

УДК 621.316

**І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, І.О. Бандура***Луцький національний технічний університет***ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМ ГЕНЕРУВАННЯМ**

*Запропоновано новий метод визначення економічно доцільних рівнів компенсації реактивної потужності, що дозволяє враховувати двосторонні перетікання потужності в мережах з розосередженими джерелами енергії.*

*Ключові слова: компенсація реактивних навантажень; розосереджені джерела енергії; економічні еквіваленти реактивної потужності; вхідна реактивна потужність.*

**И.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, И.А. Бандура****ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАССРЕДОТОЧЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

*Предложен новый метод определения экономически целесообразных уровней компенсации реактивной мощности, что позволяет учитывать двусторонние перетекания мощности в сетях с рассредоточенными источниками энергии.*

*Ключевые слова: компенсация реактивных нагрузок; рассредоточенные источники энергии; экономические эквиваленты реактивной мощности; входная реактивная мощность.*

**I. Hrytsiuk, Yu. Hrytsiuk, I. Bandura****FEATURES COMPENSATION OF REACTIVE LOADS IN ELECTRICAL NETWORKS OF DISTRIBUTED GENERATION**

*A new method for determining the economically viable level of reactive power compensation, which takes into account the bilateral flow of power networks of dispersed energy sources.*

*Keywords: compensation of reactive loads; dispersed energy sources; economic equivalent of reactive power; input reactive power.*

**Постановка проблеми.** Утворення нових ринкових відносин між суб'єктами ринку електричної енергії та потреба державного економічного регулювання цих відносин за напрямками енергозбереження, з метою підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання, зумовили появу відповідних нормативних умов регулювання перетікань реактивної енергії.

Однак, швидка зміна умов функціонування розподільних електричних мереж не завжди дозволяє ефективно розв'язувати існуючі задачі з допомогою наявної галузевої нормативної документації. Насичення електричних мереж розподіленими джерелами електроенергії (РДЕ), більшість з яких конструктивно орієнтовані на споживання реактивної потужності, потребує перегляду існуючих підходів щодо розв'язання задачі оптимального керування реактивною потужністю та її компенсації.

Енергопостачальні компанії, отримуючи плату за транспортування реактивної енергії від споживачів, не розраховуються при цьому з транспортними та енергогенерувальними компаніями за вироблення та транспортування реактивної енергії до меж їх балансової належності. На цій підставі жоден з суб'єктів ринку не зацікавлений у компенсації реактивної потужності в електромережах споживачів.

Разом з тим, всі суб'єкти оптового ринку об'єктивно зацікавлені у зниженні технологічних витрат електроенергії за рахунок компенсації реактивних навантажень (КРН) в електричних мережах. Рівень зниження витрат, очевидно, залежить не тільки від параметрів мереж, потужностей навантажень, рівнів напруги, але й від наявного рівня КРН в електромережах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В основу відомого методу розрахунку оптимальних рівнів КРН [1, 2] покладені комплексний і системний підходи, принципи граничних затрат і поетапності розрахунків КРН. У методі застосовуються додаткові фактори для обґрунтування рівнів КРН і зниження потужності трансформаторів і мереж або віддалення строків їх реконструкції за рахунок додаткової компенсації. Для цього використовуються запропоновані в [2] методи коригування економічної і балансової задач КРН.

Задача дослідження й обґрунтування рівнів КРН в електричних мережах енергопостачальних компаній (ЕК) є достатньо новою, оскільки раніше це не відповідало вимогам системного підходу щодо розрахунків КРН [3, 4]. З впровадженням ринкових відносин між суб'єктами оптового ринку

електроенергії України і споживачами, а особливо після введення в дію нової методики розрахунку плати за перетікання реактивної енергії між ЕК і їх споживачами [4], інтерес до даної проблеми посилюється.

**Постановка завдань.** Зважаючи на недоліки існуючих методів визначення оптимальних рівнів КРН, доцільно розробити новий метод оптимізації рівнів КРП в електромережах з РДЕ, який дозволить враховувати сукупні видатків енергопостачальної компанії на обслуговування перетікань реактивної потужності у межах балансової належності. Це забезпечує більш адекватні результати, оскільки дозволяє враховувати наявність зворотних перетікань активної та реактивної потужності за рахунок функціонування РДЕ та їх вплив на рівні напруг.

