

ВПЛИВ ІНВЕРТОРНИХ ДЖЕРЕЛ НА РІВЕНЬ ТА ФОРМУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Зростання частки інверторних джерел енергії в електроенергетичних системах суттєво змінює характеристики струмів короткого замикання порівняно з традиційними синхронними генераторами. Дослідження показує, що інверторні ресурси обмежують амплітуду струму КЗ до рівня близького до номінального, змінюють фазові співвідношення послідовностей та динаміку перехідних процесів, що створює виклики для налаштування релейного захисту та забезпечення стійкості системи [1, 2, 3].

Ключові слова: інверторні джерела енергії, струм, коротке замикання, зворотна послідовність, нульова послідовність.

Abstract

The increasing share of inverter power sources in power systems significantly changes the characteristics of short-circuit currents compared to traditional synchronous generators. Research shows that inverter resources limit the amplitude of the short-circuit current to a level close to the nominal, change the phase relationships of the sequences and the dynamics of transients, which creates challenges for the adjustment of relay protection and ensuring system stability [1, 2, 3].

Keywords: inverter power sources, current, short circuit, negative sequence, zero sequence.

Вступ

Перехід електроенергетики до відновлюваних джерел енергії супроводжується масштабним впровадженням вітрових та сонячних електростанцій, які підключаються до мережі через силові перетворювачі (інвертори) [1, 3]. На відміну від синхронних генераторів, які формують струм КЗ амплітудою до 5–10 номінальних значень, інверторні джерела обмежують струм на рівні 1–2 номінальних значень через теплові обмеження напівпровідникових елементів. Національні оператори передавальних систем прогнозують зниження рівня струмів КЗ на 15–50% у критичних вузлах мережі протягом найближчих років, що загрожує надійності роботи захисних пристроїв та стабільності напруги [1].

Проблема набуває критичного характеру через те, що традиційні алгоритми релейного захисту розраховані на характеристики струмів від синхронних машин [3]. Зменшення струму КЗ призводить до недостатньої чутливості захистів, збільшення часу виявлення пошкодження або повної відмови спрацювання [3]. Водночас змінюється фазовий кут струмів послідовностей, що порушує логіку визначення напрямку пошкодження в дистанційних та спрямованих захистах. Мета дослідження полягає у виявленні специфічних впливів інверторних ресурсів на параметри струмів КЗ, аналізі їх наслідків для системного захисту та формулюванні рекомендацій щодо адаптації захисних схем до умов високої частки інверторної генерації.

Результати дослідження

Інверторні джерела демонструють фундаментальні відмінності у відгуку на короткі замикання порівняно з синхронними генераторами. Амплітуда струму КЗ від інвертора визначається не імпедансом схеми заміщення, а алгоритмами керування та обмеженнями перетворювача [2]. Експериментальні дані показують, що для генераторів четвертого типу з повнорозмірним перетворювачем струм прямої послідовності стабілізується на рівні 1,15 номінального значення навіть при глибоких просіданнях напруги до 0,1–0,4 від номіналу [2, 3]. Фазовий кут між струмом і напругою прямої послідовності при цьому змінюється від -10° до -90° залежно від рівня напруги, що відрізняється від стабільного кута 90° у синхронних машин [2, 3].

$$I''_{sc,F} = \frac{-V_F(0) - \sum_{c \in C} Z_{F\Phi(c)} (I_{fc} - I_{Lc})}{Z_{FF}}. \quad (1)$$

Формула 1 описує розрахунок струму КЗ у вузлі F з урахуванням внеску інверторних джерел, де перший доданок відображає вплив напруги до пошкодження, а другий – керовані струми від інверторів [1].

Стандарт ІЕС 60909-0-2016 моделює інверторні джерела як джерела струму з фіксованим значенням, що призводить до завищення розрахункових значень, оскільки не враховує нелінійну залежність від напруги та режиму роботи [1,2]. Альтернативний підхід використовує принцип суперпозиції, де інвертор представляється як керований струм у дорежимних та чисто аварійних умовах [1]. Такий метод дозволяє врахувати обмеження контролера та вимоги сіткових кодів щодо підтримки мережі під час пошкоджень [1,2].

Струм зворотної послідовності традиційно був надійним індикатором несиметричного пошкодження, але інверторні джерела можуть повністю його придушувати через роз'язані контури керування послідовностями [2, 3]. У сценарії без підтримки зворотної послідовності генератори четвертого типу формують струм зворотної послідовності менше 0,1 номінального значення, що недостатньо для надійного спрацювання максимальних струмових захистів або спрямованих елементів [3]. Німецький сітковий код запровадив вимогу ін'єкції реактивного струму зворотної послідовності з коефіцієнтом $k = 2-6$, що забезпечує випередження струму відносно напруги на $90-100^\circ$. Це покращує виявлення несиметричних режимів, проте обмежує доступний струм прямої послідовності через загальний ліміт перетворювача [2, 3].

Моделювання на еквіваленті системи 230/115 кВ з вітровими станціями показало, що при відключенні потужного живлення та живленні лише від інверторних джерел імпеданс КЗ змінює траєкторію в характеристиці дистанційного захисту. Динамічне розширення характеристики мхореле, що залежить від імпедансу джерела за захистом, стає непередбачуваним через швидкі зміни внутрішнього імпедансу інверторів. Це призводить до похибок у визначенні зони пошкодження та можливого неселективного спрацювання або відмови спрацювання захисту. У критичному випадку зона 1 неочікувано охопила пошкодження за межами розрахункової зони через розширення характеристики на 60% більше від проектної величини.

