

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*Розглянуто вплив великомасштабних фотоелектричних станцій на струми короткого замикання в розподільних мережах. На основі моделювання проаналізовано поведінку ФЕС при симетричних та несиметричних пошкодженнях, оцінено наслідки для релейного захисту та запропоновано рекомендації щодо координації захисту.*

**Ключові слова:** фотоелектрична станція, струм короткого замикання, інвертор, релейний захист, розподільна мережа, проникнення відновлюваної генерації, несиметричні аварії, координація захистів.

### *Abstract*

*The impact of large-scale photovoltaic plants on short-circuit currents in distribution networks is considered. Based on modeling, the behavior of PV plants under symmetrical and asymmetrical faults is analyzed, the consequences for relay protection are assessed, and recommendations for protection coordination are proposed.*

**Keywords:** photovoltaic station, short-circuit current, inverter, relay protection, distribution network, penetration of renewable generation, asymmetric faults, protection coordination.

### **Вступ**

Інтенсивний розвиток відновлюваної енергетики суттєво змінює характер функціонування електричних мереж. Фотоелектричні станції (ФЕС), які ще декілька десятиліть тому були представлені переважно малими побутовими системами, сьогодні реалізуються у вигляді великих наземних установок потужністю десятки мегават, що підключаються безпосередньо до розподільних мереж середньої напруги [1, 2]. Це породжує принципово нову ситуацію для енергосистем: джерела електроенергії, що раніше були виключно споживачами або незначними генераторами, стають активними учасниками процесів, пов'язаних з аварійними режимами [3].

Ключовою особливістю ФЕС є те, що їхня взаємодія з мережею відбувається через силові інвертори на основі IGBT-транзисторів, а не через синхронні генератори, як у традиційній енергетиці. Це кардинально змінює характер струмів короткого замикання (КЗ): їхня амплітуда обмежується системою керування інвертора, а не лише імпедансом електричного кола [2]. Проблема полягає в тому, що існуючі системи релейного захисту розподільних мереж спроектовані та налаштовані без урахування внеску ФЕС у струм КЗ. Підключення великих ФЕС змінює розподіл струмів при пошкодженнях, що може призводити до хибних спрацювань або відмов захисту.

Метою цього дослідження є аналіз величини та характеру внеску ФЕС у струми КЗ, а також оцінка наслідків цього внеску для функціонування струмових захистів у розподільних мережах. В рамках дослідження розглядаються симетричні трифазні та несиметричні пошкодження, аналізуються різні рівні проникнення ФЕС у мережу, а також оцінюється можливість виникнення небажаних спрацювань захисту за умов незмінених уставок реле.

### **Результати дослідження**

Для дослідження поведінки ФЕС при аварійних режимах у роботі [1] побудовано детальну модель розподільної мережі у середовищі PSCAD, до складу якої входить ФЕС потужністю 50 МВт, підключена до мережі 27,6 кВ. Фотоелектрична система включає масив сонячних модулів, шестипульсний IGBT-інвертор, LC-фільтр гармонік, контролери активної та реактивної потужності, модуль широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а також підвищувальний трансформатор. Математична модель фотоелектричного масиву описує вихідний струм через рівняння, що враховує кількість паралельно та послідовно з'єднаних модулів, фотострум, струм насичення діода та теплову напругу. Фотострум, у свою чергу, залежить від рівня інсоляції та температури елементів.

Струм фотоелемента визначається як:

$$I_{\text{фот.елем.}} = (I_{\text{кз}} + K_{\text{темн.коэф}} \cdot (T_{\text{роб.темн.}} - T_{\text{ном.темн.}})) \cdot \lambda \quad (1)$$

де  $I_{\text{кз}}$  – струм короткого замикання елемента,

$K_{\text{темн.коэф}}$  – температурний коефіцієнт,

$T_{\text{роб.темн.}}$  – робоча температура елемента,

$T_{\text{ном.темн.}}$  – номінальна температура,

$\lambda = G/G_n$  – відносний рівень інсоляції [1].

