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК», 2011.– №166, частина 3. – С. 133-140.

*Выполнено обоснование необходимости системной компенсации реактивной мощности, выполнен анализ нормативных документов относительно компенсации реактивной мощности в сетях электрической системы. Обоснована необходимость создания алгоритма управления параметрами и режимами работы всех источников реактивной мощности с*

*целью обеспечения ее баланса в узлах нагрузки и экономической работы электрических сетей всех уровней.*

***Источники реактивной мощности, баланс реактивной мощности, алгоритм управления, оптимальные параметры, режим работы, удельные транспортные расходы.***

*The ground of necessity of system indemnification of reactive-power is conducted, the analysis of normative documents is executed in relation to indemnification of reactive-power in the networks of the electric system. The necessity of creation of management algorithm is reasonable by parameters and modes of operations of all sources of reactive-power with the purpose of providing of her balance in the knots of loading and economic work of electric networks of all levels.*

***Sources of reactive-power, balance of reactive-power, management algorithm, optimal parameters, office hours, cost transport per units.***