

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Держенергонагляд у Південно-Західному регіоні

Розглянуто питання оптимізації перетікань реактивної енергії розподільними електричними мережами (РЕМ) за комплексним критерієм, що враховує витрати на експлуатацію джерел реактивної потужності (ДРП), втрати та якість електроенергії. Запропоновано умови оптимальності для побудови розподіленої системи керування ДРП з локальним автоматичним керуванням. В них також враховано генерування конденсаторних установок (КУ) з обмеженою керованістю внаслідок конструктивного виконання, або через особливості експлуатації. Показано, що оптимальне керування ДРП може здійснюватися з використанням принципу найменшої дії, а для оптимального керування ДРП в розподільних електричних мережах можливо і доцільно застосовувати адаптивні автоматизовані системи керування.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, втрати електроенергії, перетікання реактивної енергії, оптимізація, автоматичне керування, джерела реактивної потужності.

Вступ

Через складність розподільних електричних мереж (РЕМ), нерівномірний графік відпуску електроенергії споживачам, розбудову відновлюваних джерел енергії, періодичні зміни схеми, що виконуються для забезпечення безперервного живлення споживачів, планування та реалізація заходів з підвищення ефективності функціонування мереж є складним завданням, вирішення якого у сучасних умовах не можливе без застосування засобів автоматизації керування.

З аналізу заходів зі зменшення втрат електроенергії та підвищення її якості у розподільних електричних мережах (РЕМ) відомо, що одним з найефективніших є встановлення додаткових джерел реактивної потужності (ДРП) та керування ними. Останні, зменшуючи струмові навантаження ЛЕП та силових трансформаторів, забезпечують зниження втрат електроенергії та підвищення якості напруги.

Проблема компенсації реактивної потужності (КРП) не нова і тому добре досліджена. Однак через зміни технічних та економічних умов експлуатації РЕМ, набувають актуальності питання, якими раніше нехтували. Одна з основних змін у розподільних мережах стосується розбудови розосереджених джерел електроенергії (РДЕ), особливо сонячних електростанцій (СЕС). Випадковий характер їх генерування з істотною дисперсією миттєвих потужностей навколо математичного очікування (середнього значення) та невідповідність графіка генерування характеру місцевого споживання спричиняють зміни перетікань потужності в мережах та негативно відбиваються на рівні втрат та режимах напруг [1, 2].

Наявність у структурі СЕС пристроїв трекінгу максимальної потужності (MPPT) та перетворювачів напруги джерела (VSC) [3] з одного боку можуть призводити до підвищення рівня вищих гармонік у мережах. Однак, змінюючи уставки та алгоритми функціонування таких перетворювачів, можна залучати СЕС до виконання системних функцій з регулювання напруги в РЕМ [4, 5]. У цьому випадку пристрої VSC використовуються, як статичні тиристорні компенсатори для розподільних мереж (*d-STATCOM*) [6]. Таким чином, з'являються додаткові не типові засоби для автоматичного керування реактивними перетіканнями та для регулювання напруги в РЕМ.

Розвиток інформаційних технологій призвів до зменшення відносної вартості засобів автоматизації для ДРП типу батарей статичних конденсаторів (БСК) й додаткова вартість автоматично-

керуваних БСК, що працюють у низьковольтних мережах, не перевищує 3...7%. Це забезпечує їх значне поширення.

Вдосконалення інформаційної інфраструктури обласних енергопостачальних компаній, збільшення кількості та пропускної здатності провідних та безпроводних каналів зв'язку спрощує організацію та підвищує конкурентоспроможність розподілених автоматизованих систем керування, серед іншого й перетіканнями реактивної електроенергії в РЕМ.

Виходячи з наведеного, розроблення заходів з компенсації реактивної потужності у сучасних умовах потребує вдосконалення існуючих та розроблення нових методів оптимізації й розрахункових алгоритмів, які б враховували не лише особливості передачі електроенергії розподільними мережами, а й експлуатаційні особливості сучасних ДРП. Підвищення рівня автоматизації розподільних мереж, розроблення відповідних автоматизованих систем, а отже, засобів ідентифікації законів керування локальними системами автоматичного керування ДРП є актуальними завданнями в Україні й світі [1, 7].

Метою роботи є зменшення втрат електроенергії у розподільних електромережах шляхом вдосконалення методів та засобів автоматизації керування комплексом джерел реактивної потужності.

Огляд результатів попередніх досліджень

Серед факторів негативного впливу перетікань реактивної потужності електромережами особливе місце займає збільшення втрат електроенергії, що зумовлено відносною простотою його оцінювання [9]. Тому саме на підставі виділення цих втрат електроенергії та для оптимізації перетікань з метою зменшення втрат побудована чинна методика компенсації реактивної потужності [10].

