

УДК 621.316

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.5

**І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, І.А. Басалко***Луцький національний технічний університет***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

*Роботу присвячено дослідженню взаємовпливу розподільних електричних мереж та розосереджених джерел енергії, а саме вирішенню завдань визначення та оперативного керування критерію оптимальності для проектних та експлуатаційних задач компенсації реактивної потужності з урахуванням впливу режимів розосереджених джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж.*

*Ключові слова:* розосереджені джерела енергії; економічні еквіваленти реактивної потужності; коефіцієнт чутливості; матриця коефіцієнтів розподілу втрат.

**И.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, И.А. Басалко****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

*Работа посвящена исследованию взаимного влияния распределительных электрических сетей и рассредоточенных источников энергии, а именно решению задач определения и оперативного управления критерия оптимальности для проектных и эксплуатационных задач компенсации реактивной мощности с учетом влияния режимов рассредоточенных источников энергии на функционирование распределительных электрических сетей.*

*Ключевые слова:* рассредоточенные источники энергии; экономические эквиваленты реактивной мощности; коэффициент чувствительности; матрица коэффициентов распределения потерь.

**I.V. Hrytsiuk, Y.V. Hrytsiuk, I.A. Basalko****MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX LOSS OF ACTIVE POWER IN ELECTRICAL NETWORKS WITH DISPERSED ENERGY SOURCES**

*The work is devoted to the study of the mutual influence of distribution electric grids and dispersed energy sources, namely, solving problems of determining and operational control of the optimality criterion for design and operational problems of reactive power compensation, taking into account the influence of modes of dispersed energy sources on the functional distribution of electricity.*

*Determination of the distribution of electricity losses in electrical networks from leakage of reactive power, namely the calculation of the corresponding components of active power losses in the branches of the electrical networks that transmit reactive power to certain consumers and from dispersed sources of energy, it is advisable to carry out their analysis.*

*Key words:* dispersed energy sources; economic equivalents of reactive power; coefficient of sensitivity; matrix of coefficients of distribution of losses.

**Постановка проблеми.** Питання використання розосереджених джерел енергії (РДЕ) в електромережах з метою підвищення якості електропостачання споживачів на сьогодні є мало дослідженими. Важливим є оцінювання їх впливу на режими роботи розподільних електричних мереж (ЕМ) за напругою та реактивною потужністю, а також визначення складової втрат електроенергії, зумовленої перетіканнями реактивної потужності за рахунок роботи РДЕ.

Недослідженість зазначених питань проявляється у некоректності визначення (часто з завищенням) економічних еквівалентів реактивної потужності (ЕЕРП) та необґрунтовано занижених нормативах втрат електроенергії в них. Перше зумовлює зниження економічної ефективності роботи юридичних споживачів, а також власників РДЕ, які транспортують електроенергію до енергоринку з використанням ЕМ, а друге – погіршує економічні показники функціонування власне розподільних електромереж.

Використання діючої методики для визначення ЕЕРП може, за певних умов, призводити до протиріччя, що полягає у зростанні плати за перетікання реактивної потужності для РДЕ, які, фактично, забезпечують групову компенсацію реактивного споживання електромереж. Останнє, впливаючи на прибуткову частину економічного балансу роботи таких підприємств, негативно впливає на рентабельність інвестицій у розбудову відновлюваної енергетики і є одною з причин економічної недоцільності розбудови РДЕ малих встановлених потужностей, хоча позитивний вплив останніх на режими електромереж був багаторазово підтверджений у вітчизняних та закордонних публікаціях [1, 2].

Враховуючи можливість приєднання зазначених джерел енергії в електрично-віддалених вузлах з огляду на потреби групового регулювання перетоків реактивної потужності та напруги в ЕМ, саме на таких станціях доцільно встановлювати керувані засоби КРП, а іноді й, статичні

тиристорні компенсатори (СТК). Це ж стосується умовно-керованих РДЕ з АГ, функціонування яких визначається випадковим впливом навколишнього середовища, наприклад, вітрових електростанцій.

