

ВПЛИВ ВИСОКОЇ ЧАСТКИ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті досліджується вплив відновлюваних джерел енергії на динамічну стійкість електроенергетичних систем та ефективність технологій компенсації дефіциту інерції, таких як grid-forming інвертори та системи накопичення енергії.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, динамічна стійкість, інверторна генерація, інерція системи, grid-forming інвертори, системи накопичення енергії.

Abstract

This paper investigates the impact of renewable energy sources on the dynamic stability of power systems and the effectiveness of inertia-compensating technologies, such as grid-forming inverters and energy storage systems.

Keywords: renewable energy sources, dynamic stability, inverter-based generation, system inertia, grid-forming inverters, energy storage systems.

Вступ

Сучасний енергетичний перехід супроводжується стрімким зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячних та вітрових електростанцій [1]. Однак витіснення синхронних генераторів інверторними джерелами зменшує інерцію системи, що ускладнює регулювання частоти та підвищує ризик втрати стійкості. При високому рівні проникнення ВДЕ можливе погіршення частотної та вольт-амплітудної стабільності, особливо під час коротких замикань і різких змін навантаження. Наукові дослідження підтверджують, що для збереження надійності необхідно впроваджувати компенсуючі технології, зокрема системи накопичення енергії, синхронні конденсатори та grid-forming інвертори. Метою даної роботи є аналіз впливу ВДЕ на динамічну стійкість енергосистем та визначення ключових факторів, що впливають на її збереження.

Аналіз сучасного стану досліджень

Сучасні дослідження показують, що інтеграція великої кількості відновлюваних джерел енергії суттєво впливає на динамічну стійкість енергосистем. Основною проблемою є зменшення інерційних властивостей системи, що ускладнює підтримання частоти та напруги при аварійних збуреннях. Особливо чутливими до цих змін є мережі з переважанням інверторної генерації, де спостерігається зниження демпфування коливань і підвищений ризик втрати стійкості.

Вирішення проблеми вбачають у застосуванні технологій, здатних компенсувати дефіцит інерції, зокрема синхронних конденсаторів, систем накопичення енергії та інверторів із функцією формування мереж. Поряд із цим, перспективним напрямом є впровадження адаптивних систем керування, що динамічно реагують на зміни режиму роботи та забезпечують стабільність параметрів навіть за високої частки ВДЕ.

З урахуванням зростаючої частки відновлюваних джерел енергії в структурі генерації постає завдання комплексної оцінки їхнього впливу на динамічну стійкість енергосистеми. Необхідно визначити ключові фактори, що зумовлюють зниження інерційних властивостей, а також дослідити ефективність технологій, здатних компенсувати цей ефект. Метою дослідження є аналіз змін у поведінці системи під час перехідних процесів при високому рівні проникнення ВДЕ та обґрунтування методів стабілізації частоти й напруги [2]. Для досягнення поставленої мети передбачається проведення порівняльного моделювання режимів з різною часткою інверторної генерації та впровадженням засобів

інерційної підтримки. Отримані результати дозволять сформулювати рекомендації щодо підвищення надійності та керованості електроенергетичних систем нового типу.

Основні результати дослідження

Проведений аналіз показав, що зростання частки інверторної генерації суттєво впливає на динамічні характеристики електроенергетичної системи, насамперед через зменшення еквівалентної інерції. У режимах із високим проникненням ВДЕ спостерігається підвищена швидкість зміни частоти при аварійних збуреннях, збільшення амплітуди перехідних коливань та зниження демпфування низько-частотних мод [3]. Це зумовлює скорочення часу реакції регуляторів первинного та вторинного керування і вимагає перегляду їхніх налаштувань для забезпечення стійкості системи.

Моделювання показало, що застосування інверторів із функцією формування мережі забезпечує покращення показників стійкості за рахунок імітації поведінки синхронних генераторів. Такі пристрої здатні підтримувати напругу та частоту автономно, що підвищує рівень саморегулювання системи у випадку втрати частини генерації [2]. Додаткове використання систем накопичення енергії дозволяє забезпечити швидку інерційну відповідь, зменшуючи максимальні відхилення частоти та тривалість перехідного процесу.

Результати дослідження також підтверджують ефективність комбінованого підходу, який передбачає одночасне застосування синхронних конденсаторів, адаптивних алгоритмів керування та цифрових систем моніторингу режимів. Така інтегрована стратегія дозволяє підвищити демпфувальні властивості мережі, забезпечити стійкість у широкому діапазоні режимів і створює технічні передумови для безпечного збільшення частки ВДЕ в енергетичному балансі [1].

Вирішення проблеми вбачають у застосуванні технологій, здатних компенсувати дефіцит інерції, зокрема синхронних конденсаторів, систем накопичення енергії та інверторів із функцією формування мережі. Поряд із цим, перспективним напрямом є впровадження адаптивних систем керування, що динамічно реагують на зміни режиму роботи та забезпечують стабільність параметрів навіть за високої частки ВДЕ.

Висновки

Аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на динамічну стійкість електроенергетичної системи показав, що зростання частки інверторної генерації призводить до зменшення системної інерції та підвищення ризику частотної і вольт-амплітудної нестійкості. Впровадження технологій компенсуючої підтримки, таких як інвертори *grid-forming*, синхронні конденсатори та системи накопичення енергії, дозволяє ефективно покращувати демпфування коливань і стабілізувати режим системи. Комплексне застосування цих рішень у поєднанні з адаптивними алгоритмами керування створює технічну базу для безпечного збільшення частки ВДЕ та підвищення надійності енергосистеми [1]. Отримані результати можуть бути використані для розробки стратегій інтеграції ВДЕ та планування розвитку енергетичних мереж з високим рівнем гнучкості та стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чумаченко О. В. Роль відновлюваних джерел енергії у електроенергетичному балансі України // Вчені записки Університету «КРОК». — 2021. — №3(63). — С. 94–102. URL: <https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/529>
2. Авраменко В. М., Юнеєва Н. Т., Гурєєва Т. М., Кришталь А. О. Дослідження коливної статичної стійкості у перетині ОЕС України // Вісник Вінницького національного технічного університету. — 2020. — №6. — С. 32–39. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2178>
3. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Ч. 1. — 2011. — С. 48–55

Маліновський Анатолій Андрійович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

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

Malinovskiy Anatolii A. - student, Vinnitsa National Technical University, student of the department of electric power stations and systems; Vinnitsa, Ukraine.

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