Реалізований підхід має низку недоліків. Це відсутність взаємопов'язаних рішень з КРП для енергопостачальних компаній, споживачів та власників засобів розосередженого генерування, що приєднані до електромереж; недосконалість механізмів урахування якості напруги, графіків роботи споживачів та розосереджених джерел у РЕМ, а також реверсивних перетікань реактивної потужності в них. Разом з тим, особливістю оптимізації реактивних перетікань в локальних електричних системах є те [11], що розосереджені джерела енергії, використовуючи синхронні й асинхронні генератори, а також фотоелектричні елементи з інверторними перетворювачами, можуть генерувати або споживати реактивну потужність залежно від режиму їх роботи. Таким чином виникають реверсивні її перетікання, що можуть мати негативні наслідки, або давати додаткові засоби підвищення ефективності транспортування електроенергії, оскільки окремі РДЕ є регульованими джерелами реактивної енергії.

Означені недоліки у сукупності ускладнюють об'єктивне оцінювання ефективності впровадження ДРП та оптимізацію реактивних перетікань у електричних мережах, особливо з розосередженим генеруванням.

У низці робіт, зокрема [12], показано, що перехід від задачі з комплексним інтегральним критерієм оптимальності, наприклад, задачі мінімізації витрат на компенсацію реактивної потужності та втрат електроенергії в РЕМ, до комплексу техніко-економічних задач оптимізації окремих етапів впровадження та експлуатації ДРП дає можливість застосування класичних методів оптимізації практично без погіршення адекватності. Такий підхід супроводжується необхідністю прийняття низки припущень на етапі декомпозиції, для можливості «стикування» розв'язків задач, що отримуються окремо, у розв'язок комплексної задачі. Раніше це було безальтернативним варіантом вирішення проблеми. Однак сучасний розвиток інформаційних технологій та обчислювальних засобів формує передумови для застосування інших підходів до вирішення проблеми оптимізації перетікань реактивної енергії, зорієнтованих, зокрема, на автоматизацію функціонування РЕМ.

Особливої актуальності проблема автоматизації керування ДРП набуває для електромереж з розосередженими джерелами енергії, оскільки їх генерування істотно залежить від впливу стохастичних факторів навколишнього середовища. Враховуючи динамічність процесів у РЕМ, питання розроблення та впровадження систем автоматичного керування (САК) ДРП, що є важливими для отримання максимального ефекту від КРП, розглянуто у значній кількості робіт, зокрема [2—4, 6, 13]. Запропоновано низку ефективних за швидкодією та точністю технічних рішень з автоматизації функціонування ДРП, які забезпечують підтримання економічного значення вхідної реактивної потужності, або коефіцієнта реактивної потужності в нормальних та особливих режимах електроспоживання.

Однак для оптимізації перетікань реактивної енергії в розподільних мережах крім того, необхідно оперативно визначати та оцінювати ефективність налагоджувальних параметрів для локальних САК з урахуванням взаємовпливу ДРП. Враховуючи жорсткі часові обмеження, це неможливо без автоматизованих систем керування (АСК), побудованих на базі комунікаційних технологій *SMART Grid* [14]. Розроблення таких систем вимагає вдосконалення методів і алгоритмів визначення оптимальних потужностей ДРП з урахуванням зміни режимів електроспоживання та розподіленого генерування, тарифів на електроенергію, а також конфігурації РЕМ в процесі експлуатації [11, 14].

Задачі оптимізації функціонування ДРП в розподільних електричних мережах

Для забезпечення рентабельності впровадження додаткових ДРП у розподільних електричних мережах особливо актуальними виявляються питання оптимізації їх розміщення, визначення конструктивних параметрів, а також оперативного (автоматичного) керування режимами їх роботи для отримання максимального прибутку від зменшення втрат електроенергії та підвищення якості напруги [11]. Для ДРП, що працюють у межах балансової належності споживачів (абонентів), вимоги чинних нормативних документів обмежують можливості регулювання перетікань реактивної потужності в РЕМ на рівні компенсації власного споживання. Це робить нерентабельною участь таких ДРП у зменшенні втрат в електромережах шляхом групової компенсації реактивного споживання, а також у добовому регулюванні напруги. Таким чином, для обласних енергопостачальних компаній необхідно вирішувати завдання щодо впровадження власних ДРП.

Для оптимізації функціонування ДРП у нормальних режимах електричних мереж особливо актуальними є питання організації планування і оперативного керування режимами їх роботи з метою отримання максимального прибутку від їх експлуатації. Отже актуальною, враховуючи специфіку забезпечення рентабельності ДРП, є задача розміщення та оптимізації добових режимів автоматично-керованих установок $Q_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ з урахуванням режимів установок з ручним керуванням та некерованих джерел для забезпечення мінімальних витрат на закупівлю електроенергії для компенсації її втрат в мережах за умов багатоставкового тарифу енергоринку $c(t)$ та технічних обмежень з боку споживачів та окремих ДРП:

$$\int_{t_0}^{t_k} c(t) \Delta P(Q_i(t), i = 1 \dots n) dt \rightarrow \min. \quad (1)$$

