

В. О. Гурєєв, к. т. н.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ І ПРОГРАМ ШВИДКОДІЙНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕЛИКИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ (ЕЕС) І ЕНЕРГООБ'ЄДНАНЬ (ЕО) ДЛЯ ТРЕНАЖЕРІВ

Розглянуто актуальні питання розробки алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих енергосистем (ЕЕС) і енергооб'єднань (ЕО) для використання в дистанційних режимних тренажерах персоналу підстанцій і ЕЕС. Для розрахунку режимів використано сучасні віртуальні технології й розподілене середовище моделювання. Наведено наочний приклад використання розробленого тренажера для тренажерної підготовки персоналу.

Ключові слова: енергосистеми й енергооб'єднання, алгоритми розрахунку режимів, дистанційні повнофункціональні тренажери.

Вступ

Сучасна електроенергетична система представляє складну людино-машинну систему. Для подібних систем стійке формування, підтримку і розвиток найважливіших (ключових) компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу великих ЕЕС і ЕО можна забезпечити переважно шляхом широкого використання режимних тренажерів [1].

До найважливіших (ключових) належать компетентності, пов'язані з оперативними перемиканнями в нормальних і аварійних режимах, розпізнавання умов виникнення й ліквідації аварій. Формування, контроль і підтримка цих компетентностей у персоналу є найголовнішими цілями роботи з персоналом.

Досягти цих цілей без використання режимних тренажерів у сучасних умовах практично неможливо.

Підтримка й розвиток у персоналу ефективних навичок і способів швидкої ліквідації умов виникнення й розвитку різноманітних аварій зумовлює необхідність удосконалення методик і технологій навчання.

Недостатній рівень кваліфікації персоналу й відсутність готовності швидкої ліквідації аварій призводить до великих системних і міжсистемних аварій, які супроводжуються значними матеріальними втратами й фінансовими витратами, тому для організації ефективної тренажерної підготовки важливо мати можливість цілодобового дистанційного доступу до бази протиаварійних тренувань, забезпечених навчально-методичною базою і якісними робочими програмами підвищення кваліфікації.

У роботі пропонуємо застосувати сучасні електронні (e-learning) технології навчання в енергетиці, що ґрунтуються на нових досягненнях у цій царині, які дозволять забезпечити підтримку необхідних навичок персоналу й високу якість підготовки на робочих місцях і в тренажерних пунктах і центрах.

Найперспективнішими методами навчання і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу нині в усіх економічно розвинених країнах світу визнані дистанційні навчальні й режимні тренажерні засоби, обов'язкові до використання і здатні адекватно моделювати нормальні й аварійні режими роботи ЕЕС і ЕО в реальному часі [2, 3].

Накопичений досвід експлуатації повномасштабних зарубіжних режимних тренажерів показав, що важливими умовами забезпечення повноцінної роботи з оперативно-диспетчерським персоналом є створення загального розподіленого інформаційного середовища моделювання ЕЕС і/або ЕО і застосування найбільш швидкодійних алгоритмів

розрахунку режимних параметрів.

Сучасні повнофункціональні режимні тренажери, використовувані для тренажерної підготовки в більшості розвинених країн, як правило, забезпечують комфортний час реакції на дії диспетчерів, які навчаються.

Найкомфортнішим часом реакції на різні збурювальні дії в модельованих великих ЕЕС і/або ЕО прийнято вважати час до 2 секунд, що дозволяє оперативно-диспетчерському персоналу приймати адекватні й ефективні управлінські рішення.

Ця вимога до моделювальної системи для великих ЕЕС і ЕО забезпечити комфортний час реакції зумовлює необхідність пошуку, дослідження та розробки нових алгоритмів розрахунку режимів для тренажерів.

Стаття присвячена аналізу, дослідженню й розробці найбільш швидкодіючих алгоритмів розрахунку режимів роботи великих ЕЕС і ЕО, придатних для використання в режимних тренажерах.

