

УДК 621.311.13

НОРМАЛІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ**Ю.І. Тугай**, докт. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
tugay@ied.org.ua

Сучасна електроенергетична система складається з сукупності мереж, які утворюють для транспортування потоків енергії в поздовжньому та поперечному напрямках певні рівні. Метою цієї роботи є дослідження режимів таких мереж при паралельній роботі та визначення засобів їх оптимізації. Зазвичай природний режим у системі є аномальним з перевантаженими лініями електропередачі та високим рівнем втрат енергії. Але вимушена відмова від паралельної роботи шляхом розмикання схем мереж нижчого ієрархічного рівня, що зараз застосовується на практиці, не є найкращим вирішенням проблеми, оскільки спричиняє погіршення надійності транспортування електричної енергії та погіршення її якості. Аналіз можливих шляхів нормалізації режиму доцільно виконувати за допомогою математичного моделювання. Слід зазначити, що традиційне використання математичної теорії графів для розробки моделей структури електричних мереж не є цілком адекватним, оскільки не відтворює матеріальне втілення пасивних схем заміщення та фізичні властивості елементів. У той же час тензорний підхід до аналізу режимів електричних мереж дав можливість розробити новий метод визначення електрорушійної сили нормалізації. На відміну від існуючих методів вибору непрямих зовнішніх впливів, запропонований метод більш простий та ефективний при практичній реалізації. Бібл. 6.

Ключові слова: електрична мережа, тензорна модель електричної мережі, режим електричної мережі, паралельна робота, нормалізація режиму електричної мережі.

Під нормальними режимами електричних мереж мають на увазі такі, які допускають тривалу роботу без будь-яких обмежень як для споживачів, так і для обладнання самих мереж. Але при досягненні критичних відхилень значень параметрів електричної мережі слід говорити вже про виникнення аномального режиму, для якого використання традиційних методів керування будуть неадекватними, а значить, і неефективними. Наслідками некерованого аномального режиму може бути не тільки погіршення техніко-економічних показників роботи електричної мережі, але й uszkodження обладнання у відповідальних споживачів, а також вихід з ладу основного устаткування самої мережі з подальшим розвитком системної аварії. Таким чином, можна зробити висновок, що основною задачею нормалізації режимів електричних мереж є забезпечення їх функціонування у певних межах безпечного відхилення параметрів усталеного режиму від базових значень.

Сучасні електроенергетичні системи високотехнологічні та мають багаторівневу ієрархічну структуру. У багатьох випадках для нормалізації режиму необхідним є не просте підвищення ефективності традиційних засобів керування, але використання принципово нових спеціальних технічних засобів. Так, при введенні в дію нових ліній електропередачі високої напруги виникає новий паралельний шлях для протікання електроенергії через мережі вищого рівня ієрархії, тобто мережі починають працювати паралельно. Відомо, що природний режим у таких мережах буде аномальним як за великими втратами потужності, так і за можливим виходом обладнання з ладу через перенавантаження [4]. Традиційним вирішенням проблеми є розмикання шляху проходження електроенергії через мережу нижчого рівня ієрархії електроенергетичної системи і припинення паралельної роботи. Але при цьому знижуються надійність транспортування та показники якості електроенергії. В той же час застосування спеціальних технічних засобів нормалізації вимагає попереднього аналізу на основі результатів моделювання аномальних режимів.

Однією з найбільш часто використовуваних на практиці абстрактних математичних моделей є теоретико-множинна модель технічної системи: базовий формальний опис об'єкта і його елементів. Для електричної мережі така модель складається з рівнянь, що описують фізичні процеси в мережі, тобто встановлюють зв'язок між параметрами елементів та параметрами режиму. В загальному випадку вони не містять опису структури зв'язків, тому при структурних

змінах теоретико-множинна модель кожного разу має бути сформована заново. Одночасно моделювання структури пов'язано з алгебраїчною топологією, в якій не використовують поняття метрики, тобто не розглядають фізичні параметри елементів. Таким чином, теоретико-множинна модель описує процеси, але не структуру, а методи алгебраїчної топології описують структуру, але не процеси складних систем. Принципи системного підходу до моделювання та аналізу аномальних режимів передбачають застосування універсального методу, який дає змогу об'єднати теоретико-множинну та структурну моделі в узагальненій моделі електричної мережі. Таким є тензорний метод дослідження складних систем Крона [5].