**Викладення основного матеріалу.** Для визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності у вузлах електромережі з огляду на забезпечення максимального економічного ефекту у вигляді зменшення витрат ЕК на обслуговування перетікань реактивної потужності розроблено математичну модель:

$$B = \sum_{i \in N} [Q_i (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $B$  – витрати на впровадження КРН;  $Q_i$  – реактивна потужність споживання (генерування) у  $i$ -му вузлі електричної мережі (ЕМ);  $v_0$  – укрупнена питома вартість засобів КРН;  $D_i$  – економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП) в  $i$ -му вузлі ЕМ;  $\rho_0$  – ціна електроенергії у межах балансової належності ЕК;  $t$  – проміжок часу протягом якого визначаються витрати;  $\psi_i$  – оптимальне значення вхідної реактивної потужності в  $i$ -му вузлі ЕМ.

Залежно від сутності задачі оптимізації КРН та складу незалежних параметрів (множини вузлів, де планується встановлення компенсуючих установок (КУ)), цільову функцію необхідно коригувати. Так, для розв'язання задачі оптимізації рівнів компенсації реактивних навантажень споживачів цільова функція набуде вигляду:

$$B = \sum_{i \in N_{СП}} [Q_{Hi} (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{ТП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (2)$$

для оптимізації рівнів КРП у межах балансової належності енергопостачальної компанії:

$$B = \sum_{i \in N_{ТП}} [Q_{TPI} (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{СП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (3)$$

для комплексної задачі визначення оптимального рівня компенсації реактивних навантажень ЕМ засобами споживачів та ЕК:

$$B = \sum_{i \in N_{СП} \cup N_{ТП}} [Q_i (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ}} D_i Q_{РДЕi} \rho_0 t \rightarrow \min. \quad (4)$$

де  $N_{СП}$ ,  $N_{РДЕ}$ ,  $N_{ТП}$  – відповідно, кількість споживачів ЕМ, розосереджених джерел електроенергії, приєднаних до них, та компенсуючих установок ЕК.

Враховуючи простоту та наочність цільової функції (1), сформульовано принцип формування оптимального рівня компенсації реактивної потужності в ЕМ за економічним критерієм: для забезпечення мінімуму витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності зменшувати вхідну реактивну потужність за рахунок компенсації реактивної потужності доцільно лише у вузлах ЕМ, для яких  $D_i \rho_0 t - v_0 > 0$ , або враховуючи, що  $v_0 > 0$ :

$$RENT_i = \frac{D_i \rho_0 t}{v_0} > 1, \quad (5)$$

де  $RENT_i$  – за певних умов чисельно дорівнює рентабельності капіталовкладень у розміщення засобів компенсації реактивної потужності у  $i$ -му вузлі. Вище абсолютне значення  $RENT_i$  свідчить про більші потенційні можливості даного вузла щодо зменшення витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності в ЕМ.

Враховуючи дискретний характер незалежних змінних (встановлених потужностей КУ) та спосіб визначення доцільності встановлення компенсуючої установки у певному вузлі для розв'язання задачі визначення оптимального рівня оснащення ЕМ засобами КРН пропонується

використати ітераційний метод дискретної оптимізації, а саме метод оптимізованого перебору варіантів.

З урахуванням специфіки застосування методу оптимізації задача визначення економічно доцільного рівня компенсації реактивної потужності в ЕМ може бути сформульована таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \sum_{i \in N} [Q_i (V_0 + (D_i \rho_0 t - V_0) \psi_i)] \rightarrow \min; \\ D_i = \sum_{j \in M_i} (-\text{Im}(\dot{T}_{ji}) k_{\phi Qj}^2); \\ \sum_{i \in N} Q_i \psi_i = Q_{\Sigma}; \\ Q_{KYi} = Q_i (1 - \psi_i) \geq 0; \\ Q_{ei} = Q_i \psi_i \leq Q_i \\ U_{\max} \geq U_i \geq U_{\min}, i \in N; \\ I_{\text{доп}} \geq I_j, j \in M; \\ Q_{\max} \geq Q_i \geq Q_{\min}, i \in N, \end{array} \right. \quad (6)$$

де  $Q_{KYi}$  – потужність компенсувальних установок в і-му вузлі ЕМ;  $Q_{e,i}$  – вхідна реактивна потужність в і-тому вузлі ЕМ;  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  – відповідно, верхня і нижня межі допустимих напруг в ЕМ;  $I_j$  – фактичне струмове навантаження для j-го елемента мережі;  $I_{\text{доп}j}$  – допустиме струмове навантаження для j-го елемента мережі;  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$  – відповідно, верхня і нижня межі допустимих реактивних потужностей.

На прикладах електричних схем різної складності досліджено залежності ЕЕРП від потужностей споживання, генерування РДЕ та генерування КУ. Визначено оптимальні рівні компенсації реактивної потужності, необхідні для коригування режимів роботи розподільних електричних мереж з РДЕ за напругою та реактивною потужністю, і показано, що наближення до оптимальних режимів пов'язане зі зменшенням ЕЕРП для вузлів споживання та генерування реактивної потужності.