Дослідження взаємовпливу розподільних електричних мереж та РДЕ, а також математичне моделювання складової втрат електроенергії, зумовлених перетіканнями їх реактивної енергії, дозволить сформулювати умови оптимального взаємовпливу РДЕ та споживачів електричної мережі, а також адекватно визначити місця встановлення засобів одиничної та групової компенсації реактивної потужності, крім того, коригувати уставки систем автоматичного керування процесом компенсації. Це сприятиме забезпеченню комплексності підходу до розв'язання задачі, а отже, підвищенню ефективності технічних рішень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Складність задачі оцінювання впливу окремих споживачів та джерел реактивної потужності на втрати активної потужності в електромережах полягає в тому, що втрати залежать від перетікань у вітках заступної схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо [3].

Використання даних методів в розімкнених розподільних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування режимів ЕМ. Однак, у розподільних ЕМ з двобічним живленням, що виникає за рахунок впливу РДЕ, збільшується вплив нелінійності функції втрат потужності, що може викликати суттєві похибки обчислення додаткових технічних втрат електроенергії [4, 5].

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – розв'язати задачі визначення та оперативного коригування критерію оптимальності для проектних та експлуатаційних задач компенсації реактивної потужності з урахуванням впливу режимів РДЕ на функціонування розподільних ЕМ.

Визначення розподілу втрат електроенергії в ЕМ від перетікань реактивної потужності, а саме розрахунок відповідних складових втрат активної потужності у вітках електричних мереж, якими передається реактивна потужність до певних споживачів та від РДЕ, доцільно здійснювати з урахуванням аналізу їх чутливості.

**Викладення основного матеріалу.** Коефіцієнти чутливості втрат активної потужності до зміни споживання (генерування) реактивної потужності, що чисельно дорівнюють економічним еквівалентам реактивної потужності, можна визначити надаючи малі прирости реактивній потужності вузлів (за аналітичного підходу – нескінченно малі).

На етапі вибору методу розподілу втрат перевагу слід віддавати таким, що забезпечують можливість використання аналітичного підходу до розподілу втрат електроенергії в ЕМ та визначення ЕЕРП, оскільки аналітичні критерії оптимальності в задачах керування мають ряд переваг у контексті побудови системи керування та її алгоритмічного забезпечення.

Для розв'язання задачі визначення впливу на втрати в ЕМ окремих вузлів споживання та генерування в [4, 6] обґрунтовано можливість використання лінеаризованої моделі заданого усталеного режиму ЕМ, наприклад режиму середніх навантажень. Використовуючи елементи матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках заступної схеми розподільної ЕМ  $\dot{T}$  можна визначити складові втрат потужності в окремих вітках ЕМ від перетікань потужності до окремих вузлів.

Коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів заступної схеми, а також від значень напруги у вузлах ЕМ, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Отже, нелінійність залежності втрат потужності в ЕМ від параметрів її режиму враховується.

Визначення коефіцієнтів матриці  $\dot{T}$  через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі за зафіксованих потужностей у вузлах. Тобто за малих відхилень потужностей в умовах розподільних електромереж з РДЕ коефіцієнти матриці  $\dot{T}$  можна вважати постійними [5]. Таким чином, для випадку, коли зміна потужностей у вузлах ЕМ є незначною, тобто не викликає істотних (більше 1%) відхилень напруги у вузлах, залежність втрат потужності в ЕМ від потужностей у її вузлах можна вважати лінійною. А для дослідження впливу компенсації реактивної потужності та РДЕ на втрати потужності в розподільних мережах з прийнятною точністю можна використовувати метод накладання.

З огляду на забезпечення максимальної відповідності результатів математичного моделювання складових втрат електроенергії в ЕМ, зумовлених окремими перетіканнями реактивної потужності до споживачів та розосереджених джерел природно скористатися властивостями диференціалу та диференціальним методом розподілу втрат потужності. На основі

[7], з урахуванням розподілу втрат між окремими споживачами (джерелами) реактивної потужності, можна записати:

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i \in N_j} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} Q_i \right) k_{\Phi Q_j}^2 \right\} t, \quad (1)$$