Для моделювання складних систем за допомогою тензорів застосовується й розвивається поняття мережі, яке належить не лише до конкретного фізичного об'єкта, а й є узагальненою математичною моделлю системи як єдності структур і процесів. З'єднані елементи утворюють у системі ланцюги – послідовність вузлів та гілок мережі, всі гілки в якій відрізняються одна від одної. Базиси ланцюгів у мережі розділені на два підпростори залежно від характеру ланцюгів. Якщо кінцевий вузол ланцюга збігається з початковим, то він замкнений, інакше – розімкнений. Замкнені ланцюги в теорії електричних кіл зазвичай називають контурами. Але для єдності у визначеннях надалі вживаються такі терміни – замкнений та розімкнений ланцюги. Це видається більш логічним, ніж вживання термінів замкнений та розімкнений контури [6], оскільки контур за загальноприйнятою в електротехніці термінологією завжди замкнений. Замкнені й розімкнені ланцюги в мережі відіграють роль координат.

При описі математичних моделей електричних мереж у цій роботі застосована модифікована індексна система позначень [6]. Зокрема, коваріантні й контраваріантні тензори відзначаються відповідно нижніми й верхніми індексами, що вказують на систему координат: b – елементарна; s – ортогональна; c – осі координат, пов'язані з замкненими ланцюгами; o – осі координат, пов'язані з розімкненими ланцюгами. Вектори внутрішніх параметрів режиму для гілок: J – струм гілки; V – падіння напруги на опорі гілки; I – струм джерела струму, приєднаного до гілки; E – напруга на кінцях гілки; C – тензор перетворення в елементарну систему координат. Вектори зовнішніх впливів на гілку: i – струм розімкненого ланцюга, e – електрорушійна сила (ЕРС) у замкненому ланцюзі. Точка перед індексом показує, що він належить до стовпців матриці компонентів тензора. Всі вектори комплексні, оскільки розглядаються кола змінного синусоїдального струму.

Фундаментальне значення для поняття узагальненої моделі електричної мережі має інваріант перетворення структури. Його математичний зміст полягає у сталості суми метричних тензорів двох мереж із дуальною структурою, в яких базиси підпросторів замкнених і розімкнених ланцюгів взаємно доповнюють один одного до повного простору. Фізичний зміст інваріанта полягає у сталості потужності, що розсіюється, в двох електричних мережах із дуальною структурою при зміні з'єднання гілок. Дуальний інваріант є основою для виконання аналізу режиму мережі, що передбачає перетворення реальної структури до елементарної системи координат.

Виходячи з принципів системного підходу, електроенергетичну систему можна представити сукупністю мереж, які утворюють певні ієрархічні рівні для потоків енергії. При цьому потік потрапляє через границю в розімкнені ланцюги мережі, проходить крізь неї, викликаючи реакцію в замкнених ланцюгах, і виходить на іншу мережу знову через зв'язки розімкнених ланцюгів. Взагалі розподіл потоків енергії між мережами пов'язаний із проявом в електротехніці принципу найменшої дії – універсального принципу руху матерії. В електротехніці принцип найменшої дії реалізується в законах Кірхгофа [3]. Через них загальний принцип руху матерії зв'язує процеси й структуру в електричній мережі. Тому при природному струморозподілі розсіювання потужності при транспортуванні, тобто втрати, буде найменшим. Але при представленні синусоїдального змінного струму в комплексній формі цей висновок є справедливим тільки для повної потужності. В той же час втрати активної потужності будуть мінімальними при реалізації принципу найменшої дії в схемі з активних опорів, а реактивної – в схемі тільки з реактивних опорів. Глобальний мінімум може бути при потоках енергії в повністю однорідній електричній мережі, коли принцип найменшої дії реалізується одночасно для обох часткових схем, умовою чого є однорідність співвідношення між значеннями їх опорів. На практиці ступінь однорідності визначається в основному ступенем розходження перетинів

проводів ліній. Дослідження показують, що природний струморозподіл значно (в 1,4–1,5 разу) поступається нормальному за величиною втрат, створює перевантаження мереж більш низької напруги неадекватними для них транспортними потоками енергії, чим зменшує пропускну здатність всієї електроенергетичної системи.