Дослідження залежності розрахункових значень ЕЕРП від режимів роботи розподільних електричних мереж виконувались на прикладі схеми ЕМ 10 кВ вузлової підстанції 110/10 кВ (рис. 1). До вказаної підстанції приєднано 5 фідерів, 3 з яких забезпечують видачу сумарної потужності 1443 кВА, сумарна довжина ліній становить 29,87 км.

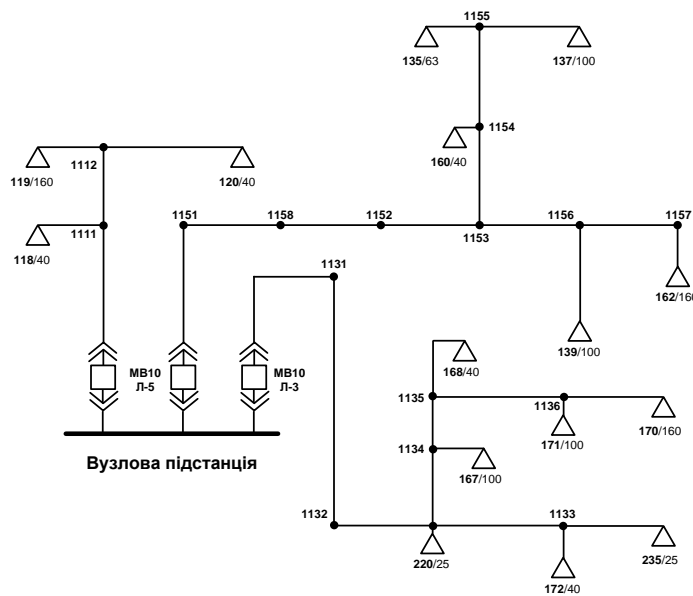


Рис. 1. Фрагмент схеми ЕМ 10 кВ вузлової підстанції 110/10 кВ

Аналіз залежності ЕЕРП використано на прикладі фідера Л-3, сумарна встановлена потужність трансформаторних підстанцій якого становить 490 кВА, загальна протяжність ліній 9,29 км. Результати розрахунку ЕЕРП подано на рис. 2.

Як видно з рис. 2 економічні еквіваленти реактивної потужності залежать від режиму і збільшуються за зростання перетікань активної та реактивної потужності електромережами. Так, у режимі мінімальних навантажень, коли перетоки реактивної потужності у ЕМ практично відсутні, компенсація реактивної потужності є недоцільною. У режимах середніх і максимальних навантажень значення ЕЕРП різко зростають.

