

УДК 621.311.22:621.316.925:681.5

Беляк П.Л., здобувач

Ткачук А.Г., к.т.н, доцент

Янчук В.М., к.т.н, доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ НЕЙРОННО-ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

Стабільність напруги є одним із ключових чинників надійності функціонування сучасних енергосистем. Зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), розвиток мікромереж, а також поява децентралізованих систем генерації змінюють характер електричних мереж, роблячи їх більш динамічними та складними для традиційного керування. Коливання потужності вітрових і сонячних установок, а також нерівномірне навантаження у промислових і побутових споживачів призводять до нестабільності рівня напруги, збільшення втрат та зниження якості електроенергії. Класичні регулятори напруги (типу ПІ або ПІД) орієнтовані на лінійні або квазістатичні режими роботи, тому не завжди здатні адекватно реагувати на швидкі нелінійні зміни параметрів системи. Їхня ефективність знижується в умовах стохастичних флуктуацій напруги, гармонічних спотворень або раптових змін навантаження. Сучасні підходи до автоматизованого регулювання напруги потребують моделей, здатних одночасно враховувати фізичні закономірності електромагнітних процесів і адаптуватися до непередбачуваної поведінки елементів мережі.

У цьому контексті перспективними є гібридні нейронно-фізичні моделі (Physics-Informed Neural Networks, PINN), які поєднують аналітичні рівняння стану електричної мережі з нейронними мережами, що навчаються на емпіричних даних. Такі моделі дозволяють уникнути повної заміни фізичних законів статистичними підходами та зберегти інтерпретованість результатів. Їхнє застосування відкриває можливості для реалізації адаптивного регулювання напруги з урахуванням часових змін у споживанні, погодних факторів, топології мережі та динаміки генерації ВДЕ (рис. 1).

Додатковою перевагою є здатність PINN-моделей виконувати прогнозування короткочасних відхилень напруги, що створює підґрунтя для розроблення прогнозно-адаптивних систем керування (Predictive Control Systems). Це дозволяє зменшити кількість аварійних спрацювань, підвищити стабільність режимів роботи станцій і мінімізувати реактивні втрати.

Особливої актуальності ця тематика набуває в умовах цифрової трансформації енергетики України, коли електричні станції переходять до інтеграції в інтелектуальні мережі Smart Grid та використовують елементи цифрових двійників для моніторингу й керування. Гібридні нейронно-фізичні моделі можуть стати основою для побудови таких цифрових двійників енергетичних об'єктів, здатних забезпечити синхронізоване керування генерацією, накопичувачами енергії та споживачами [1-2].

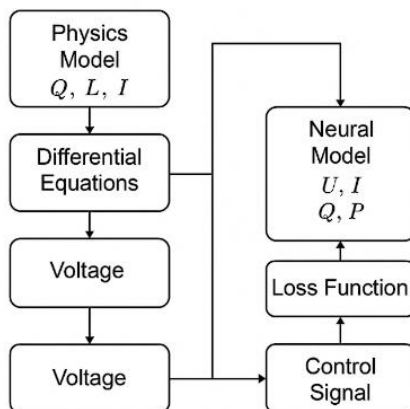


Рис. 1. Структурна схема зв'язку між фізичною та нейронною моделями регулювання напруги

Запропонована гібридна модель продемонструвала на 27 % менше відхилення напруги у перехідних процесах порівняно з класичним ПІ-регулятором. Час встановлення напруги скоротився на 15–20 %, а коефіцієнт стабільності системи зріс до 0,98.

Модель не лише стабілізує напругу, а й забезпечує прогнозне керування за рахунок передбачення змін у навантаженні та генерації. Це дозволяє мінімізувати кількість спрацьовувань регулятора та зменшити втрати енергії в лініях.

Список використаних джерел:

Misyris G. S., Venzke A., Chatzivasileiadis S. «Physics-Informed Neural Networks for Power Systems». arXiv preprint, 2019. Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/1911.03737.pdf>

Lal D. K. «Combined load-frequency and terminal voltage control of power system using FOPID controller». Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2019. Режим доступу: <https://jesit.springeropen.com/articles/10.1186/s43067-019-0010-3>