Пропоновані алгоритми також дозволяють здійснювати короткотермінові й довготермінові прогнози розрахунки нормальних і аварійних режимів роботи великих ЕЕС і ЕО в темпі виробництва, що сприяє формуванню в диспетчерського персоналу стійких навичок максимально швидкої і адекватної реакції на різні порушення режимів.

Використання таких алгоритмів у складі дистанційних режимних тренажерів дозволить значно підвищити якість і ефективність навчання персоналу ЕЕС України.

Режим роботи будь-якої електричної мережі (чи її частини) може бути описаний системою рівнянь із використанням відомих [4] виразів для кожного i -го вузла.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_{s-1} \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dots & \dot{Y}_{1(s-1)} & \dot{Y}_{1s} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dots & \dot{Y}_{2(s-1)} & \dot{Y}_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{Y}_{(s-1)1} & \dot{Y}_{(s-1)2} & \dots & \dot{Y}_{(s-1)(s-1)} & \dot{Y}_{(s-1)s} \\ \dot{Y}_{s1} & \dot{Y}_{s2} & \dots & \dot{Y}_{s(s-1)} & \dot{Y}_{ss} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dots \\ \dot{I}_{s-1} \\ \dot{I}_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $[\dot{U}_s]$ – вектор-стовпець шуканої фазної напруги вузлів; $[\dot{Y}_{ss}]^{-1}$ – зворотна матриця вузлової провідності електричної мережі; $[\dot{I}_s]$ – вектор-стовпець заданих (відомих) струмів вузлів.

Відомо, що матриця вузлової провідності $[\dot{Y}_{ss}]$ у загальному вигляді є особливою і зворотної матриці не має. Для розв'язання (1) необхідно викреслити хоча б один рядок для опорного вузла з відомою (заданою) напругою й перенести відповідний вектор-стовпець у праву частину рівняння.

У матричному виді систему рівнянь (1) можна записати так:

$$[\dot{U}_s] = [\dot{Y}_{ss}]^{-1} \cdot [\dot{I}_s] \quad (2)$$

Якщо відомі або задані потужності вузлів, то формулу (2) можна переписати у вигляді скалярного добутку вектора струмів вузлів $[\dot{I}_s]$ на зв'язаний вектор напруги вузлів $[\hat{U}_s]$:

$$[\dot{S}_s] = ([\mathcal{C}_s] [\dot{I}_s]), \quad (3)$$

де $[\dot{S}_s]$ – вектор-стовпець заданих потужностей вузлів.

Існує велика кількість досліджень і публікацій [5, 6, 7], присвячених проблемі розв'язання систем нелінійних рівнянь (3), тому обмежимося коротким описом їх основних властивостей. Елементи матриці вузлової провідності $[\dot{Y}_{ss}]$ і вектор заданих потужностей

вузлів $[\dot{S}_s]$ у таких завданнях є відомими величинами, а $[\dot{U}_s]$ – невідомими. У результаті розв’язання системи нелінійних рівнянь (3) обчислюємо шукану напругу вузлів мережі $[\dot{U}_s]$. Сьогодні як основні методи розрахунку режиму використовують методи Ньютона-Рафсона, Гаусса, Зейделя та ін. [8, 9, 10]. Отже, розрахунок режиму роботи довільної електричної мережі із заданими навантаженнями і конфігурацією полягає у визначенні вектора напруги вузлів $[\dot{U}_s]$. Недоліком таких методів розрахунку є значний час розрахунку режимів великих ЕЕС і/або ЕО, включаючи повну відсутність гарантії збіжності ітераційних розрахунків, що абсолютно неприйнятно для використання в дистанційних режимних тренажерах.

Для розв’язання системи (3) у роботі використано алгоритм багатоопорного методу розрахунку контурних струмів (БМРКТ), що відрізняється від відомих обліком вироджених (ненульових) контурів, що утворюються між джерелами енергії і/або ЕЕС і ЕО. Уся мережа представлена окремими деревами з хордами, що утворюють під час їхнього увімкнення повні або вироджені контури. Швидкість розрахунку режиму цим методом для мереж об’ємом до 1000 вузлів є меншою за 1 секунду, що цілком виправдано для його використання в режимних тренажерах.