Максимальний струм, що видається інвертором у мережу, апаратно обмежений на рівні 1,5–2,0 від номінального значення. Саме ця обставина є визначальною для оцінки внеску ФЕС у струм КЗ: незалежно від потужності станції, її аварійний внесок не може перевищити вказаного обмеження.

У роботі [2], де досліджується ФЕС потужністю 3 МВт із центральними інверторами, підключена до мережі 20 кВ, розглянуто три типи пошкоджень: однофазне замикання на землю, двофазне та трифазне КЗ. Результати моделювання в середовищі Matlab/Simulink показали, що в усіх трьох сценаріях інвертор впорскує виключно струм прямої послідовності, переважно реактивного характеру. Це пов'язано з вимогами німецьких мережевих кодексів: при просіданні напруги інвертор зобов'язаний генерувати ємнісний реактивний струм для підтримки напруги в мережі, тоді як активний струм та струм зворотної послідовності пригнічуються до нуля [2].

Такий режим роботи принципово відрізняється від поведінки синхронного генератора, який при КЗ видає значний симетричний струм з яскраво вираженою аперіодичною складовою. Внесок ФЕС є контрольованим, практично без ударного струму, і швидко стабілізується на рівні, визначеному уставкою обмеження струму інвертора.

Дослідження за сценарієм Fault1 (трифазне КЗ, рівень проникнення ФЕС 30%) показало, що хоча ФЕС і вносила додатковий струм у точку пошкодження, рівень цього струму не перевищував двократного номінального значення. Захист ОС2 спрацював коректно в обох випадках – з ФЕС та без неї, – однак час відключення при наявності ФЕС виявився дещо меншим, оскільки сумарний струм КЗ був вищим. Це свідчить про те, що за помірних рівнів проникнення координація існуючих захистів не порушується, а лише дещо прискорюється їх спрацювання.

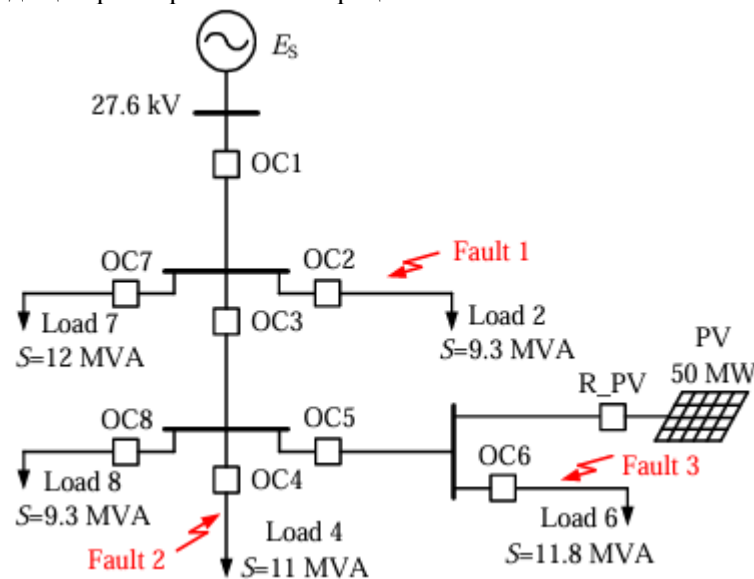


Рисунок 1 - Принципова схема розподільчої мережі з системою фотоелектричної генерації, що використовується в PSCAD

Складніша ситуація виникла у сценарії Fault3 (трифазне КЗ поблизу шин ФЕС, рівень проникнення 45%). Пошкодження було успішно ліквідовано реле ОС6, проте після його відключення ФЕС почала передавати весь згенерований потік потужності через реле ОС5, яке не було налаштоване на такий режим. Внаслідок цього через кілька секунд ОС5 видало сигнал на відключення, хоча пошкодження вже не існувало [1]. Цей випадок ілюструє принципово новий клас проблем для захисту: навіть коректне відключення пошкодження може ініціювати ненавмисне відключення суміжних елементів через перерозподіл потоків потужності від ФЕС.

