

В. В. Кулик¹
О. Б. Бурякіна¹
Ю. В. Малогулко¹

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТІКАНЬ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ЗАСОБАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

На підставі методу невизначених множників Лагранжа розроблено математичну та цифрову моделі оптимального розподілу активного та реактивного навантаження електричних мереж між розосередженими джерелами електроенергії. На цій підставі отримано метод формування перспективного плану розвитку електричних мереж з поетапним визначенням оптимальних місць приєднання відновлюваних джерел електроенергії.

Ключові слова: розподілені електричні мережі, відновлювальні джерела енергії, матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужностей, комплексна задача оптимізації запланованого підключення ВДЕ.

Вступ

Розвиток відновлювальної енергетики в Україні зумовлює появу нових, нетипових задач проектування та експлуатації для місцевих електричних мереж (ЕМ) напругою 10—35 кВ.

Враховуючи державну підтримку розбудови відновлюваної енергетики, питанням проектування та експлуатації таких станцій приділено достатньо уваги. Однак, розглядаючи проблему інтеграції розосередженого генерування в електроенергетичну систему України, науковці часто нехтують питаннями оптимізації перспективного плану розвитку електричних мереж ліцензіатів з передачі електроенергії. Задача є достатньо складною та багатофакторною, оскільки передбачає комплексну оптимізацію параметрів та розташування відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ), місць їх приєднання до ЕМ та резервування, а також планування заходів з розвитку та реконструкції електромереж. З огляду на забезпечення ефективної роботи останніх, необхідно враховувати вплив ВДЕ на надійність електропостачання споживачів та транспортування виробленої електроенергії, на якість електроенергії в ЕМ та на втрати електроенергії. Крім того, має враховуватися короткострокова динаміка тарифів енергоринку та довгострокова динаміка «зеленого» тарифу.

Таким чином, дослідження умов оптимального розподілу потужностей ВДЕ у електричних мережах ліцензіатів з передачі електроенергії, враховуючи перспективний план розвитку цих мереж, є досить актуальною задачею.

У випадку планування перспективного розвитку електричних мереж за умов необхідності підключення нових потужностей генерування ВДЕ, доцільно переходити до розв'язання комплексної задачі їх підключення до електричних мереж з метою зменшення втрат активної потужності на передачу електроенергії та вирівнювання режиму напруг у вузлах схеми. При цьому приєднання нових потужностей генерування відбувається поетапно відповідно до перспективного плану розвитку електромережі.

Оцінити вплив приєднання на втрати активної потужності можна за допомогою матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужностей [1]. Вказані коефіцієнти характеризують вплив потужностей вказаного вузла на втрати активної потужності у вітках заступної схеми ЕМ.

Математична та цифрова моделі оптимального розподілу активного та реактивного навантаження ЕМ

Для оцінювання ефективності варіантів під'єднання нових потужностей генерування з використанням матриці \mathbf{T} за критерієм мінімуму втрат активної потужності необхідно на початковому етапі сформулювати перелік вузлів θ_v , до яких можливе приєднання ВДЕ. З переліку вузлів θ_v обирається такий, якому відповідає найменше значення коефіцієнта впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності у ЕМ

$$\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma} = \dot{\mathbf{T}}_t \cdot \mathbf{n}_b, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{T}}_t$ — транспонована матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності; \mathbf{n}_b — одиничний вектор стовпець, який має розмірність по кількості вузлів у схемі.

Введення нових потужностей у обраний вузол забезпечить, з певним допущенням, мінімум втрат активної потужності.

Вектор $\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma}$ має розмірність за кількістю вузлів. Кожен його елемент відповідає частці втрат потужності від навантаження вузла, відповідно до номера стовпця цього елемента.

Як показано у [2], елементи матриці $\dot{\mathbf{T}}$ є коефіцієнтами чутливості втрат потужності в i -й вітці до зміни потужності в j -му вузлі. Оскільки вектор $\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma}$ складається з суми елементів матриці $\dot{\mathbf{T}}_t$ (по стовпцях), то він є вектором чутливості. Він характеризує зв'язок між змінами потужності у вузлах та приростом сумарних втрат потужності у схемі електричної мережі. Використовуючи коефіцієнт T_i , можна оцінити на скільки зміняться загальномереві втрати за рахунок запланованого приєднання ВДЕ.

Оскільки вказані коефіцієнти чутливості дозволяють оцінити також вплив зміни реактивних потужностей у вузлах споживання або генерування на режим роботи електричної мережі, то доцільне їх застосування і для оцінювання впливу ВДЕ на режими напруг у вузлах схеми.

Використовуючи вектор коефіцієнтів чутливості, комплексну задачу оптимізації запланованого підключення ВДЕ до електричних мереж з метою зменшення втрат активної потужності на передачу електроенергії та вирівнювання режиму напруг у вузлах схеми можна сформулювати таким чином:

$$\text{мінімізувати} \quad \Delta P = \sum_{i=1}^n P_i (T' - T_i'' k_{\text{тгф}_{-i}}) + \Delta P_{\text{ЦЖ}} + \Delta P_{\text{УК}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де P_i — потужності керованого ВДЕ або споживача, $i = 1, 2, \dots, n$; $k_{\text{тгф}_{-i}}$ — доцільний коефіцієнт потужності джерела енергії або споживача; $\Delta P_{\text{ЦЖ}}$ — втрати активної потужності в електричній мережі, викликані перетіканнями з центру живлення; $\Delta P_{\text{УК}}$ — втрати активної потужності в електричній мережі викликані перетіканнями з умовно керованих ВДЕ; T'_i, T_i'' — коефіцієнти розподілу втрат потужності.

З урахуванням балансових обмежень

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_i - P_{\text{ЦЖ}} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n (P_i \cdot k_{\text{тгф}_{-i}}) - Q_{\text{ЦЖ}} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де $P_{\text{ЦЖ}}, Q_{\text{ЦЖ}}$ — активна та реактивна потужності, що надходять у мережу із центру живлення.

Для цільової функції (2) та балансових обмежень (3) запишемо функцію Лагранжа. Замість умовного мінімуму цільової функції будемо шукати безумовний мінімум функції Лагранжа:

$$L = \sum_{i=1}^n P_i (T' - T_i'' k_{\text{тгф}_{-i}}) + \Delta P_{\text{ЦЖ}} + \Delta P_{\text{УК}} + \lambda_P \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_{\text{ЦЖ}} \right) + \lambda_Q \left(\sum_{i=1}^n (P_i \cdot k_{\text{тгф}_{-i}}) - Q_{\text{ЦЖ}} \right) \rightarrow \min,$$

де λ_P, λ_Q — невизначені множники Лагранжа.

Мінімум функції Лагранжа досягається у разі рівності нулю її часткових похідних по змінним P_i та $k_{\text{тгф}_{-i}}$, тобто:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial k_{\text{тгф}_{-i}}} &= - \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_i'' + \lambda_Q \sum_{i=1}^n P_i = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial P_i} &= T'_i - T_i'' \cdot k_{\text{тгф}_{-i}} + \lambda_P + \lambda_Q \cdot k_{\text{тгф}_{-i}} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

З рівнянь (4) видно, що шуканому рішенню відповідає умова рівності між собою коефіцієнтів розподілу втрат потужності:

$$T_i'' = \lambda_Q = \text{idem}; \quad T_i' = -\lambda_P = \text{idem}.$$

З отриманого розв'язку задачі комплексної оптимізації видно, що оптимальним розподілом сукупності нових потужностей генерованих ВДЕ, відповідно до перспективного плану розвитку на кожному етапі та обраних критеріїв оптимізації, буде такий, що відповідає однаковим коефіцієнтам чутливості втрат по вузлах заступної схеми ЕМ.

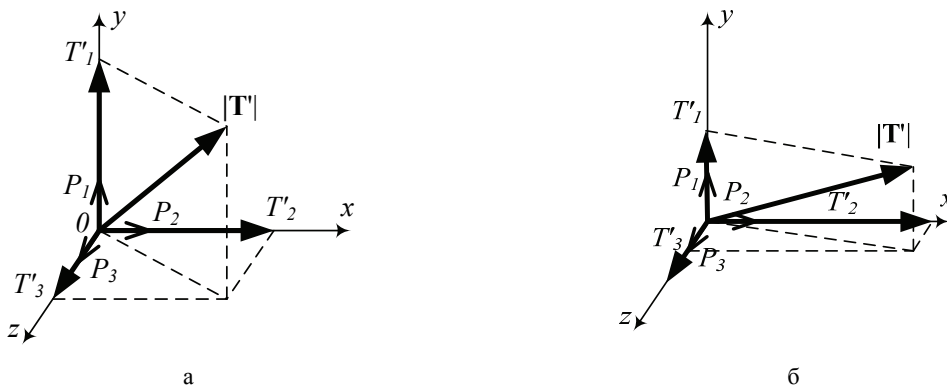
Оскільки запропоновані показники \mathbf{T}' , \mathbf{T}'' є багатомірними, то без додаткових умов не дають можливості однозначного оцінювання ефективності проектних рішень. Тобто необхідно ввести узагальнений показник для вибору того чи іншого варіанту розвитку шляхом зведення векторів \mathbf{T}' , \mathbf{T}'' до вигляду числа. Лише в такому випадку забезпечується можливість об'єктивного оцінювання близьких варіантів.

Згідно з фізичним змістом вектори \mathbf{T}' , \mathbf{T}'' можна розглядати як функціональні метричні множини $\{\mathbf{T}'\}$, $\{\mathbf{T}''\}$, які задовольняють аксіомам метричного простору [3]. Кожна множина є набором координат n -вимірному вектору сумарних втрат потужності у базисі вузлових потужностей ЕМ, які визначені для відповідного варіанту розвитку. Таким чином, довжини векторів втрат dP' , dP'' у відповідності до [3] можуть бути визначені за виразами

$$dP' = |\mathbf{T}'| = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n T_i'^2} \right]; \quad dP'' = |\mathbf{T}''| = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n T_i''^2} \right]. \quad (5)$$

Таким чином, довжини векторів dP' , dP'' мають фізичний зміст модулів відносних складових втрат ΔP від перетікань активної та реактивної потужностей і можуть бути використані як якісний індикатор впливу параметрів окремого вузла на рівень оптимальності режиму електричної мережі в цілому.

Графічно, сутність запропонованого показника, можна подати на прикладі електричної мережі з трьох вузлів (рис.). З рисунку видно, що збільшення значення модулю dP' може виникати як внаслідок пропорційного зростання окремих коефіцієнтів чутливості втрат T_i' , так і в результаті істотного зростання окремих складових. Це відповідає характеру зміни втрат потужності в електромережах, а отже запропонований показник характеризує зміни втрат під час передачі електроенергії. Аналогічні висновки можна зробити щодо відповідності складової $|\mathbf{T}''|$.



Розклад модулів векторів чутливості $|\mathbf{T}'|$ по ортогональному базису для випадків:

а — близьких за значеннями; б — істотно різних складових

Висновки

Розв'язок задачі оптимізації перетікань активної та реактивної потужностей у розподільних електричних мережах дозволяє визначити оптимальні місця розташування та встановлену потужність ВДЕ у локальній електричній системі з урахуванням позитивного ефекту від їх спільної експлуатації. Запропонована цільова функція враховує показники якості електроенергії, недотримання яких різко віддаляє отриманий розв'язок від оптимуму функції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін : моногр. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 123 с.
2. Лежнюк П. Д. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах : моногр. / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько. — Вінниця, ВНТУ, 2010. — 120 с.
3. Воеводин В. В. Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. — М. : Наука, 1984. — 320 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.01.2014

Кулик Володимир Володимирович — канд. техн. наук, доцент, **Бурикін Олександр Борисович** — канд. техн. наук, доцент, **Малогулко Юлія Володимирівна** — аспірантка, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.
Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Kulyk¹
O. B. Burykin¹
Yu. V. Malogulko¹

OPTIMIZATION FLOWS OF ACTIVE AND REACTIVE POWER IN THE DISTRIBUTED NETWORKS BY FACILITIES OF THE DISTRIBUTED GENERATION

¹Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

Based on method of Lagrange multipliers the mathematical and the digital models of optimal distribution of active and reactive load in electrical distribution networks between power sources were developed in this paper. The method of forming perspective plan of development of electrical networks with the gradual definition of the optimal locations of the distributed energy recourses was received on this basis.

Keywords: power distribution networks, renewable energy, matrix of coefficient of loss distribution capacity, complex problem of optimization.

Kulyk Volodymyr V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, **Burykin Oleksandr B.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, **Malogulko Yulia V.** — Post-Graduate Student, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.

The Chair of Electric Stations and Systems

В. В. Кулик¹
А. Б. Бурыкин¹
Ю. В. Малогулко¹

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ СРЕДСТВАМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ

¹Винницкий национальный технический университет

На основе метода неопределенных множителей Лагранжа разработаны математическая и цифровая модели оптимального распределения активной и реактивной нагрузки электрических сетей между распределительными источниками электроэнергии. Предложен метод формирования перспективного плана развития электрических сетей с поэтапным определением оптимальных мест присоединения возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, возобновляемые источники энергии, матрица коэффициентов распределения потерь мощностей, комплексная задача оптимизации запланированного подключения ВИЭ.

Кулик Владимир Владимирович — канд. тех. наук, доцент, **Бурыкин Александр Борисович** — канд. тех. наук, доцент, **Малогулко Юлия Владимировна** — аспирантка, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.

Кафедра электрических станций и систем