

УДК 621.311.001.57

В. В. Кулик¹
О. Б. Бурикін¹
В. А. Видмиш¹

ВРАХУВАННЯ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ В ПРОЦЕСІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЇЇ РЕЖИМАМИ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто метод оптимального керування електричними системами (ЕС) з урахуванням змінних параметрів, що дозволяє підвищити ефективність керування з метою зменшення витрат електроенергії. Показано, що застосування технологій інтелектуальних мереж на основі концепції Smart Grid виводить проблематику оптимального керування на якісно новий рівень і дозволяє, застосовуючи адаптивні системи автоматичного керування, підвищити якість керування ЕС.

Ключові слова: електрична система, нормальний режим, автоматизація оптимального керування, оцінка якості керування, змінні параметри, інтелектуальна мережа.

Вступ

Наразі в Україні відбуваються процеси фундаментальної перебудови електроенергетики, зумовлені розвитком ринкових відносин і конкуренції. Нові правила взаємин енергоринку визначають необхідність перегляду, в першу чергу, стратегії диспетчерського керування. Остання має вирішальне значення для успіху реформ, оскільки персонал повинен на часі виконувати функції оперативного керування нормальними режимами з урахуванням ділових і комерційних інтересів енергокомпаній (ЕК) різних форм власності.

Підвищення ефективності оперативного керування ЕК в сучасних умовах може досягатися шляхом розширення функціональних можливостей діючої системи технологічного керування, або шляхом впровадження сучасних програмних і технічних засобів з високими показниками надійності та готовністю до використання протягом тривалого часу.

Сучасні тенденції розвитку світової енергетики базуються на використанні положень концепції *Smart Grid* [1]. Передбачається, що технології *Smart Grid* повинні на часі забезпечувати:

- оптимальний розподіл потоків потужності в ЕС та зменшення технологічних витрат електроенергії у ній;
- швидко скоординовану реакцію під час аварій;
- можливість об'єднання в єдину енергосистему великих електростанцій та сучасних відновлюваних джерел енергії.

Оперативне керування нормальними режимами окремих ЕК на основі концепції *Smart Grid*, передбачає використання автоматизованих систем диспетчерського керування (АСДК) та адаптивних систем автоматичного керування (САК) [2]. Останні потребують розроблення та вдосконалення математичних моделей, які б забезпечували можливість перенесення відтворених результатів оптимального керування потоками потужностей на об'єкт керування. Використання таких моделей в оперативному керуванні дозволить узгодити дії диспетчера та САК [3—5].

Матеріали дослідження

Інформаційне забезпечення систем оптимального керування

На сьогодні в інформаційному забезпеченні систем технологічного керування України склалася

двоїста ситуація. Системоутворювальні мережі майже повністю забезпечені інформацією про параметри елементів заступних схем ЕМ та їх режимів. У той же час у розподільних мережах, через неповне технічне оснащення телеінформаційними засобами та засобами обліку електроенергії, рішення з керування приймаються на підставі частково недостовірної інформації, що зумовлює використання спрощених методик розрахунку параметрів елементів мережі [6].

Спрощені методики розрахунку параметрів елементів ЕМ, які використовуються у математичних моделях САК, базуються на використанні довідникових параметрів заступних схем. Це за змінних умов навколишнього середовища та режимів ЕМ призводить до неточності вхідної інформації і, як наслідок, погіршення ефективності рішень з оптимального керування режимами ЕС.

Зі зміною умов навколишнього середовища, режимів споживання електроенергії, стану енергетичного обладнання змінюються значення параметрів елементів ЕМ. На рис. 1 подано основні причини зміни параметрів ЕС кліматичного та режимного характеру, а також зумовлені оперативним керуванням їх режимами.



Рис. 1. Основні причини зміни параметрів ЕС

Отже, пасивні параметри заступної схеми ЕМ, які у загальноприйнятих моделях розрахунку ustalених та оптимальних режимів приймаються сталими, можуть відрізнитись від довідникових і змінюють свої значення в залежності від багатьох факторів.

Наприклад, зміна активного опору повітряних ліній електропередачі суттєво залежить від струму навантаження в лінії, температури навколишнього середовища, швидкості вітру та забрудненості проводів. Значення питомого активного опору проводу приведені у довідникових даних розраховані за температури навколишнього середовища 20 °С, хоча для кліматичних умов України можливий температурний діапазон знаходиться в межах від -30 до +40 °С.