Для того щоб вказати, яка схема була прийнята при моделюванні, використаємо додаткові індекси: z – вказує на схему з імпедансами; r – на схему з активними елементами; x – на схему з реактивними. Аналіз режимів за допомогою тензорної моделі складається з інваріантних перетворень реальних схем до елементарної, значення параметрів режиму якої відповідає напругам та струмам у кожному з елементів мережі [1]: ${}_z J^b = C_{.o z}^b I^o + C_{.c z}^b J^c$.

Зазвичай інтерес становлять втрати енергії, які найбільш повно характеризує саме активна потужність, тому розглядаємо r -схему. Знайдемо падіння напруги на гілках: ${}_r V_b = R_{bb} C_{.o}^b I^o + R_{bb} C_{.c r}^b J^c$. Помножимо обидві частини на субматрицю тензора перетворень C_c^b : $C_c^b {}_r V_b = C_c^b R_{bb} C_{.o}^b I^o + C_c^b R_{bb} C_{.c r}^b J^c$.

Введемо позначення $R_{co} = C_c^b R_{bb} C_{.o}^b$, $R_{cc} = C_c^b R_{bb} C_{.o}^b$, де R_{co} – тензор взаємних активних опорів замкнених і розімкнених контурів; R_{cc} – тензор контурних активних опорів.

Передбачається врівноваженість контурних ЕРС: $C_c^b {}_r V_b = 0$, $R_{co} I^o + R_{cc} {}_r J^c = 0$.

Помножимо останній вираз зліва на $(R_{cc})^{-1}$ і отримаємо ${}_r J^c = -(R_{cc})^{-1} R_{co} I^o$.

Для нормалізації режиму струморозподіл в z -схемі має збігатися з струморозподілом в r -схемі. Порівнюючи відповідні вирази, можна зробити висновок, що це буде тоді і тільки тоді, коли ${}_z J^c = {}_r J^c$. Забезпечити цю умову можна введенням додаткового збудження в замкнені ланцюги, тобто за рахунок внутрішніх ЕРС електричної мережі, які нормалізують режим, – ЕРС нормалізації.

Для визначення значень ЕРС нормалізації режиму в неоднорідній електричній мережі запишемо тензор падінь напруги гілок мережі для нормального режиму в z -схемі: ${}_z V_b = Z_{bb} C_{.o}^b I^o + Z_{bb} C_{.c z}^b J^c$. Помножимо обидві частини рівняння на субматрицю тензора перетворень C_c^b : $C_c^b {}_z V_b = C_c^b Z_{bb} C_{.o}^b I^o + C_c^b Z_{bb} C_{.c z}^b J^c$.

Введемо позначення: $Z_{co} = C_c^b Z_{bb} C_{.o}^b$, $Z_{cc} = C_c^b Z_{bb} C_{.o}^b$, де Z_{co} – тензор взаємних імпедансів замкнених і розімкнених контурів; Z_{cc} – тензор контурних імпедансів. Тоді $C_c^b {}_z V_b = Z_{co} I^o + Z_{cc} {}_z J^c$. Для того щоб при економічному струморозподілі в z -схемі виконувався 2-й закон Кірхгофа, треба щоб введені в замкнені ланцюги ЕРС компенсували падіння напруги в гілках: $e_c = C_c^b {}_z V_b$.

Таким чином, значення ЕРС нормалізації має вид $e_c = Z_{co} I^o + Z_{cc} {}_z J^c$, або після підстановки значення ${}_z J^c = e_c = Z_{co} I^o - Z_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co} I^o$. Якщо винести тензор струмів розімкнених ланцюгів за дужки, можна одержати $e_c = (Z_{co} - Z_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co}) I^o$.