У випадку керування засобами компенсації реактивної потужності в умовах, пов'язаних з обмеженнями з боку живильних мереж (обтяжені режими магістральних мереж, умови суборенди абонентських мереж), доцільно розв'язувати задачу оптимізації режимів ДРП для зменшення обміну реактивною потужністю між локальною електричною мережею з сукупним споживанням $Q_{\text{нав}}(t)$ та джерелом живлення, тобто мінімізації навантаження локальної мережі на основний центр живлення $Q_{\text{ЦЖ}}(t)$:

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_k} Q_{\text{ЦЖ}}(t) dt \rightarrow \min; \\ Q_{\text{ЦЖ}}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) - Q_{\text{нав}}(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Виходячи з наведених задач оптимізації режимів ДРП, формування єдиних умов оптимальності для їх розв'язання виявляється неможливим. Отже, керування такими джерелами у електричних мережах має виконуватися за окремими законами, що визначаються ситуацією в РЕМ.

Враховуючи особливості організації інформаційного забезпечення у сучасних РЕМ, оцінювання поточного стану мереж та формування законів керування для окремих ДРП можна здійснювати лише централізовано. Тобто автоматизація керування засобами КРП потребує застосування локальних систем автоматичного керування для безпосереднього керування ДРП, а також централізованого керування для формування й адаптації налагоджувальних параметрів САК.

Реалізація двоконтурної адаптивної системи, умови оптимальності та сформовані на їх підставі закони керування ДРП повинні базуватися на загальній методології. Ефективним шляхом вирі-

шення проблеми формування законів оптимального керування є застосування принципу найменшої дії [14].

Умови оптимальності режимів ДРП для групового керування перетіканнями реактивної енергії в розподільних електричних мережах

Детальніше задача оптимального керування (1) може бути подана так. Задано сукупність з n автоматично керованих ДРП і m ДРП з ручним керуванням (або постійної потужності). Задана реактивна потужність останніх становить Q_{PKj} .

В якості змінних керування прийнято потужності автоматично керованих ДРП. Втрати від перетікань реактивної потужності у розподільній мережі є функціями від потужностей ДРП обох типів і мають враховуватися у цільовій функції. Склад увімкненого обладнання ДРП протягом доби і його економічні та енергетичні характеристики є сталими. Необхідно знайти такі режими автоматично керованих ДРП $Q_i(t)$ на інтервалі часу $[t_0; t_k]$, які забезпечили б максимальний прибуток від зниження втрат електроенергії з урахуванням зміни закупівельної ціни на енергоринку:

$$\int_{t_0}^{t_k} \left[\psi(t) \Delta P(Q_{PKj}, Q_i(t)) + \sum_{i=1}^n (k_i Q_i(t)) \right] dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

де k_i — питома вартість використання встановленої потужності i -го керованого ДРП; ΔP — втрати потужності в розподільній електричній мережі, як функція потужностей ДРП, що встановлені у її вузлах.

В якості обмежень задається баланс реактивної потужності у мережах

$$\varphi(t) = Q_{ЦЖ}(t) + \sum_{j=1}^m Q_{PKj} + \sum_{i=1}^n Q_i(t) - Q_{наб}(t) = 0.$$

Обов'язковим є також урахування обмежень-нерівностей за потужностями керованих ДРП: $Q_i^{\min} \leq Q_i(t) \leq Q_i^{\max}$, $i = 1 \dots n$, а також за напругою у вузлах електромереж, де встановлено ДРП: $U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max}$, $i = 1 \dots n$, що визначаються умовами забезпечення якості електроенергії. При цьому відомими вважаються $Q_i(t_0)$ та $Q_i(t_k)$.

У припущенні, що всі залежності, які використовуються в розрахунках, включаючи $Q_{наб}(t)$ та $\psi(t)$, неперервні й двічі диференційовані, поставлена задача може бути віднесена до граничних варіаційних ізопериметричних задач. У цьому випадку екстремум (3) досягається тими ж функціями $Q_i(t)$, що й екстремум виразу

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_k} \left[\psi(t) \Delta P(Q_{PKj}, Q_i(t)) + \sum_{i=1}^n (k_i Q_i(t)) + \lambda \varphi(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^Q(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^U(t) \right] dt = \int_{t_0}^{t_k} F(t) dt \Rightarrow \min, \quad (4)$$

де λ_i — невизначені множники Лагранжа; $\Pi_i^Q(t)$, $\Pi_i^U(t)$ — штрафні функції, введені в цільову функцію $F(t)$ для врахування обмежень типу нерівностей за реактивною потужністю ДРП та напругою по вузлах їх встановлення.