або після перегрупування складових

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j \in M_i} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Q_j}^2 \right) Q_i \right\} t = \sum_{i=1}^n \Delta W_{Q_i}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість вузлів ЕМ, у яких приєднані споживачі, розосереджені джерела електроенергії та засоби компенсації реактивної потужності;

$\Delta P_j$  – сумарні втрати потужності у  $j$ -ій вітці ЕМ;

$Q_i = Q_{Hi} - Q_{KVi} - Q_{PDEi}$  – реактивна потужність, що споживається (генерується) у  $i$ -му вузлі ЕМ з урахуванням локальних та групових засобів КРП;

$M_i$  – множина віток ЕМ, якими здійснюється транспортування реактивної потужності до  $i$ -го вузла. В загальному випадку (для замкненої ЕМ, або мережі з двобічним живленням) множина  $M_i$  може включати всі  $m$  віток заступної схеми ЕМ. Це дещо збільшує обсяг непродуктивних обчислень, однак, враховуючи прийнятну схему розподілу втрат електроенергії, практично не впливає на кінцевий результат;

$\Delta W_{Q_i} = D_i Q_i t$  – складова втрат електроенергії в ЕМ, зумовлена транспортуванням реактивної потужності до  $i$ -го вузла;

$$D_i = \sum_{j \in M_i} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Q_j}^2 \right) - \quad (3)$$

економічний еквівалент реактивної потужності, визначений з урахуванням змінного графіка перетоків реактивної потужності у вітках ЕМ, зумовленого нестабільністю навантажень та впливу РДЕ.

Використовуючи (2) вирази для визначення складових витрат енергопостачальної компанії на транспортування перетікань реактивної потужності в ЕМ можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} B_{СП} &= \sum_{i \in N_{СП}} [D_i (Q_{Hi} - Q_{KVi})] \zeta_0 t; \\ B_{PDE} &= \sum_{i \in N_{PDE}} [D_i (Q_{PDEi} - Q_{KVi})] \zeta_0 t, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $N_{СП}$ ,  $N_{PDE}$  – відповідно, множини вузлів ЕМ, до яких приєднані споживачі та розосереджені джерела електроенергії.

Як видно з (4), основною проблемою розрахунку значень цільової функції оптимізації рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ та керування засобами КРП є визначення та оперативне коригування економічних еквівалентів реактивної потужності  $D_i$ .

Для вирішення проблеми було залучено метод коефіцієнтів розподілу втрат потужності в ЕМ [4, 6] – з метою визначення коефіцієнтів чутливості  $\frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i}$ .

Метод розподілу втрат активної потужності в електромережах на підставі умовно-постійних коефіцієнтів для визначення економічних еквівалентів реактивної потужності  $D$  був запропонований у [8]. Перевагою є те, що метод не передбачає еквівалентування ЕМ і ґрунтується на електротехнічних розрахунках. Однак визначення коефіцієнтів розподілу за номінальними напругами у вузлах ЕМ є важливим недоліком.

Втрати у вітках схеми електричної мережі в залежності від активної та реактивної потужності навантаження можуть бути визначені з результатів розрахунку нормального режиму за фіксованих потужностей у вузлах з врахуванням нелінійної залежності втрат від параметрів режиму. На цій підставі запропоновано використовувати матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності, яка дозволяє аналітично поєднати втрати потужності у вітках з потужностями у вузлах ЕМ. Кожен рядок матриці визначається за таким виразом:

$$\hat{T}_i = (\dot{U}_t \dot{M}_{\Sigma ki}) \hat{C}_{ki} \dot{U}_d^{-1}, \quad (5)$$

де  $\dot{T}_i$  – вектор-рядок матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності в  $i$ -тій вітці від потужностей вузлів ЕМ, з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації;

$\dot{U}_i$  – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і балансувальні (тут і далі індекс “ $i$ ” означає, що матриця або вектор є транспонованими);

$M_{\Sigma k}$  – матриця зв’язків віток у вузлах, що за структурою подібна до першої матриці з’єднань  $M_{\Sigma i}$ , але в якій замість значень “–1” для вузлів кінця віток з трансформаторами знаходяться їх коефіцієнти трансформації;

$C_k$  – матриця струморозподілу з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв’язків;

$\dot{U}_d$  – діагональна матриця напруг у незалежних вузлах ЕМ.