Пропонований алгоритм розрахунку режимів у складі режимних тренажерів будь-якої ЕЕС і/або ЕО використовує три основні набори початкових даних у вигляді таблиць з інформацією про параметри вузлів, гілок і загальної інформації про електричну мережу. Ці набори обов’язково містять вузли й гілки, енергосистем, що працюють паралельно. Отже, у кожному наборі початкових даних наявні однакові вузли й гілки. У результаті розрахунку режиму однієї з ЕЕС, що працюють паралельно, значення напруги граничних вузлів (струми прилеглих гілок) першої ЕЕС використовують для розрахунків параметрів режиму другої ЕЕС. Будь-які зміни параметрів схеми або режиму окремої ЕЕС автоматично (за допомогою системи тригерів) запускають у роботу програми розрахунку режиму прилеглих ЕЕС, що працюють паралельно, початкові дані про які розташовані в розподіленому віртуальному моделювальному середовищі на стороні серверів баз даних (БД) зі вбудованими програмами розрахунку режиму. Це значно зменшує час розрахунку режимів роботи ЕЕС. Розроблена система тригерів забезпечує стійке врівноваження режиму роботи всіх ЕЕС і/або ЕО, що працюють паралельно, за короткий час, витрачаючи, як правило, 3 – 4 ітерації зовнішнього ітераційного процесу.

Алгоритм працює так.

Задану або відому напругу вузлів схеми використовують для визначення поточних значень струмів вузлів з урахуванням струмів хорд, що дозволяє представити початкову замкнуту схему в розімкненому вигляді. Струми хорд, що ітеруються в такій схемі, додані до струмів вузлів. Напруга вузлів може бути знайдена шляхом розв’язання системи лінійних рівнянь (1), що описують режим роботи довільної електричної мережі відносно напруги вузлів, або шляхом багатократного (не більше 5 – 7 ітерацій) розрахунку поточного розподілу з подальшим розрахунком нового режиму напруги вузлів. Для нових значень напруги кожного разу обчислюють струми хорд. Струми контурів ітерують доти, доки нев’язка напруги в них не стане меншою за наперед задану величину, що дозволяє повернути схему до початкового замкнутого виду. Для замкнутої схеми уточнюють нові значення струмів вузлів і повторюють внутрішній цикл ітерації струмів хорд. Розрахунки режимів закінчують у разі, коли нові значення напруги вузлів або потужностей вузлів від ітерації до ітерації вже сильно не змінюються.

Приклад фрагмента інтерфейсу навчального дистанційного тренажера наведений на рис. 1. У браузері користувача представлені результати розрахунку напруги вузлів, перетікання потужностей (блакитний колір), струм лінії електропередачі й частота (жовтий) для поточного збурення, зумовленого накиданням навантаження.