Згідно з принципом найменшої дії у формулюванні Понтрягіна [15], мінімум (3) буде мати місце, якщо для $Q_i(t)$ буде виконуватися необхідна умова екстремуму функціоналу (4) — рівняння Ейлера

$$F_{Q_i} - \frac{d}{dt} F_{\dot{Q}_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$\text{де } F_{Q_i} = \frac{\partial F}{\partial Q_i}; \quad F_{\dot{Q}_i} = \frac{\partial F}{\partial \dot{Q}_i}; \quad \dot{Q}_i = \frac{dQ_i}{dt}.$$

З урахуванням (4) рівняння (5) набуло вигляду:

$$F_{Q_i} - \frac{d}{dt} F_{\dot{Q}_i} = \left(\psi(t) - \frac{d\psi(t)}{dt} \right) \left[\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i(t)} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P}{\partial \dot{Q}_i(t)} \right] + k_i + \lambda + \frac{\partial \Pi_i^Q}{\partial Q_i} + \frac{\partial \Pi_i^U}{\partial Q_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Якщо система, утворена рівняннями (6), не є виродженою, а обмеження не є суперечними, то необхідні умови оптимального розподілу реактивного навантаження між автоматично-керованими ДРП в електричних мережах з урахуванням впливу джерел з ручним керуванням можуть бути подані в аналітичному вигляді таким чином:

$$z^*(t) = \frac{\lambda + k_1 + q_1^{\text{III}}}{\sigma_1^*(t)} = \frac{\lambda + k_2 + q_2^{\text{III}}}{\sigma_2^*(t)} = \dots = \frac{\lambda + k_n + q_n^{\text{III}}}{\sigma_n^*(t)}, \quad (7)$$

де $z^* = z + z'$, а $\sigma_i^* = \sigma_i + \sigma_i'$ за умови, що

$$\begin{cases} z = -\text{ц}; \quad z' = \frac{d\text{ц}}{dt}, \quad q_i^{\text{III}} = \frac{\partial \text{Ш}_i^Q}{\partial Q_i} + \frac{\partial \text{Ш}_i^U}{\partial Q_i}; \\ \sigma_i = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i}; \quad \sigma_i' = -\frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i}. \end{cases} \quad (8)$$

Якщо прийняти всі процеси в РЕМ умовно сталими у межах деякого періоду часу, наприклад $\Delta t = 0,5$ год., то умова оптимальності (8) набуде вигляду

$$z_t = \frac{\lambda + k_1 + q_1^{\text{III}}}{\sigma_{1t}} = \frac{\lambda + k_2 + q_2^{\text{III}}}{\sigma_{2t}} = \dots = \frac{\lambda + k_n + q_n^{\text{III}}}{\sigma_{nt}}, \quad (9)$$

Величина λ визначається ітераційним шляхом, використовуючи граничні умови так, щоб забезпечити виконання балансу реактивної потужності в РЕМ. З (9) фізичний зміст λ можна визначити, як прибуткову ефективність установок КРП для заданої електричної мережі. Вона показує, на скільки окупляться витрати на компенсацію реактивної потужності зменшенням вартості втрат електроенергії у електричних мережах за збільшення потужності i -го ДРП на 1 квар:

$$\lambda = z_t \sigma_{it} - k_i = -\text{ц}_t \left. \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} \right|_t - k_i. \quad (10)$$

Здійснюючи керування комплексом ДРП для отримання максимального прибутку згідно з умовами оптимальності (7), зменшуються втрати електроенергії в розподільних електромережах. Збільшення потужності генерування керованих ДРП буде здійснюватися лише, якщо цей приріст компенсується зменшенням втрат електроенергії в грошовому еквіваленті з урахуванням штрафу за зниження якості електроенергії у вузлах приєднання ВДЕ. Враховуючи, що втрати у мережах пов'язані з рівнями напруги у вузлах, таке регулювання ДРП буде позитивно впливати на якість електроенергії у мережах загалом.

Адаптивне керування ДРП з децентралізацією базових функцій

Адаптивні системи автоматичного керування дозволяють здійснювати керування технологічними процесами в умовах неповної або недосконалої поточної інформації щодо характеристик об'єкта керування та зовнішніх впливів. Це характерно для комплексу просторово розподілених ДРП, що виконують функції групової оптимізації перетікань реактивної енергії в РЕМ, особливо, якщо керування має здійснюватися у реальному часі. Відомим напрямком детермінованих, функціонально-адаптивних, саморегульованих систем керування є керування з еталонною моделлю [16]. Схема такої системи групового керування перетіканнями реактивної енергії в РЕМ показана на рис. 1.

Кожен з основних контурів керування утворюється об'єктом (ДРП) та локальною системою автоматичного керування (рис. 1). Функціонування локальних САК підпорядковується централізованій системі. Для узгодження централізованого та локального керування призначений блок визначення уставок САК. Він пов'язує зовнішній та внутрішні (основні) контури завдяки формуванню та реалізації відповідних налагоджувальних параметрів, згідно з якими визначаються періодичність керування та розраховуються керувальні впливи u_i для окремих ДРП. Зворотний зв'язок централізованого керування здійснюється завдяки оперативно-інформаційному комплексу, який формує вектор спостереження РЕМ y .

Для імітації економічних режимів РЕМ, тобто режимів з мінімальними витратами (3) використовується еталонна модель, що є частиною системи керування. Згідно умов оптимальності (7) тут форму-

ються керувальні впливи для кожного ДРП $u_{ек}(t)$, які б забезпечили перехід від поточного режиму до економічного з урахуванням динамічності функціонування РЕМ. Параметри кожного регулятора ДРП налагоджуються зовнішнім контуром керування так, щоб мінімізувати неузгодженість $u_{\Delta}(t)$ між виходом еталонної моделі $u_{ек}(t)$ та блока імітації режимів РЕМ $u_{ім}(t)$. Останній використовується як джерело псевдовимірів для параметрів керування u_i окремих локальних САК, які у сукупності утворюють вектор керування u . Імітаційна модель, враховуючи відносну простоту відтворення процесів

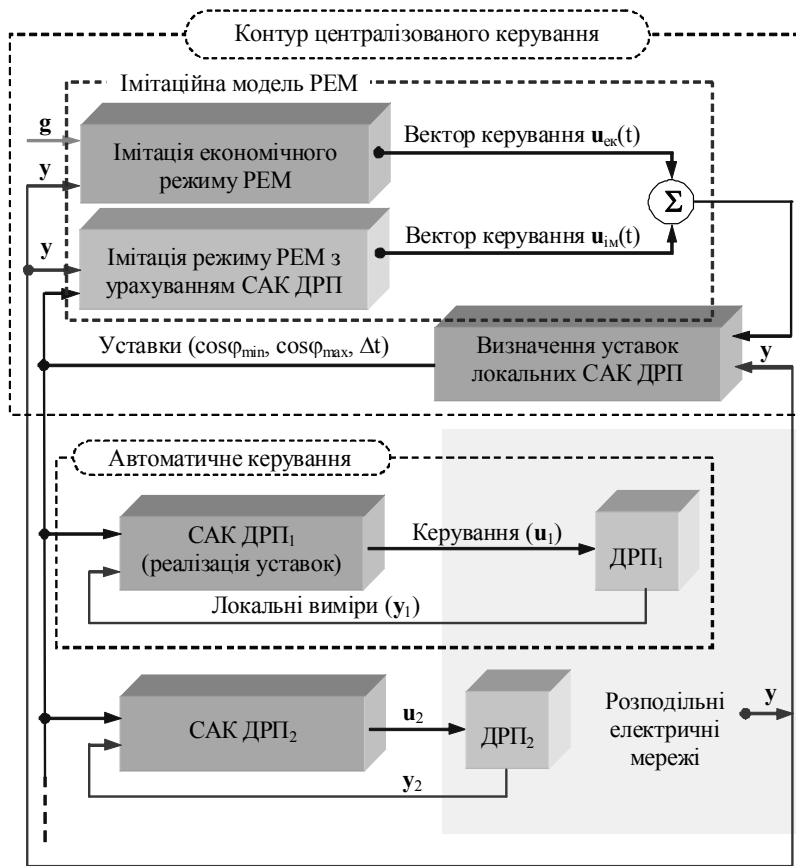


Рис. 1. Адаптивна система керування ДРП з моделлю економічного режиму РЕМ

передачі електроенергії в РЕМ, забезпечує високу вірогідність, що контролюється завдяки відповідним зворотним зв'язкам y .

Рішення щодо введення до контуру централізованого керування блока імітації режимів РЕМ $u_{ім}(t)$ замість оперативного телевимірювання параметрів ДРП u є економічно обґрунтованим не лише для розподільних мереж України, але й для мереж європейських країн. Останнє показано на підставі техніко-економічного аналізу в [17].

На різних етапах впровадження системи групового керування ДРП імітаційна модель РЕМ виконує різні функції. На початковому етапі (автоматизоване керування), коли необхідно узгоджувати оперативне керування з автоматичним, це функціональна модель, за допомогою якої оперативний персонал через зовнішні впливи g (рис. 1) не тільки визначає та коригує налагоджувальні параметри САК, а й відтворює прогнозні стани РЕМ та оцінює наслідки зміни потужно-

стей ДРП. Після підтвердження адекватності імітаційної моделі у нормальних і особливих режимах та остаточного впровадження системи керування, імітаційна модель стає основним ментом її самоналагодження та самоаналізу САК.

Стійкість та ефективність процесу оперативного керування ДРП залежить від співвідношення частоти отримання відгуків від РЕМ та швидкості й інтервалу відхилення параметрів спостереження y . Для забезпечення стійкості необхідно оптимізувати уставки по часу Δt для окремих САК, а для ефективного використання ресурсу комутаційної апаратури ДРП — граничні коефіцієнти потужності $\cos \varphi_{\min}$, $\cos \varphi_{\max}$. Означені процеси реалізуються блоком визначення уставок (див. рис. 1). Основною складністю тут є потреба значного обсягу обчислень, пов'язаних з оптимізацією графіків генерування реактивної потужності ДРП, оцінюванням кореляції цих графіків та графіків реактивного споживання у вузлі приєднання ДРП (рис. 2), оптимізацією періодів оновлення параметрів САК тощо. Таким чином, визначення вектора налагоджувальних параметрів потребує значних витрат часу, що можуть бути суттєво зменшені у випадку попереднього оцінювання кореляції та ідентифікації періодів оновлення налагоджувальних параметрів за типовими графіками.

Отже, для реалізації задач оперативного й автоматичного керування ДРП можливе використання адаптивної системи керування з еталонною моделлю, що реалізована на основі співвідношень (7)—(9). Ефективність адаптивного підходу підвищується завдяки розділенню функцій керування перетікання реактивної енергії на централізоване формування налагоджувальних параметрів САК за результатами імітаційного моделювання режимів РЕМ і локальну реалізацію цих налаштувань системами керування окремих ДРП за місцевими параметрами.

Практичні розрахунки

Умови оптимальності (7), (8) та алгоритми формування уставок для локальних систем автоматичного керування (рис. 1) були використані для оптимізації перетікань реактивної енергії у Вінницьких міських електромережах 10 кВ. Для отримання вихідних даних щодо визначення оптимальних графіків генерування наявних, автоматично керованих ДРП за допомогою реєстраторів виконано низку вимірювань споживання активної та реактивної електроенергії на відповідних трансформаторних підстанціях (ТП). Як приклад, на рис. 2а подано часові залежності відпуску реактивної енергії з трансформатора Т-1 ТП-557. З наведеного видно, що реактивне навантаження протягом доби істотно змінюється, що призводить до постійних змін перетікань реактивної енергії в РЕМ.

За результатами вимірювань розраховано графіки оптимальних потужностей генерування для окремих ДРП (рис. 2а). Їх реалізація дозволила б зменшити втрати електроенергії в досліджуваній РЕМ з 2236 кВт·год до 2042 кВт·год на добу, тобто близько 9%. Однак керування ДРП за подібним графіком є недоцільним з огляду на використання ресурсу ДРП.

Тому виконано оптимізацію уставок для окремих ДРП. Не зважаючи на достатньо велику частку ТП-557 у споживанні досліджуваної РЕМ, її потужність не завжди корелюється зі споживанням мережі в цілому (рис. 2а). А це приводить до необхідності періодичного уточнення уставок (див. рис. 1).

Отже, для ТП-557 автоматизованою системою керування централізовано сформовано два набори уставок для відповідних періодів:

- набір уставок 1 ($\cos\varphi_{\min} = -0,99$; $\cos\varphi_{\max} = -0,95$; $\Delta t = 5$ хв);
- набір уставок 2 ($\cos\varphi_{\min} = -0,97$; $\cos\varphi_{\max} = -0,93$; $\Delta t = 10$ хв).

Результати їх реалізації локальними САК подано на рис. 2б. З графіків видно, що кількість змін потужності ДРП суттєво скорочено, але графік генерування відповідає графіку оптимального генерування ДРП. Реалізація такого