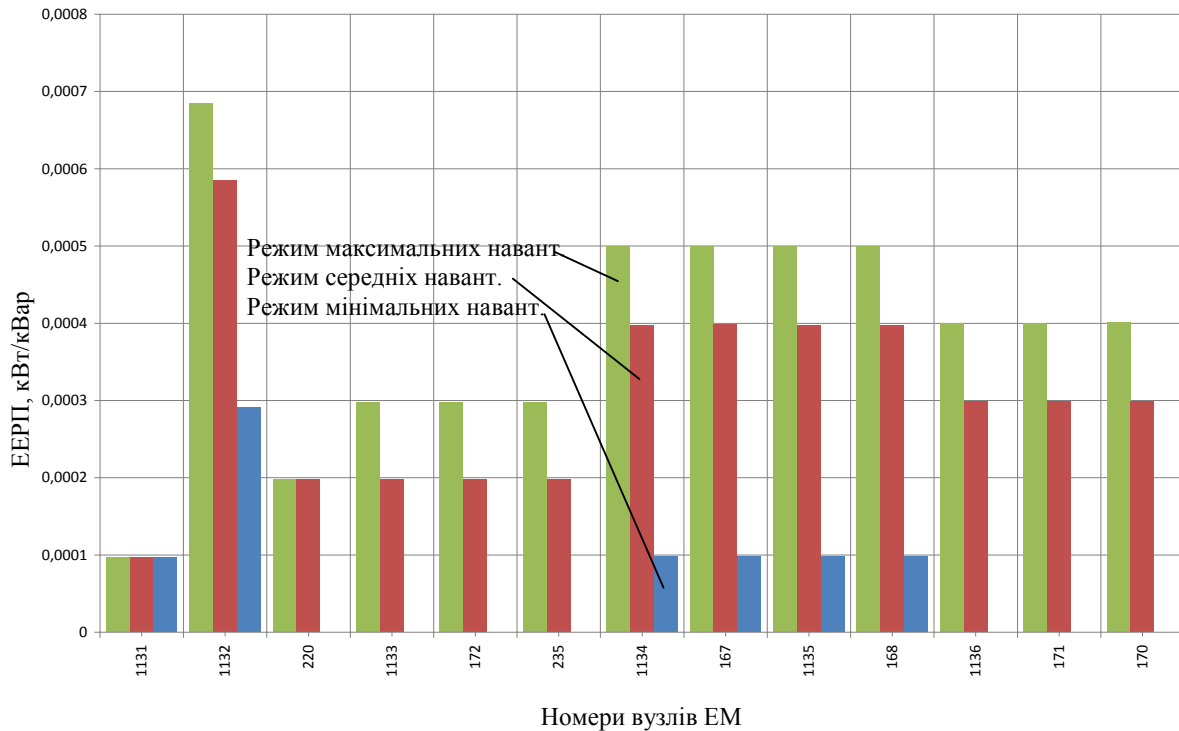


Рис. 2. Розрахункові значення ЕЕРП у режимах мінімальних, середніх та максимальних навантажень ЕМ

Для дослідження впливу розосередженого генерування на режими роботи ЕМ та розрахунку необхідного рівня компенсації проведено обчислювальний експеримент на прикладі ЕМ (рис.3): зімітовано встановлення вітової електростанції (ВЕС) потужністю 30 кВт з асинхронним генератором та повною компенсацією реактивної потужності. Для встановлення РДЕ вибрано найбільш електрично віддалений вузол ЕМ. На підставі модифікованої розрахункової схеми електричної мережі виконано аналіз чутливості ЕЕРП до зміни режиму ЕМ з РДЕ. Результати подано на рис. 3.

З діаграми (рис. 3) видно, що встановлення РДЕ у розподільній електричній мережі призводить до зростання ЕЕРП, що пояснюється зміною напрямку та графіків перетікань реактивної потужності. Особливо це проявляється у режимі мінімальних навантажень. Результати порівняння ЕЕРП для ЕМ за відсутності розосередженого генерування та з РДЕ подано на рис. 4.

Як видно з аналізу результатів, що значення ЕЕРП для вузлів споживання залежать від розміщення цих вузлів по відношенню до РДЕ. Наприклад, для ТП-167 у режимі ЕМ без РДЕ значення ЕЕРП перевищує аналогічне у режимі з розосередженим генеруванням, що підключене до ТП-170. Тобто поява розосередженого генерування у схемі зменшила вплив реактивного споживання ТП-167 на втрати в ЕМ, зменшивши спад напруги на шляху перетікання реактивної потужності до її споживачів.

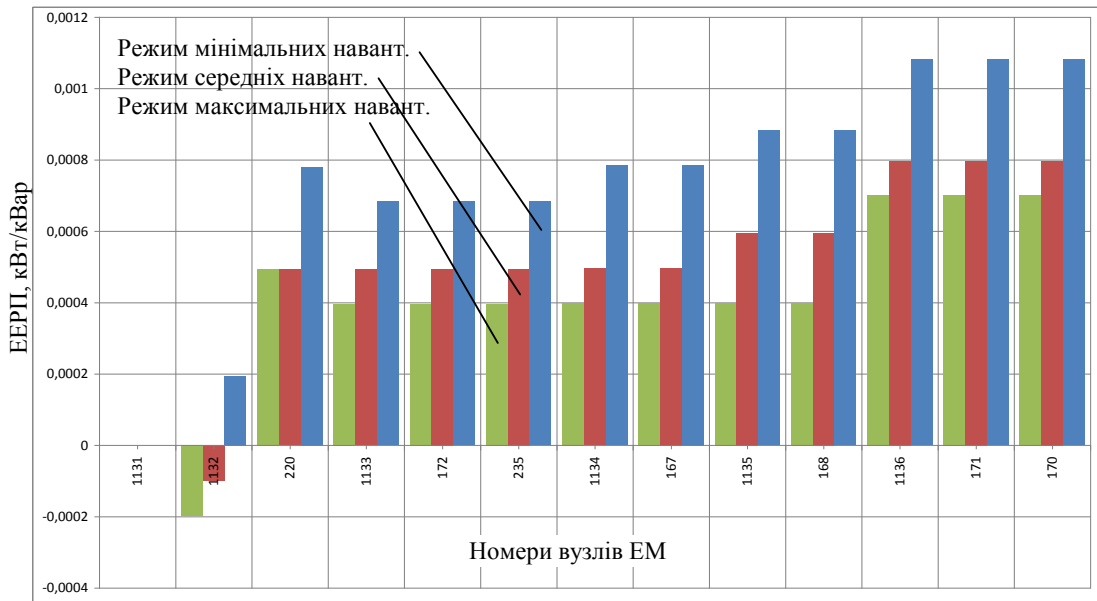


Рис. 3. Розрахункові значення ЕЕРП у різних режимах споживання електромереж з РДЕ