У опорі силових трансформаторів, розрахованому за паспортними даними, не враховується положення перемикача РПН трансформатора. Оскільки змінюється кількість витків обмоток, то значно змінюється активний і реактивний опір заступної схеми трансформатора. Останні у загальноприйнятих математичних моделях розраховуються за паспортними даними трансформаторів для середньої відпайки перемикача РПН [7].

Неточність початкових даних, що використовуються в математичних моделях функціонування САК ЕС може приводити до зниження ефективності керування. Отже, у процесі формування інформаційного забезпечення САК необхідно уточнювати дані, використовуючи надлишковість вектору спостереження. Таке уточнення дозволить підвищити адекватність моделювання станів об'єкта і, таким чином, забезпечити ефективніше керування нормальними режимами ЕС.

Отже, враховуючи тенденції розвитку інформаційного та апаратного забезпечення систем тех-

нологічного керування, можливість використання сучасних підходів у розвитку електроенергетики на базі концепції Smart Grid, актуальним напрямком підвищення ефективності оптимального керування нормальними режимами ЕС є вдосконалення їх математичних моделей, які використовуються в АСДК та САК шляхом урахування змінних параметрів основного обладнання.

Оптимальне керування потоками потужності в електромережах. Для формування законів оптимального керування, які реалізуються за допомогою САК потоками потужності з метою наближення поточного строморозподілу в ЕМ до оптимального, доцільно використовувати такий підхід [8].

У контури заступної схеми ЕМ, за рахунок небалансу коефіцієнтів трансформації регульовальних пристроїв, які входять до контуру, вводяться е. р. с. небалансу. Останні наближають строморозподіл в ЕМ до оптимального.

У [9] значення е. р. с. небалансу, на основі математичної моделі нормального режиму ЕМ без урахування змінних параметрів визначається як

$$\dot{E}_{\text{нб} \cdot d} = 1 - \prod_d \dot{k}^{\text{деп}} \cdot \dot{k}_d^{\text{хор}}, \quad (1)$$

де $\dot{k}_d^{\text{хор}}$ — коефіцієнти трансформації регульованих трансформаторів, що знаходяться в хорді d -го контуру заступної схеми; $\prod_d \dot{k}^{\text{деп}}$ — добуток коефіцієнтів трансформації нерегульованих трансформаторів d -го контуру заступної схеми (ці коефіцієнти приймаються умовно постійними).

Змінні параметри ЕМ, у рамках наведеного підходу з визначення оптимальних керувальних впливів, можна врахувати:

1) шляхом коригування пасивних параметрів математичної моделі нормального режиму ЕМ (заступної схеми) з урахуванням змінних параметрів;

2) шляхом коригування параметрів регульовальних пристроїв з урахуванням змінних параметрів.

Перший спосіб є досить складним для реалізації з практичної точки зору, оскільки потребує оперативного коригування математичної моделі ЕМ у її пасивній частині.

Другий підхід доцільніший, оскільки дозволяє оперативно, уточнивши параметри відносно невеликої кількості регульовальних пристроїв, використовувати існуючі математичні моделі нормальних режимів ЕМ (без урахування змінних параметрів) та формувати оптимальні керувальні впливи без істотних змін базового алгоритму.

Метод урахування змінних параметрів математичної моделі нормального режиму ЕМ фіктивними коефіцієнтами трансформації

Суть пропонованого підходу полягає у врахуванні змінних параметрів математичної моделі нормального режиму ЕМ, шляхом подання всіх віток заступної схеми у вигляді трансформаторних віток з фіктивними коефіцієнтами трансформації. Останні враховують додатковий спад напруги між початком і кінцем вітки, викликаний зміною її пасивних параметрів.

Заступну схему лінії електропередачі (ЛЕП) або трансформатора, можна подати у вигляді заступної схеми вітки з ідеальними трансформаторами (рис. 2). Коефіцієнт трансформації вітки, що відтворює ЛЕП, буде дорівнювати одиниці. Але після зміни її пасивних параметрів під дією навантаження або факторів навколишнього середовища, для уточнення повного опору в розрахунковій моделі ЕМ, цей коефіцієнт можна подати як функцію від змінних параметрів.

Значення фіктивного комплексного коефіцієнту трансформації вітки заступної схеми ЕМ з урахуванням найвпливовіших факторів ψ можна розрахувати за виразами [9]:

— для лінії електропередачі

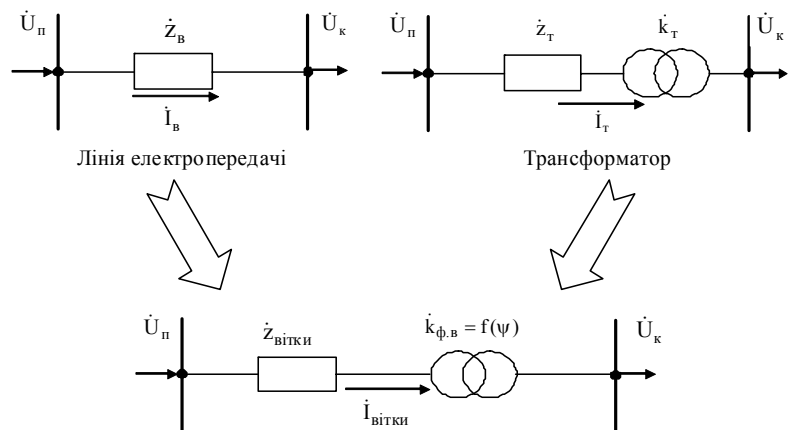


Рис. 2. Заступна схема вітки з фіктивним коефіцієнтом трансформації

$$\dot{k}_{\text{ф.в}} = \dot{k}_{\text{вітки}}; \quad (2)$$

— для трансформатора

$$\dot{k}_{\text{ф.в}} = \dot{k}_{\text{т}} \cdot \dot{k}_{\text{в}}, \quad (3)$$

де $\dot{k}_{\text{в}}$ — комплексний коефіцієнт трансформації i -ї вітки, який забезпечує врахування зміни пасивних параметрів її заступної схеми під дією зовнішніх факторів; $\dot{k}_{\text{т}}$ — поточний комплексний коефіцієнт трансформації трансформатора.

Якщо у вітці, яка з'єднує вузли i та j , під дією зазначених вище факторів змінюються повздовжні параметри, то це може бути враховано введенням коефіцієнта трансформації $\dot{k}'_{ij} \neq 1$, який визначається зі співвідношення первинної та вторинної напруг:

$$\dot{k}'_{ij} = \frac{\dot{U}_{ki}}{\dot{U}_{ki} - \sqrt{3} \dot{I}_{vij} \Delta z_{vij}}, \quad (4)$$

де Δz_{vij} — зміна опору вітки, що знаходиться між i -м та j -м вузлами.

Якщо в зазначеній вітці змінюються поперечні параметри (наприклад, активна та реактивна провідності під дією навколишнього середовища, або провідності на приймальному кінці вітки, для врахування статичних характеристик навантаження), то коригувальний коефіцієнт трансформації пропонується визначати так:

$$\dot{k}''_{ij} = \frac{\dot{U}_{ki}}{\dot{U}_{ki} - \sqrt{3} (\dot{I}_{vij} + \Delta \dot{I}_{vij}) z_{vij}}, \quad (5)$$

де $\Delta \dot{I}_{vij}$ — зміна струму вітки між вузлами i та j , викликана зміною поперечних параметрів заступної схеми електричної мережі.

З урахуванням (4), (5) коефіцієнт трансформації, який враховує змінні параметри заданої вітки:

$$\dot{k}_{vij} = \dot{k}'_{ij} \cdot \dot{k}''_{ij}. \quad (6)$$

Застосовуючи запропонований підхід до врахування змінних параметрів у математичній моделі нормального режиму ЕМ вираз для визначення оптимальних е. р. с. небалансу, які наближають струморозподіл до оптимального (1) може бути записано так:

$$\dot{E}_{\text{нб-д}} = 1 - \left[\prod_{\text{д}} \dot{k}^{\text{дєр}} \cdot \prod_{\text{д}} \dot{k}_{\text{ф.в}} \right] \dot{k}_{\text{д}}^{\text{хор}}. \quad (7)$$

де $\prod_{\text{д}} \dot{k}_{\text{ф.в}}$ — добуток фіктивних комплексних коефіцієнтів трансформації віток заступної схеми ЕМ, що входять до d -го контуру.

Отримана математична модель оптимальних е. р. с. небалансу у контурах ЕМ з урахуванням їх змінних параметрів, дозволяє отримувати уточнене значення оптимального коефіцієнта трансформації регульованого трансформатора $\dot{k}_{\text{д}}^{\text{хор}}$ порівняно з моделлю (1). Уточнення забезпечується врахуванням зміни умов навколишнього середовища, режимів споживання електроенергії, стану та параметрів енергетичного обладнання.