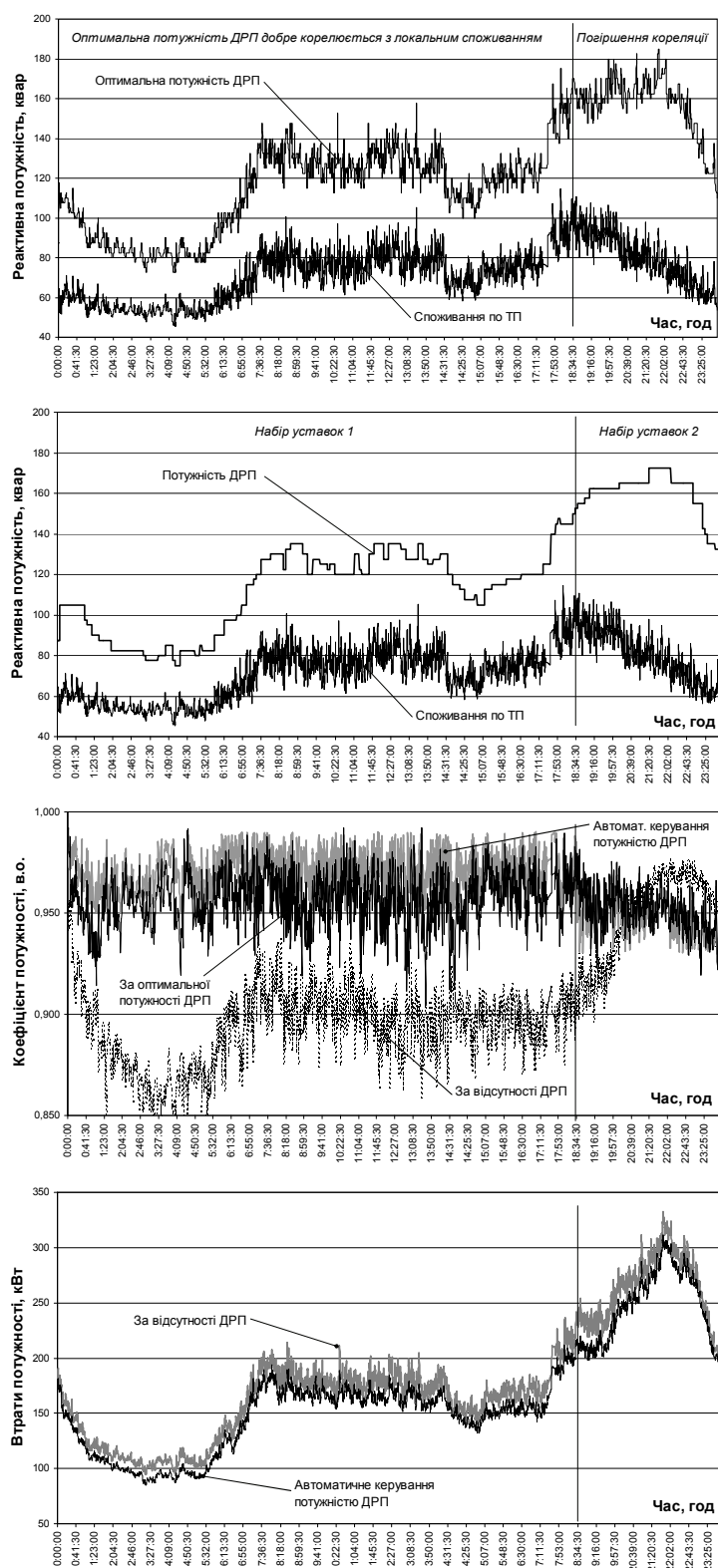


Рис. 2. Результати імітації роботи ДРП АУКРМ-160 на ТП-557: а — графіки оптимальної потужності ДРП за результатами імітації економічного режиму РЕМ; б — графік зміни потужності ДРП під дією локальної САК після оптимізації її налагоджувальних параметрів; в — графіки зміни коефіцієнта потужності на шинах ТП; г — графіки втрат електроенергії в РЕМ після впровадження ДРП

Результати їх реалізації локальними САК подано на рис. 2б. З графіків видно, що кількість змін потужності ДРП суттєво скорочено, але графік генерування відповідає графіку оптимального генерування ДРП. Реалізація такого

графіка генерування дозволила зменшити втрати електроенергії в досліджуваній РЕМ з 2236 кВт·год до 2058 кВт·год на добу, тобто близько 8% (рис. 2г). Крім того, автоматичне керування ДРП згідно з вказаними налагоджувальними параметрами забезпечує достатньо високі коефіцієнти потужності для досліджуваної ТП — не нижче 0,93 (рис. 2в).

Отже, результати імітаційних розрахунків та натурні експерименти підтверджують ефективність запропонованого математичного апарату та засобів його реалізації.

Висновки

Проведені дослідження дозволили розв'язати задачу підвищення ефективності керування перетіканнями реактивної енергії у РЕМ з розосередженим генеруванням шляхом розроблення на основі принципу найменшої дії методів та засобів їх оптимізації, а також формування умов оптимальності функціонування ДРП за критерієм мінімуму витрат на експлуатацію електромереж.

Показано, що сучасні умови та особливості експлуатації ДРП в електричних мережах України вимагають підвищення рівня автоматизації процесів, пов'язаних з перетіканням реактивної енергії. Для забезпечення ефективності функціонування розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням запропоновано критерії та сформовано умови оптимальності з урахуванням витрат на експлуатацію ДРП та якості електроенергії. Показано, що їх практична реалізація у вигляді налагоджувальних параметрів локальних САК вимагає значної кількості імітаційних розрахунків з урахуванням взаємозв'язку між окремими ДРП, що робить необхідним організацію керування за ієрархічним принципом.

Показано, що двоконтурна структура АСК забезпечує високу надійність та ефективність системи. Враховуючи динамічність та просторову розподіленість об'єкта керування система керування потребує застосування натурно-імітаційного моделювання режимів розподільних мереж для пошуку оптимальних рішень. Ефективність запропонованих у роботі підходів до оптимізації перетікань реактивної потужності підтверджено шляхом проведення розрахунків з оптимізації параметрів ДРП Вінницьких міських електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 6. — С. 44—50.
2. Adhikar S. P-Q and P-V control of photovoltaic generators in distribution systems / S. Adhikar, F. Li, H. Li // IEEE Transmission Smart Grid. — 2015. — Vol. 6, No. 6. — Pp. 2929—2941.
3. Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems / M. M. Aly, M. Abdel-Akher, Z. Ziadi, T. Senjyu // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — 2014. — Vol. 61. — Pp. 665—672.
4. Eid Ahmad. Voltage/Var Control of Unbalanced Distribution Systems Equipped with Distributed Single-Phase PV Generators / Ahmad Eid, Mamdouh Abdel-Akher // Electric Power Systems Research — 2016. — Vol. 135. — Pp. 105—113.
5. Islam M. Efficient Single Phase Transformerless Inverter for Grid-Tied PVG System With Reactive Power Control / M. Islam, N. Afrin and S. Mekhilef // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2016. — No. 99. — Pp. 1—11.
6. Hui Li. Reactive Power Compensation and DC link Voltage Control using Fuzzy-PID on Grid-connected PV System with d-STATCOM / Hui Li, Junwei Lu // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference. — 2016. — Pp. 1240—1244.
7. High Order Voltage and Current Harmonic Mitigation Using the Modular Multilevel Converter STATCOM / Epameinondas Kontos, Georgios Tzolaridis, Remus Teodorescu, Pavol Bauer // Special Section on Power Quality and Harmonics Issues of Future and Smart Grids. — 2017. — Vol. 5. — Pp. 16684—16692.
9. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз [Текст] / Д. Б. Банін, О. С. Яндутьський, М. Д. Банін, А. М. Боднар, А. В. Гнатівський // Промелектро. — 2004. — № 1. — С. 22—33.
10. Праховник А. В. Керування режимами електроспоживання в умовах запровадження в Україні ринку двосторонніх договорів та балансуєчого ринку [Текст] / А. В. Праховник, О. В. Коцар // Енергетика та електрифікація. — 2010. — № 2. — С. 42—52. — ISSN 0424—9879.
11. Кулик В. В. Оптиміальне керування потоками реактивної потужності в розподільних електромережах з розосередженим генеруванням / В. В. Кулик, І. В. Грицюк, Ю. В. Грицюк // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. — 2013. — С. 151—158.
12. Демов О. Д. Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах із використанням відносних спадів напруги / П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2015. — Вип. 30. — Т. 2. — С. 108—115. — (Технічні науки).
13. Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2016. — № 4. — Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/view/486/485>.
14. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці : монографія / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тепля. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. — 212 с. — ISBN 978-966-641-576-2.
15. Понтрягин Л. С. Принцип максимума / Лев Семенович Понтрягин. — М. : Оригинал, 1998. — 70 с.

16. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М. : Наука. — 1987. — 712 с.
 17. Andreas T. Voltage Control In PV-Rich LV Networks Without Remote Monitoring / Andreas T. Procopiou, And Luis F. Ochoa // IEEE Transactions On Power Systems. 2017. — Vol. 32, No. 2. — Pp. 1224—1236.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

Кулик Володимир Володимирович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри електричних станцій і систем, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Пірняк Віктор Михайлович — заступник начальника інспекції Держенергонагляду у Вінницькій області, e-mail: vpirnyak@gmail.com .

Держенергонагляд у Південно-Західному регіоні, Вінниця

V. V. Kulyk¹
V. M. Pirnyak²

Optimization of the Flow of Reactive Energy in the Distribution Electrical Networks Using the Principle of Least Action

¹ Vinnytsia National Technical University;

² State Energy Supervision in the South-West Region

The paper discusses the optimization of the flow of reactive energy in distribution electrical networks (DEN) in accordance with a complex criterion that takes into account the costs of operating reactive power (RPS) sources, losses and quality of electricity. Optimality conditions are proposed for constructing a distributed control system for RPS with local automatic control. They take into account the generation of condenser units (CU) with limited controllability due to constructive execution, or because of the operational peculiarities. It is shown that optimal control of RPS can be carried out using the principle of least action, and for optimal control of RPS in distribution electrical networks it is possible and expedient to use adaptive automated control systems.

Keywords: distribution electric networks, power losses, reactive energy flow, optimization, automatic control, reactive power source.

Kulyk Volodymyr V. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrical Stations and Systems, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com ;

Pirnyak Viktor M. — Deputy Head of the Inspectorate of the State Energy Supervision in Vinnytsia region, e-mail: vpirnyak@gmail.com

V. V. Кулик¹
V. M. Пірняк²

Оптимизация перетоков реактивной энергии в распределительных электрических сетях с использованием принципа наименьшего действия

¹Вінницький національний технічний університет;

²Госенергонадзор в Юго-Западном регионе

Рассмотрены вопросы оптимизации перетоков реактивной энергии в распределительных электрических сетях (РЭС) в соответствии с комплексным критерием, учитывающим затраты на эксплуатацию источников реактивной мощности (ИРМ), потери и качество электроэнергии. Предложены условия оптимальности для построения распределенной системы управления ИРМ с локальным автоматическим управлением. В них учтено генерирование конденсаторных установок (КУ) с ограниченной управляемостью вследствие конструктивного выполнения, или из-за особенностей эксплуатации. Показано, что оптимальное управление ИРМ может осуществляться с использованием принципа наименьшего действия, а для оптимального управления ИРМ в распределительных электрических сетях можно и целесообразно применять адаптивные автоматизированные системы управления.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, потери электроэнергии, переток реактивной энергии, оптимизация, автоматическое управление, источник реактивной мощности.

Кулик Владимир Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электрических станций и систем, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com ;

Пирняк Виктор Михайлович — заместитель начальника инспекции Госенергонадзора в Винницкой области, e-mail: vpirnyak@gmail.com