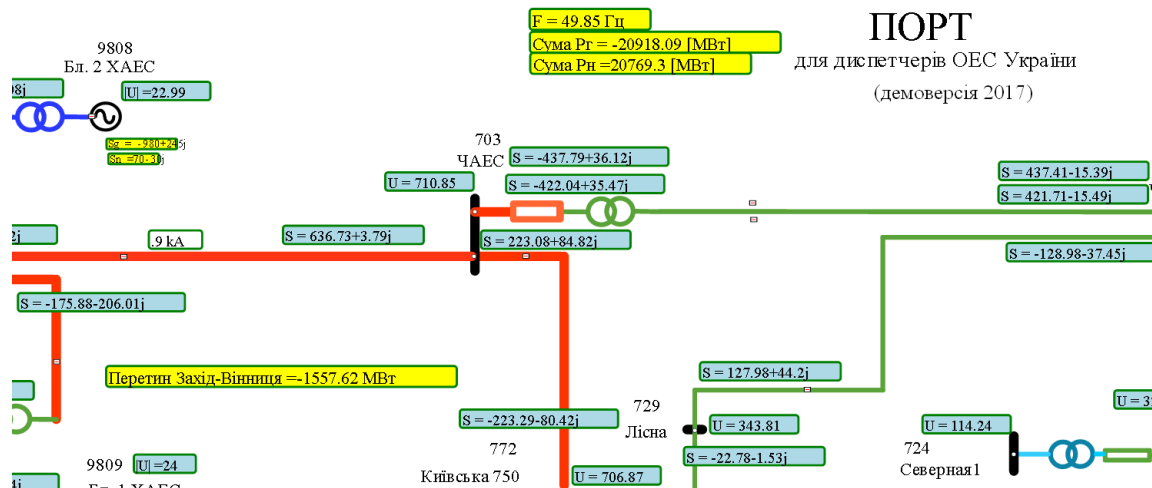


Рис. 1. Фрагмент інтерфейсу дистанційного тренажера для персоналу, що навчається

Висновки

1. Розроблений і реалізований алгоритм швидкодіючого багатоопорного методу розрахунку режимів роботи великих ЕЕС і/або ЕО для використання в дистанційних режимних веб орієнтованих тренажерах. Відповідна програма розрахунку апробована на прикладі ОЕС України і призначена для роботи в базах даних типу ORACLE або PostGreSQL у вигляді спеціальної вбудованої функції на стороні сервера.

2. Розроблений швидкодіючий метод розрахунку гарантує комфортний час реакції режимного тренажера на дії диспетчерів, що навчаються та керують. Програму використовують у повнофункціональному режимному тренажері ПОРТ для персоналу підстанцій і диспетчерів ЕЕС і ОЕС України.

3. Запропонований метод розрахунку дозволяє виконувати також перехідні електромеханічні розрахунки й може бути рекомендований для створення різних сценаріїв протиаварійних тренувань оперативно-диспетчерського персоналу ЕЕС і/або ЕО.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gurieiev V. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems / V. Gurieiev, O. Sanginova // 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS'2016), June 7 – 11, Kyiv, Ukraine. – 2016. – P. 97 – 100.
2. Operator/Dispatcher Training Simulator (DTS/OTS) [Електронний ресурс] / Фірма General Electric. – Режим доступу: <https://www.gegridsolutions.com/uos/Training/OperatorDispatcherTrainingSimulator.htm>.
3. Гуреев В. А. Распределенная среда моделирования режимов в полнофункциональном режимном тренажере (ПОРТ) для энергосистем Украины / В. А. Гуреев, О. В. Сангинова // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 67 – 69.
4. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) : учебное пособие для вузов / В. Г. Холмский. – М. : Высшая школа, 1975. – 280 с.
5. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем / Дж. Ортега ; пер. Х. Д. Икрамова, И. Е. Капорина. – М. : Мир, 1991. – 367 с.
6. Jianwei Wu Simple technique to determine the Givens-Rotation matrix in the two-source ICA problem for skewed sources / Wu Jianwei // IEEE Electronic Letters. – 2016. – Vol. 52, № 8. – P. 613 – 615.
7. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / [Аюев Б. И., Давыдов В. В., Ерохин П. М., Неуймин В. Г.]; под ред. П. И. Бартоломея. – М. : Флинта: Наука, 2008. – 256 с.
8. Шабад В. К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие [для студ. учреждений высш. проф. образования] / В. К. Шабад. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с.

9. Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies / O. A. Afolabi, W. H. Ali, P. Cofie [et al] // Energy and Power Engineering. – 2015. – Vol.7, № 10, – P. 509 – 523.

10. Писсанецки С. Технология разреженных матриц / С. Писсанецки. – М. : Мир, 1988. – 410 с.

Рекомендована IV Міжнародною науково-технічною конференцією «Оптимальне керування електроустановками» (ОКЕУ-2017).

Стаття надійшла до редакції 04.12.2017 р.

Стаття пройшла рецензування 06.02.2018 р.

Гурєєв Віктор Олександрович – к. т. н., докторант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, e-mail: viktor.gurieiev@infotec.ua.

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова.