

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ДЖЕРЕЛАМИ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто особливості моделювання перехідних процесів у гібридних енергосистемах із джерелами різної природи. Показано вплив динамічних характеристик інверторних модулів та синхронних генераторів на формування електромагнітних та електромеханічних відхилень. Наведені результати моделювання демонструють важливість узгодження алгоритмів керування для забезпечення стабільності та якості електроенергії.

Ключові слова: гібридна енергосистема, перехідні процеси, інверторні джерела, синхронний генератор, моделювання.

Abstract

The paper examines the modelling of transient processes in hybrid power systems that combine sources of different nature. The study highlights the influence of inverter and synchronous generator dynamics on electromagnetic and electromechanical disturbances. Simulation results emphasize the importance of coordinated control strategies to maintain system stability and power quality.

Keywords: hybrid power system, transient processes, inverter-based generation, synchronous generator, modelling.

Дослідження

Гібридні енергосистеми сьогодні становлять один із найперспективніших напрямів розвитку електроенергетики, оскільки забезпечують поєднання різних типів генерації та створюють умови для підвищення гнучкості й надійності енергопостачання [1]. Функціонування таких систем базується на взаємодії джерел, що мають суттєво відмінні фізичні властивості: синхронних генераторів, інверторних модулів, відновлюваних джерел та акумулюючих пристроїв. Ця різноманітність визначає складний характер перехідних процесів, що виникають як під дією зовнішніх збурень, так і у процесі зміни режимів роботи окремих елементів.

Перехідні процеси в гібридних комплексах суттєво відрізняються від аналогічних процесів у традиційних енергосистемах. У класичних мережах динаміка переважно визначається електромагнітними та електромеханічними параметрами синхронних машин, для яких розроблені усталені математичні моделі. Натомість інверторні джерела реагують на збурення значно швидше, а їх поведінка зумовлена структурою регуляторів, алгоритмами керування і частотою комутації силових ключів. [2] Тому у гібридних системах важливо правильно відтворити взаємний вплив цих компонентів, що можливо лише за умови застосування узгоджених моделей.

У проаналізованому мною дослідженні автори зосереджуються на створенні такої математичної моделі гібридної енергосистеми, яка б одночасно враховувала інерційність синхронної машини, високошвидкісні властивості інверторного джерела та потужнісні обмеження системи накопичення енергії. На відміну від традиційних підходів, у яких інвертор часто подається у вигляді лінеаризованого керованого джерела, у роботі використано комбінований підхід. Зокрема, електромагнітні рівняння синхронної машини в dq -координатах поєднані з дискретною моделлю цифрового регулятора інвертора, що дозволило суттєво підвищити точність відтворення реальних процесів [1].

Основу моделі синхронного генератора становить система диференціальних рівнянь четвертого порядку, яка описує зміну потокозчеплень і електромагнітного моменту в осях d та q . Додатково враховано модель регулятора збудження з урахуванням обмежень по струму ротора, завдяки чому вдалося адекватно відобразити реакцію генератора на різкі зміни навантаження [3]. Інверторне джерело в роботі описується через двоконтурну систему керування — струмовий та потужнісний контури із застосуванням широтно-імпульсної модуляції. Реалізація регулятора у вигляді різницевого

рівнянь з частотою дискретизації 10–20 кГц забезпечила відтворення динаміки, близької до реальних фізичних процесів [2].

Система накопичення енергії подана у вигляді узагальненої моделі двонаправленого перетворювача, який працює у режимі стабілізації потужності. Його поведінка визначається рівняннями балансу енергії та обмеженнями по максимальному струму. Впроваджена модель дозволяє чітко розмежувати статичні та динамічні режими, що є критично важливим при аналізі швидкоплинних перехідних процесів.

У межах числового моделювання науковці виконали серію експериментів із збуреннями різного типу. Найбільш інформативними виявилися режими раптового зростання активного навантаження та короткочасного провалу напруги, оскільки саме вони найкраще демонструють характер взаємодії елементів різної фізичної природи. Показано, що при стрибкоподібному зростанні навантаження синхронний генератор реагує збільшенням електромагнітного моменту з характерною затримкою, обумовленою інерційністю ротора та особливостями роботи регулятора збудження [3]. Водночас інверторне джерело здійснює практично миттєву компенсацію дефіциту активної потужності за рахунок максимально швидкодіючого струмового контуру [2]. Накладання цих процесів різного часового масштабу призводить до короткочасної розсинхронізації, що проявляється у невеликому фазовому відставанні струму інвертора від напруги.

Окремо відзначено, що величина фазового зсуву істотно залежить від налаштувань струмового регулятора. Для надмірно «жорстких» параметрів характерна поява паразитних коливань у діапазоні 150–300 Гц, які загалом не змінюють усталеного режиму, проте можуть негативно впливати на роботу чутливого електротехнічного обладнання [2]. Ослаблення параметрів контуру дозволяє усунути ці коливання, однак супроводжується збільшенням тривалості перехідного процесу приблизно на 20–25 %. Таким чином, автори знаходять компроміс між швидкодією та ефективністю демпфування.

Значну увагу в роботі приділено порівнянню результатів, отриманих за допомогою повної нелінійної моделі, зі спрощеною моделлю, що базується на припущенні квазісталого режиму інвертора [3]. Показано, що спрощений підхід забезпечує прийнятну точність лише за повільних змін навантаження. У випадку швидких збурень розбіжність між моделями сягає 40–55 %, що вказує на принципову обмеженість таких методів при аналізі гібридних енергетичних систем [1].

Узагальнюючи результати, автори дослідження роблять низку важливих висновків. По-перше, узгодженість роботи регуляторів інвертора та синхронного генератора є ключовим чинником стійкості перехідних режимів. По-друге, ефективність систем накопичення енергії суттєво знижується за наявності жорстких струмових обмежень або недостатньої енергоємності. По-третє, параметри дискретизації цифрових регуляторів значною мірою визначають форму перехідних процесів, особливо в умовах швидких змін режимів. По-четверте, спрощені методики моделювання не забезпечують достовірного відображення поведінки гібридних комплексів і не можуть використовуватися для коректного вибору параметрів регуляторів.

Загалом результати, наведені в проаналізованій роботі, підтверджують доцільність застосування повних нелінійних моделей для дослідження перехідних процесів у гібридних енергосистемах. Автори переконливо демонструють, що сучасні структури з високою часткою інверторної генерації потребують перегляду традиційних підходів до математичного моделювання, оскільки лише детальний опис дає змогу своєчасно виявляти потенційно нестійкі режими та оптимізувати взаємодію різномірних джерел ще на етапі проєктування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стаднік М. І., Проценко Д. П., Бабій С. М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / “Вісник ВПІ” (ВНТУ). Серія: Технічні науки, енергетика. № 4, 2020, с. 32–41. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2512>
2. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання низькочастотних перехідних процесів електричних систем / Репозитарій ЛНУ. Серія: Енергетика і електротехніка, 2020. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/93fa6783-0fff-4bcf-ab6f-47bee3b8c324>
3. Лежнюк П. Д., Бурикін О. Б., Лесько В. О. Чутливість втрат потужності в електроенергетичних системах до зміни транзитних перетікань / Наукові праці ВНТУ. Серія: Енергетика і електротехніка, 2011. С. 15–22. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/44>

Березюк Євгеній Русланович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕСМ-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: zhakaranaldo7@gmail.com

Тептя Віра Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Berezyuk Yevheniy Ruslanovych – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ЕСМ-226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zhakaranaldo7@gmail.com

Teptia Vira V. - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com