Недостатня амплітуда струму КЗ впливає на надійність роботи струмових елементів дистанційних захистів [3]. У випадку пошкодження на 95% захищеної лінії від реле, що живиться виключно від інверторного парку, вимірний струм становив 0,46 номінального значення при налаштуванні порогу спрацювання 0,5. Струмовий пусковий елемент не активувався, що блокувало дистанційний захист другої зони. За нормальних умов з синхронним живленням струм досягав 4,56 номінальних значень, забезпечуючи надійне спрацювання. Вирішення проблеми вимагає зниження порогів до мінімально можливих значень або введення резервного захисту за напругою [3].

Нульова послідовність зберігає інформативність для заземлених пошкоджень, оскільки інвертори не генерують струмів нульової послідовності, а ці струми формуються трансформаторами з обмотками зірка-земля [3]. Проте фазовий кут напруги може швидко змінюватися через меншу інерційність системи з інверторними джерелами. У досліджених сценаріях зсув фази напруги під час пошкодження досягав 65° відносно запам'ятованої векторної величини порівняно з 11° у системі з синхронними генераторами. Спрямований захист за нульовою послідовністю з пам'яттю напруги помилково класифікував напрямок пошкодження як зворотний замість прямого через порушення базової гіпотези про малі фазові зсуви [3].

Диференційний струмовий захист ліній також стикається з викликами через зміну співвідношень струмів на кінцях лінії. Традиційна характеристика на основі амплітуд залишається працездатною, але схеми на основі комплексного співвідношення струмів (Alpha Plane) можуть хибно класифікувати внутрішнє пошкодження як зовнішнє. У тестовій конфігурації 500 кВ з однофазним заземленим пошкодженням траєкторія робочої точки диференційного елемента зворотної послідовності залишалася в зоні утримання під час живлення від інвертора типу IV без підтримки зворотної послідовності, тоді як при живленні від синхронного генератора або з активною ін'єкцією реактивного струму зворотної послідовності траєкторія входила в робочу зону, забезпечуючи виявлення пошкодження [2].

Зменшення інерції системи через зростання частки інверторних джерел збільшує швидкість зміни частоти при великих збуреннях. Моделювання європейської системи показало зростання градієнта частоти з 0,16 Гц/с при повністю синхронній генерації до 0,37 Гц/с при заміщенні 65% потужності інверторними джерелами [3]. Це створює ризик хибного спрацювання захисту за швидкістю зміни частоти, що призначений для виявлення острівних режимів, і може спричинити каскадне відключення генерації. Національні оператори переглядають налаштування з 0,125–0,5 Гц/с до 1 Гц/с, що знижує чутливість виявлення острівних режимів [3].

Захист від коливань потужності також вимагає перегляду через швидші електромеханічні перехідні процеси. Імпеданс, виміряний реле під час коливань, змінюється швидше через зменшену інерцію, що може призвести до помилкової класифікації коливання як пошкодження функцією блокування під час коливань. У порівняльних тестах траєкторія імпедансу перетинала зовнішню та середню характеристики за 2,7 циклу при 25% інверторної генерації порівняно з 3,5 циклу у синхронній системі. Налаштована затримка 3 цикли виявилася недостатньою для блокування, що спричинило неселективне відключення здорової лінії.

Висновки

Інверторні джерела енергії змінюють фундаментальні характеристики струмів КЗ в електричних системах через обмеження амплітуди до 1–2 номінальних значень, придушення або зміну фазових кутів струмів послідовностей та зменшення системної інерції [1, 2, 3]. Ці зміни створюють системні виклики для традиційних алгоритмів релейного захисту, включаючи дистанційні, струмові спрямовані, диференційні та частотні захисти [3]. Вирішення проблем вимагає комплексного підходу: адаптації налаштувань захистів до нових характеристик струмів, впровадження вимог до інверторів щодо підтримки мережі через ін'єкцію реактивних струмів послідовностей, розробки нових алгоритмів виявлення пошкоджень та використання комунікаційних схем захисту. Практичне значення полягає у забезпеченні надійності електропостачання в умовах енергетичного переходу, де частка інверторних джерел перевищує критичні межі для застосування традиційних підходів [1]. Результати дослідження формують базу для розробки адаптивних систем захисту та оновлення регуляторних вимог до інверторних ресурсів у сучасних електроенергетичних системах [1, 2, 3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chu Z., Teng F. Short Circuit Current Constrained UC in High IBG-Penetrated Power Systems // arXiv:2101.04918, 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.04918>
2. Javid Z., et al. A New Paradigm in IBR Modeling for Power Flow and Short Circuit Analysis // IEEE Transactions, 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/390773625_A_New_Paradigm_in_IBR_Modeling_for_Power_Flow_and_Short_Circuit_Analysis/link/67fdd7f960241d51400c7a89/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIn19
3. Haddadi A., Farantatos E., Kocar I., Karaagac U. Impact of Inverter Based Resources on System Protection // Energies, 2021, Vol. 14, p. 1050. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/1050>

Тартус Давид Віталійович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕСМ-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dtartus0@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

Tartus Davyd – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ESM-226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dtartus0@gmail.com

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