Матриця  $\dot{T}$  залежить від параметрів схеми ЕМ, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах, які обумовлені навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Нелінійність залежності втрат від параметрів режиму зберігається.

З врахуванням (5) можна записати вираз для визначення втрат потужності у вітках заступної схеми:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{T} \dot{S} + \Delta \dot{S}_{nb}, \quad (6)$$

де  $\Delta \dot{S}_{nb}$  – вектор-стовпець додаткових втрат потужності у вітках схеми, що виникають за рахунок незбалансованих коефіцієнтів трансформації у контурах ЕМ. Для електромереж без трансформаторних зв’язків у контурах (до яких належать розподільні електромережі)  $\Delta \dot{S}_{nb} = 0$ .

Коефіцієнти матриці розподілу втрат  $\dot{T}$  є комплексними, а їх складові можуть приймати додатні та від’ємні значення, що показує яким чином навантаження певного вузла змінює поточкорозподіл в ЕМ, наближаючи його до оптимального, тобто зменшуючи сумарні втрати потужності та електроенергії. Використання матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності  $\dot{T}$  для визначення ЕЕРП дозволить пов’язати задачі компенсації реактивної потужності та оптимізації її поточкорозподілу з урахуванням балансових та режимних обмежень.

На величину сумарних втрат активної потужності в електричних мережах впливають потужностей джерел енергії, параметри споживання, коефіцієнти трансформації трансформаторів, а також взаємні і транзитні перетоки потужності.

Сумарні втрати потужності у вітках для заданого режиму роботи ЕМ можуть бути визначені за формулою (6) з використанням коефіцієнтів розподілу втрат (5). Остання складова виразу (6)  $\Delta \dot{S}_{nb}$  неявно залежить від потужностей генерування та споживання (через значення напруг у вузлах) і являє собою власні технологічні втрати потужності в електричних мережах ЕМ, що зумовлені регульовальними впливами на силові трансформатори, необхідними для забезпечення технічних обмежень та оптимального розподілу потоків активних та реактивних потужностей. Для електромереж розімкненої конфігурації (у тому числі з двобічним живленням), а також ЕМ з контурами без трансформаторів зв’язку, зазначена складова за визначенням дорівнює нулю.

Таким чином, втрати повної потужності в розподільних ЕМ 110(35)–10(6) кВ можна подати у вигляді:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{T} \dot{S}, \quad (7)$$

Відповідно до фізичного змісту матриці розподілу втрат  $\dot{T}$  кожен її стовпець  $\dot{T}^{(i)}$  є набором коефіцієнтів, що характеризують вплив потужності окремого вузла  $\dot{S}_i$  на втрати у вітках заступної схеми ЕМ.

Якщо припустити, що коефіцієнти  $\dot{T}$  є незмінними, то за зміни значення реактивної потужності  $i$ -го вузла на  $\delta Q_i$  зміняться і втрати потужності у вітках заступної схеми ЕМ, причому ці зміни можна оцінити як

$$\delta \dot{S}_b = \dot{T}^{(i)} \cdot j \delta Q_i. \quad (7)$$

За зміни споживання (генерування) реактивної потужності в  $i$ -му вузлі зміна втрат потужності в ЕМ буде визначатись за виразом

$$\delta \dot{S} = \dot{t}_i \cdot j \delta Q_i. \quad (8)$$

З (8) за малих відхилень  $\delta Q_i$  можна чисельно визначити коефіцієнт чутливості втрат в ЕМ до зміни реактивної потужності у  $i$ -му вузлі

$$\dot{t}_i = \frac{\delta \dot{S}}{j \delta Q_i} = \frac{\delta Q}{\delta Q_i} - j \frac{\delta P}{\delta Q_i}, \quad (9)$$

або, приймаючи до уваги (7), коефіцієнт чутливості  $\dot{t}_i$  можна визначити, домноживши вектор стовпець  $\dot{T}^{(i)}$  на відповідний одиничний вектор рядок  $E_1$  розмірністю  $m$  (кількість віток заступної схеми ЕМ):

$$\dot{t}_i = E_1 \cdot \dot{T}^{(i)}. \quad (10)$$

Вектор  $\dot{T}_q = (E_1 \cdot \dot{T})^T$ , утворений з коефіцієнтів чутливості втрат потужності  $\dot{t}_i$  до змін реактивного споживання у  $i$ -му вузлі, чисельно є вектором чутливості, який встановлює зв'язок між приростами втрат потужності в ЕМ і змінами реактивної потужності у її вузлах. Виходячи з цього, коефіцієнти чутливості втрат активної потужності до змін реактивних потужностей у вузлах можна визначити з уявної частини вектора  $\dot{T}_q$ , взятої зі зворотним знаком:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} \approx -\text{Im}(\dot{T}_{qi}) = -\text{Im}(E_1 \cdot \dot{T}^{(i)})^T. \quad (11)$$

Виходячи з (11) вираз для визначення економічних еквівалентів реактивної потужності можна записати у вигляді:

$$D_i = \sum_{j \in M_i} (-\text{Im}(\dot{T}_{ji}) k_{\Phi Q_j}^2). \quad (12)$$

Використовуючи (12) можна технічно обґрунтувати зменшення плати за транспортування реактивної потужності споживачів та РДЕ, функціонування яких забезпечує зменшення втрат електроенергії в ЕМ. До них належать розосереджені джерела невеликої потужності (для електромереж 10(6) кВ – до 600 кВт та споживачі, що розташовані на шляху транспортування реактивної потужності від РДЕ до основного центру живлення.

**Висновки.** Однією з головних проблем моделювання цільової функції задачі оптимальної компенсації реактивної потужності є вибір ефективного, інформаційно забезпеченого, методу визначення втрат електроенергії в ЕМ, а також методу їх розподілу між окремими транзакціями реактивної потужності. Для розв'язання задачі обґрунтовано поєднання методу середніх навантажень та диференційного методу розподілу на підставі коефіцієнтів розподілу втрат потужності.

Значення навантажувальних втрат, зумовлених транспортуванням реактивної потужності до споживачів ЕМ та від РДЕ, приєднаних до них, можуть визначатися з використанням коефіцієнтів розподілу, які розраховуються на підставі лінеаризації в залежності втрат для окремого режиму мережі. Зазначені коефіцієнти у малому околі незалежних параметрів режиму ЕМ чисельно дорівнюють частинним похідним від втрат активної потужності по реактивних перетіканнях  $\partial \Delta P / \partial Q_i$ .

Використовуючи результати аналізу чутливості втрат потужності в електромережах від реактивних перетікань, зумовлених впливом розосередженого генерування, можна технічно обґрунтувати оснащення їх засобами компенсації реактивної потужності, робота яких забезпечить зменшення втрат в ЕМ, а відповідно, вартості транзакції активної потужності РДЕ.

#### Список використаних джерел:

1. Distributed generation and its impact on power grids and microgrids protection / Antonova G., Nardi M., Scott A., Pesin M. Protective Relay Engineers, 65th Annual Conference Publication. 2012. – P. 152 – 161.
2. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Грицюк І. В. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. 2011. №3. С. 32–33.
3. Волков А. В., Мирошніченко О. Математическая модель потерь энергии в энергосистеме при транспортировке электроэнергии отдельного электропотребителя. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : проблеми сучасної електротехніки, ч.3. 2006. С. 29–34. ISSN 0204–3599.

4. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурыкин А. Б. Определение и анализ потерь мощности от транзитных перегоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации. Электрические сети и системы. 2006. №1. С. 5–11.

5. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б., Ковальчук О. А. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. 2010. С. 31–34. ISSN 0204–3599.

6. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. – 123 с.

7. Грицюк І.В., Грицюк Ю.В., Волинець В.І. Визначення витрат енергопостачальних компаній на обслуговування реактивних перетікань в електричних мережах з розосередженими джерелами енергії. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») Випуск 60 (жовтень-грудень, 2017). № 60. 2017.

8. Рогальський Б. С., Штогрін Є. А., Нанака О. М. Метод визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для замкнених мереж. Енергетика : економіка, технології, екологія. 2006. № 2. С. 66–70.