Вплив зміни пасивних параметрів електричних систем на ефективність оптимального керування їх режимами

Для забезпечення ощадного використання ресурсу регульовальних пристроїв (РП) трансформаторів зв'язку важливим завданням є виділення з загального переліку РП таких, що забезпечують найбільший питомий (на одне перемикання) вплив на оптимальність перетікань активної потужності в ЕМ. На цій підставі визначаються налагоджувальні параметри локальних САК, серед яких зона нечутливості системи керування [10]. Введення зони нечутливості робить неможливим залучення до керування режимами ЕМ підсистеми керування або окремого регульовального пристрою,

якщо встановлена зона нечутливості САК (рис. 3) перекриває їх регулювальний діапазон РП (для наведеного прикладу у керуванні приймають участь трансформатори 1 та 2).

Враховуючи можливі діапазони змін пасивних параметрів ЕМ під дією зовнішніх впливів, такі зміни, очевидно, впливають на оптимальні значення параметрів регулювальних пристроїв і, таким чином, на перелік РП, якими доцільно керувати перетіканнями потужності у певному режимі ЕМ. Вище показано, що врахування змінних параметрів впливає на значення отримання оптимальних е. р. с. небалансу, а отже й коефіцієнтів трансформації РП, які забезпечують близький до економічного поточкорозподіл в ЕМ. Врахування змін параметрів ЕМ може приводити як до збільшення, так і до зменшення оптимальних коефіцієнтів трансформації регулювальних трансформаторів, а отже — до відповідних змін необхідної кількості перемикачів РПН трансформаторів. За рахунок цього змінюється питома вага одного перемикачів певного РП з огляду на зменшення втрат потужності в електромережах, а отже ваговий коефіцієнт цього РП у загальному переліку.

На рис. 3 показано область можливих значень оптимальних коефіцієнтів трансформації з урахуванням змінних параметрів ЕМ для трансформатора 2. Залежно від зміни пасивних параметрів ЕМ регулювальна характеристика цього трансформатора (залежність втрат потужності в ЕМ від коефіцієнта трансформації у відносних одиницях 2 на рис. 3) може змінюватися у діапазоні 2'—2''.

Рішення щодо доцільності проведення керувальних впливів ухвалюється на підставі аналізу відхилення оптимальних коефіцієнтів трансформації від поточних, а також перевірки відповідності налагоджувальних параметрів зоні нечутливості САК. Виходячи з цього, у випадку зміни пасивних параметрів ЕМ, такої, що відповідає характеристиці трансформатора 2' (рис. 3), даний трансформатор буде вилучено з регулювання. З іншого боку, якщо зміна параметрів ЕМ буде відповідати характеристиці трансформатора 2'', то інтенсивність використання РП цього трансформатора буде збільшена.

Таким чином, перехід від визначення оптимальних параметрів регулювальних пристроїв $k_{2\text{опт}}$ до оцінювання діапазонів їх імовірних значень dk (рис. 3) дозволяє зменшити ризики хибних рішень з визначення та реалізації керувальних впливів, зумовлених недосконалістю вихідної інформації про пасивні параметри ЕМ. З іншого боку, з удосконаленням інформаційного забезпечення задачі оптимального керування потоками потужності в ЕС стане можливим зворотний перехід з поступовим, обґрунтованим зменшенням діапазону dk та, зрештою, визначення оптимальних параметрів $k_{2\text{опт}}$ з заданою похибкою.

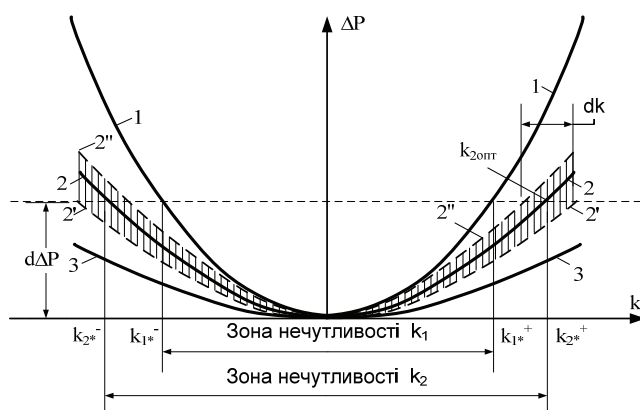


Рис. 3. Залежність втрат активної потужності від коефіцієнтів трансформації регулювальних пристроїв

Висновки

1. Використання уточненої математичної моделі нормальних режимів ЕС з урахуванням змінних пасивних параметрів дозволяє підвищити адекватність відтворення станів ЕС, що формує передумови для підвищення ефективності оптимального керування потоками потужності в них, починаючи від визначення оптимальних параметрів РП та налагоджувальних параметрів САК і закінчуючи імітацією впровадження керувальних впливів на стадії їх адаптації.