Для запобігання подібним ситуаціям необхідне застосування направлених реле струму або перерахунок уставок захисту з урахуванням можливих топологій мережі після відключення

пошкодження. Зокрема, реле ОС5 має бути налаштоване таким чином, щоб не реагувати на нормальний потік потужності від ФЕС при зміні конфігурації мережі [1].

Щодо рівнів струмів КЗ, обидва дослідження підтверджують, що підключення ФЕС збільшує загальний рівень струму КЗ у мережі. Хоча цей приріст і не є катастрофічним з точки зору координації захисту, він має враховуватися при перевірці вимикачів та іншого комутаційного обладнання за відключаючою здатністю. Якщо ФЕС вносить до 2 номінальних одиниць струму, то при великих рівнях проникнення сумарний струм КЗ може виявитися близьким до граничних значень для встановленого обладнання.

Порівнюючи два підходи до моделювання – детальна PSCAD-модель у [1] та ЕМТ-моделювання в Matlab/Simulink у [2] – можна стверджувати, що обидва методи узгоджено вказують на обмежений, але не нульовий внесок ФЕС у струм КЗ, а також на відсутність ударного струму, характерного для синхронних машин. Принципова відмінність між підходами полягає у тому, що [1] зосереджується на наслідках для координації захисту в реальній мережі, тоді як [2] детально розглядає фізику процесів керування інвертором при несиметричних пошкодженнях.

## Висновки

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що великомасштабні ФЕС справляють реальний, хоча й обмежений вплив на струми короткого замикання в розподільних мережах. Завдяки апаратному обмеженню струму інвертора, внесок ФЕС у струм КЗ не перевищує двократного номінального значення, а характер цього струму суттєво відрізняється від внеску синхронних генераторів – зокрема, відсутній ударний струм та струм зворотної послідовності. За помірних рівнів проникнення ФЕС існуюча координація струмових захистів, як правило, зберігається, проте час спрацювання реле може скорочуватися. При рівнях проникнення понад 30–45% виникає ризик ненавмисних спрацювань захисту внаслідок перерозподілу потоків потужності після ліквідації пошкоджень.

З практичної точки зору, при підключенні великих ФЕС до діючих мереж необхідно виконувати перевірку координації захисту з урахуванням внеску станції, застосовувати направлені реле у вузлах, де можливий реверс потужності, а також перевіряти відключаючу здатність вимикачів на предмет відповідності зростаючим рівням струмів КЗ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bejmert D., Sidhu T. S. Short-Circuit Current Contribution from Large Scale PV Power Plant in the Context of Distribution Power System Protection // Present Problems of Power System Control. – Wrocław University of Technology, 2012. – No. 2. – P. 85–96.<https://scispace.com/pdf/short-circuit-current-contribution-from-large-scale-pv-power-3u6w1eito3.pdf>

2. Neumann T., Erlich I. Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant // Institute of Electrical Power Systems, University Duisburg-Essen. – 6 p.<https://pqrs.co.za/wp-content/uploads/2017/04/IFAC-Neumann-8-neumann2012.pdf>

3. Тептя Є. А., Тептя В. В. Особливості прогнозування графіків генерування відновлюваних джерел енергії та фактори, які впливають на його точність.<https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/49485>

**Глуценко Ілля Віталійович** – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ІЕСМ-236, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [ilyaglusenko4@gmail.com](mailto:ilyaglusenko4@gmail.com)

Науковий керівник: **Тептя Віра Володимирівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [teptyavira@gmail.com](mailto:teptyavira@gmail.com)

**Glushchenko Ilya Vitalijovich** – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group ІЕСМ-236, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [ilyaglusenko4@gmail.com](mailto:ilyaglusenko4@gmail.com)

Supervisor: **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](mailto:teptyavira@gmail.com)