Введемо позначення $X_{co} = C_c^b X_{bb} C_{.o}^b$; $X_{cc} = C_c^b X_{bb} C_{.o}^b$ та перетворимо вираз у дужках, замінивши тензори з комплексними елементами мультитензорами з дійсними елементами:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} R_{co} & -X_{co} \\ X_{co} & R_{co} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{cc} & -X_{cc} \\ X_{cc} & R_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (R_{cc})^{-1} & 0_{cc} \\ 0_{cc} & (R_{cc})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{co} & 0_{co} \\ 0_{co} & R_{co} \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} R_{co} & -X_{co} \\ X_{co} & R_{co} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{co} & -X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co} \\ X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co} & R_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{co} & -X_{co} + X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co} \\ X_{co} - X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co} & 0_{co} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Як можна бачити, вираз не містить дійсної частини. При переході назад до комплексних елементів отримаємо $e_c = j(X_{co} - X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co}) I^o$. Очевидно, що коли $e_c = 0$, то струморозподіл буде нормальним незалежно від струмів у розімкнених ланцюгах: $X_{co} = X_{cc} (R_{cc})^{-1} R_{co}$.

Якщо помножити обидві частини рівняння на $(X_{cc})^{-1}$, то можна отримати умову існування нормального режиму в цій мережі незалежно від навантажень: $(X_{cc})^{-1} X_{co} = (R_{cc})^{-1} R_{co}$. Оскільки тензори опорів R_{oo} та X_{oo} до виразів не входять, то гілки, які входять тільки до розімкнених ланцюгів, при визначенні ЕРС нормалізації можуть не враховуватись. Символ j перед дужкою означає, що активний струморозподіл визначає поперечну складову ЕРС нормалізації.

Використання узагальненої тензорної моделі електроенергетичної системи дає змогу не тільки визначити необхідність застосування пристроїв для нормалізації режимів електричних мереж, що працюють паралельно, але й оцінити їх ефективність та обрати оптимальні значення параметрів. Слід зазначити, що на відміну від традиційного використання при моделюванні вузлових методів [2], коли зміна втрат розглядається як результат зміни зовнішніх впливів на мережу через розімкнені ланцюги, отримані ЕРС характеризують властивість структури саме цієї мережі та компенсацію її реакції на задані вузлові навантаження шляхом введення внутрішнього впливу на замкнені ланцюги без зміни зовнішніх навантажень.

Методи та засоби введення у замкнені ланцюги реальної електричної мережі ЕРС нормалізації залежать від умов її функціонування та особливостей побудови. Результатом подальших досліджень мають бути рекомендації з практичної реалізації та налаштування пристроїв коригування аномальних режимів.

1. Карасев Д.Д. Системы тензорных уравнений электрических сетей и электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 332 с.
2. Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Оптимальное керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.
3. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребський В.В. Принцип найменшої дії в задачах оптимізації електроенергетичних систем // Техн. електродинаміка: Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 3. – С. 35–41.
4. Тугай Ю.І. Аномальні режими електричних мереж та їх оптимізація // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16). – С. 63–64.
5. Gabriel Kron and System Theory. /Ed. by H.H. Happ, N. Y., Schenectady: Union College Press, 1973. – 186 p.
6. Happ H.H. Piecewise Methods and Applications to Power Systems. N.-Y., Wiley, 1980. – 405 p.

УДК 621.311.13

Ю.І. Тугай, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Нормализация режимов электрических сетей при параллельной работе

Современная электроэнергетическая система может рассматриваться как совокупность сетей разного номинального напряжения и функционального назначения, которые образуют определенные иерархические уровни для параллельного транспортирования потоков энергии. Целью данной работы является исследование процессов в таких сетях и определение средств коррекции режимов, поскольку обычно естественный режим в такой системе является аномальным с перегруженными линиями электропередачи и высоким уровнем потерь энергии. Но вынужденный отказ от параллельной работы сетей различного уровня путем размыкания сетей низшего иерархического уровня, который применяется сейчас на практике, не является наилучшим решением проблемы, поскольку влечет за собой снижение надежности транспортирования электроэнергии и ухудшение ее качества. Анализ возможных мероприятий по нормализации режима целесообразно выполнять с помощью математических моделей электрических сетей. Следует отметить, что традиционное использование математической теории графов при создании моделей структуры электрических сетей не является вполне адекватным, поскольку не воспроизводит материальное воплощение пассивных схем замещения и физические свойства элементов. В то же время тензорный подход к анализу режимов электрических сетей дал возможность разработать метод определения ЭДС нормализации. Следует отметить использование контурной модели сети, которая позволяет определить необходимое корректирующее воздействие на внутренние параметры режима электрической сети, а не на внешние, как до этого времени было принято в узловой модели. Предложенный метод более прост и эффективен при практической реализации. Библ. 6.