2. Запропонована математична модель нормальних режимів ЕМ з фіктивними коефіцієнтами трансформації може бути ефективно використана для розроблення алгоритмів аналізу поточних та імітації перспективних режимів ЕС, а також автоматизації керування ними, що, з рештою, дозволить підвищити якість функціонування САК потоками потужності в ЕС.

3. Використовуючи запропонований підхід до кількісного оцінювання чутливості оптимальних рішень у задачах керування режимами ЕС до впливу змінних параметрів ЕМ, стає можливим підвищити ефективність використання ресурсу регулювальних пристроїв трансформаторних зв'язків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України : зб. наук. пр. Спец. випуск. — Ч. 1. — К. : ІЕД НАНУ, 2011. — С. 5—20.
2. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012, [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf.
3. Орнов В. Г. Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами / В. Г. Орнов, М. А. Рабинович. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 233 с.
4. Руденко Ю. Н. Вступление к циклу статей по совершенствованию АСДУ электроэнергетических систем / Ю. Н. Руденко // Изв. АН РФ. Энергетика. — 1992. — № 4. — С. 3—5.
5. Мокін Б. І. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи / Б. І. Мокін, П. Д. Лежнюк, Ю. В. Лук'яненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1995. — № 3. — С. 5—9.
6. Методика по визначенню втрат електроенергії в трансформаторах і лініях електропередач / Міністерство енергетики України ; затв. заст. Міністра енергетики України з енергетичного нагляду В. А. Дарчук. — Київ, 1998 р.
7. Лагутин В. М. Повышение эффективности использования средств регулирования напряжения в процессе оптимизации режимов электрических сетей : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. / В. М. Лагутин ; Моск. энер. инст. — М., 1988. — 20 с.
8. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками в неоднорідних електричних системах з урахуванням чутливості / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, В. В. Тептя // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2010. — № 666. — С. 56—61. — ISSN 0321-0499.
9. Бурикін О. Б. Оптимальне керування взаємодіючими електричними мережами з урахуванням змінних параметрів / О. Б. Бурикін, В. О. Лесько, В. А. Видмиш, С. В. Гуцол // Наукові праці донецького національного технічного університету — 2013 — №1(14) — С. 40—47.
10. Лежнюк П. Д. Реалізація контролю і керування функціонуванням трансформаторів в електроенергетичних системах / П. Д. Лежнюк, К. І. Кравцов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 6. — С. 84—86.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.02.2014

Кулик Володимир Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: kulik_vv@mail.ru;

Бурикін Олександр Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: mr.burykin@mail.ru;

Видмиш Володимир Андрійович — асистент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: prof_vydmysh@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Kulyk¹
O. B. Burykin¹
V. A. Vydmysh¹

Accounting of variable parameters of the electric system in the optimal control of its modes

¹Vinnitsa National Technical University

This paper considers the method of optimal control of electric systems (ES) taking into account variable parameters that can improve the quality of control to reduce losses of electric power. It is shown that application of smart grid technologies based on the concept of Smart Grid displays the problems of optimal control on a qualitatively new level and makes applying adaptive systems of automatic control, improve the quality of control ES.

Key words: electrical system, normal mode, automation of optimal control, evaluation of quality control, variable parameters, smart grid.

Kulyk Volodymyr V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electric Stations and Systems, e-mail: kulik_vv@mail.ru;

Burykin Oleksandr B. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electric Stations and Systems, e-mail: mr.burykin@mail.ru;

Vydmysh Volodymyr A. — Assistant of the Chair of Electric Stations and Systems, e-mail: prof_vydmysh@mail.ru

В. В. Кулик¹
А. Б. Бурыкин¹
В. А. Выдмыш¹

Учет переменных параметров электрической системы в процессе оптимального управления ее режимами

¹Винницкий национальный технический университет

Рассмотрен метод оптимального управления электрическими системами (ЭС) с учетом переменных параметров, что позволяет повысить эффективность управления с целью уменьшения потерь электроэнергии. Показано, что применение технологий интеллектуальных сетей на основе концепции Smart Grid выводит проблематику оптимального управления на качественно новый уровень и позволяет, применяя адаптивные системы автоматического управления, повысить качество управления ЭС.

Ключевые слова: электрическая система, нормальный режим, автоматизация оптимального управления, оценка качества управления, переменные параметры, интеллектуальная сеть.

Кулик Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: kulik_vv@mail.ru;

Бурыкин Александр Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем e-mail: mr.burykin@mail.ru;

Выдмыш Владимир Андреевич — ассистент кафедры электрических станций и систем, e-mail: prof_vydmysh@mail.ru.