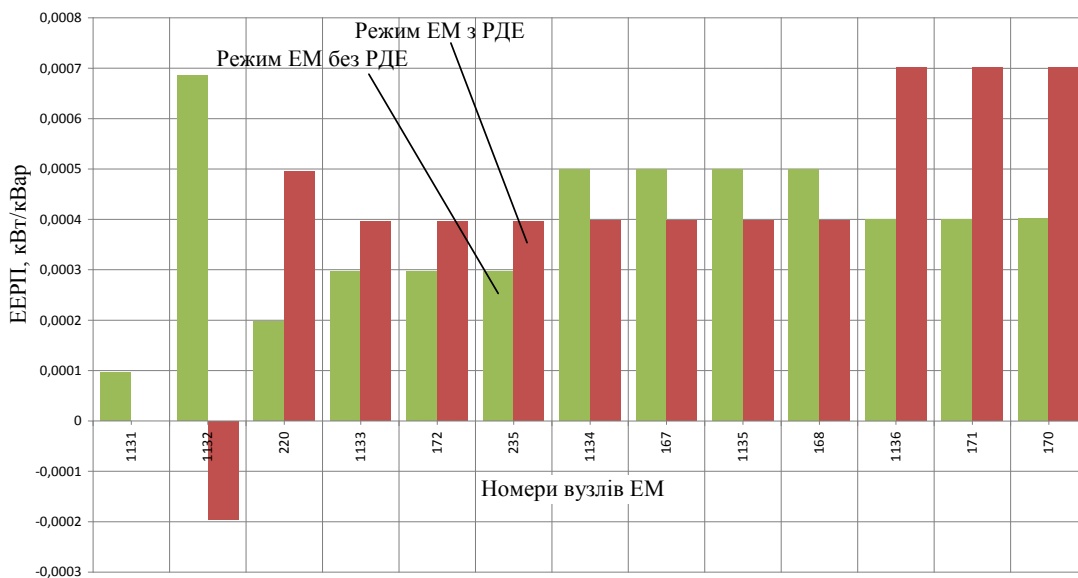


Рис. 4. Розрахункові значення ЕЕРП для ЕМ з РДЕ та без розосередженого генерування

#### Висновки.

1. На підставі математичної моделі сумарних видатків ЕК на обслуговування перетікань реактивної потужності в ЕМ запропоновано ряд цільових функцій, які дозволяють формалізувати окремі локальні задачі оптимізації КРП зі збереженням пріоритетності забезпечення загальносистемного ефекту.

2. Запропоновано метод оптимізації рівнів КРП в електромережах з РДЕ, що базується на розробленій математичній моделі сукупних видатків енергопостачальної компанії на обслуговування перетікань реактивної потужності у межах балансової належності та побудований на принципах дискретної оптимізації. За рахунок цього метод забезпечує більш адекватні результати, оскільки дозволяє враховувати: можливість зворотних перетікань активної та реактивної потужності у магістралях ЕМ за рахунок функціонування РДЕ неспівмірної потужності; вплив перерозподілу реактивної потужності в ЕМ на рівні напруг в них; зростання

нерівномірності графіків реактивних перетікань окремих ЛЕП та трансформаторів за рахунок запровадження заходів з КРП.

3. Досліджено вплив реактивних потужностей КУ та РДЕ, що функціонують у локальних електричних системах, на значення ЕЕРП окремих споживачів, що дозволяє оцінити реальний регулювальний ефект, а також роль і задачі окремих джерел в процесі оптимального керування режимами ЕМ по реактивній потужності.

#### **Список використаних джерел:**

1. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання [Текст] / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 126–129.
2. Праховник, А. В. Комплексне і системне вирішення проблем компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній [Текст] / А. В. Праховник, В. М. Божко, Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 2. – С. 2–9.
3. Рогальський, Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. [навчальний посібник] / Б. С. Рогальський. – Вінниця. – Універсум–Вінниця. – 2006. – С. 236 .
4. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживачами (основного споживача та субспоживача) [Електронний ресурс] / Наказ Мінпаливенерго України 05.01.2006р. №1. – Режим доступу : [http : //dnop.com.ua/dnaop/act9926.htm](http://dnop.com.ua/dnaop/act9926.htm).

Стаття надійшла до редакції 16.12.2016.