Ключевые слова: электрическая сеть, тензорная модель электрической сети, режим электрической сети, параллельная работа, нормализация режима электрической сети.

Yu.I. Tugay,

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The normalization of electric networks for parallel operation

The ensembles of networks are used in the up-to-date power transmission systems, because they allow increasing reliability and stability of work. However, parallel work networks with transmission lines of different voltages and constructions causes to occurrence of such factor as heterogeneity of a network. If the ratio between reactance and resistance is identical for all branches of electrical networks, these networks may be called homogeneous ones. A network, which is building with cables of the same mark or overhead transmission lines with the same type of wire and design, is quite homogeneous. Obviously, all-existing or future electrical networks are non-homogeneous ones. The heterogeneity is accompanied by lots of negative consequences: increasing level of energy losses, decreasing of power quality and overloading of transmission lines. Therefore, decreasing of heterogeneity is one of the most significant goals of network optimization. The paper presents the analysis of abnormal steady states in the heterogeneous parallel electrical networks. The correction of a load flow for approaching it to load flow in a homogeneous network is the solution of problem. The equilibrating electromotive forces must be applied to closed loops of an electrical network for load flow normalizing. The equilibrating voltage value can be found from the condition of coincidence current flow in a homogeneous electrical network (this current flow is called "economic", as it is accompanied by minimum of energy losses) with natural current flow in r -circuit of the network (it is the circuit, in which longitudinal elements consist of only resistances). The tensors analysis of networks is the most preferable for the obtaining of loop model. This theory allows deriving expressions in the most compact and generalized forms, and expands the results of studying some single system for all systems. It should be noted the use of the loop network model, which allows to determine the necessary corrective influence on the internal parameters of electric network, not on the outside, as it was taken for the nodal model. The proposed method is more simple and effective in practice. References 6.

Key words: electrical network, tensor model of the electrical network, homogeneous electric network, parallel operation, normalization of steady state.

Надійшла 4.02.2015

Received 4.02.2015

УДК 621.316

ЗМЕНШЕННЯ ЧАСУ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДИКАТОРІВ ПОШКОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

О.Ю. Бець, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Запропоновано спосіб зменшення часу відновлення електропостачання споживачів за рахунок використання індикаторів пошкодження повітряних ліній електропередачі з урахуванням впливу місця встановлення таких індикаторів у мережі. На прикладі схеми мережі 110 кВ показано ефективність запропонованого способу на основі аналізу звітних для енергопостачальних компаній України показників надійності електропостачання за відсутності та при встановленні оптимальної кількості індикаторів пошкоджень. На основі проведених досліджень визначено цільову функцію та систему обмежень, що дають змогу оптимізувати кількість індикаторів пошкоджень у мережі з урахуванням вигоди від зменшення розрахункового обсягу недовідпущеної електроенергії споживачам і витрат на встановлення та використання таких пристроїв. Бібл. 6, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова: SAIDI, ENS, індикатори пошкодження, час відновлення енергопостачання споживачів.

Значна кількість пошкоджень, що виникають на лініях електропередачі та призводять до порушення функціонування роботи електроенергетичних мереж, впливає на надійність електропостачання споживачів. Тому необхідність швидкого та точного визначення місця пошкодження повітряної лінії (ПЛ) скоротить перерви у електропостачанні, зменшить транспортні витрати на обхід ПЛ та мінімізує загальний час організації ремонтно-відновлюваних робіт. Причому особливої актуальності задача пошуку пошкодженої ділянки набуває у розподільних електричних мережах 6...110 кВ, які характеризуються як наявністю кількох фідерів на шинах підстанції, так і великою кількістю розгалужень на самих ЛЕП, зокрема 6...35 кВ.

Для контролювання ефективності роботи систем енергопостачання в Україні Національною компанією розподілення енергії (НКРЕ) [1] введені поняття індексів показників надійності. Значення цих індексів відображають роботу електроенергетичних мереж та впливають на загальну роботу енергосистеми України. Для підвищення ефективності моніторингу стану розподі-