

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВТОМАТИЧНОГО ПОВТОРНОГО ВМИКАННЯ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: Розглянуто вплив автоматичного повторного вмикання (АПВ) на перехідні процеси в електроенергетичних системах. Проаналізовано типи коротких замикань, часові параметри АПВ та їх роль у підвищенні стійкості режиму. Розроблено рекомендації щодо оптимізації пауз без струму для зменшення перенапруг і поштовхів струму.

Ключові слова: автоматичне повторне вмикання, перехідні процеси, динамічна стійкість, короткі замикання, пауза без струму, однофазне АПВ, прискорення захисту

Abstract: The influence of automatic reclosing (AR) on transients in power systems is considered. Types of short circuits, time parameters of AR and their role in increasing the stability of the regime are analyzed. Recommendations are developed for optimizing the no-current pauses to reduce overvoltages and current surges.

Keywords: automatic reclosing, transients, dynamic stability, short circuits, no-current pause, single-phase AR, protection acceleration

Вступ

Сучасні електроенергетичні системи характеризуються високою динамікою навантажень та частотою аварійних ситуацій, спричинених атмосферними явищами чи механічними пошкодженнями ліній електропередач. Значна частка коротких замикань, а саме 80–90%, є тимчасові (транзієнтними), які зникають самі по собі після відключення лінії (наприклад, через гасіння дуги чи усунення причини), що зумовлює тимчасові перерви в живленні, але створює ризики для стійкості системи через накопичення енергії в перехідних процесах. Актуальність теми зумовлена необхідністю мінімізації втрат потужності та запобігання каскадним аваріям, особливо в мережах з двостороннім живленням, де несинхронне вмикання може призвести до асинхронного ходу та перенапруг. Постановка проблеми полягає в оптимізації параметрів АПВ для балансу між швидкістю повторного вмикання та достатньою деіонізацією ізоляційного середовища, аби уникнути повторного запалення дуги та зберегти синхронізм [1].

Мета дослідження – оцінити вплив АПВ на електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси в системах електропостачання. Для досягнення мети визначено такі завдання: аналіз типів пошкоджень та їх частоти; вивчення часових характеристик АПВ, включаючи паузи без струму та час відновлення; моделювання перехідних процесів при одно- та трифазному АПВ; оцінка ефективності прискорення захисту до та після АПВ; формулювання рекомендацій, щодо застосування в мережах високої напруги.

Результати дослідження

Перехідні процеси в електроенергетичних системах виникають при раптових змінах режиму, таких як короткі замикання (КЗ), і характеризуються коливаннями напруги, струму та потужності, що можуть призвести до втрати стійкості. За даними аналізу, 80–90%

пошкоджень на повітряних лініях є тимчасові, спричиненими блискавкою чи тимчасовим контактом з сторонніми об'єктами, тоді як 10–20% – напівпостійні або постійні, що вимагають локалізації та ремонту [2]. Автоматичне повторне вмикання (АПВ) дозволяє відновити живлення після випадкових КЗ, зменшуючи час перерви до 0,3–0,6 с, що критично для збереження системної стійкості. У типовий цикл АПВ входять: час відкриття вимикача, пауза без струму для дегазації дуги, час замикання та час відновлення для готовності до наступного КЗ.

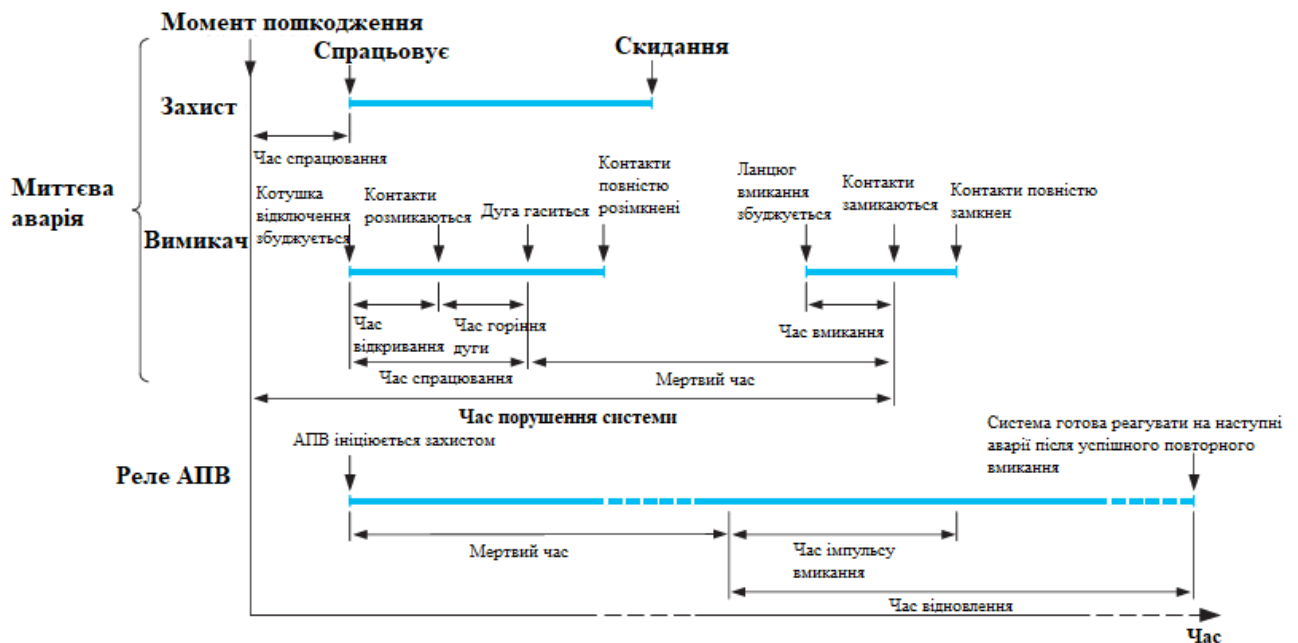


Рисунок 1 – Часова діаграма роботи пристрою автоматичного повторного вмикання (АПВ) [1]

Часові параметри АПВ визначають ефективність впливу на перехідні процеси. Паузу без струму $t_{д.с.}$ обирають з урахуванням деіонізації повітря, що становить 0,1–0,3 с, та запасу $t_{зап}$ для готовності приводу вимикача: $t_{АПВ} \geq t_{д.с.} + t_{зап}$ [3]. Для мереж з двостороннім живленням вводять прискорення захисту (ПДЗ) до та після АПВ, аби забезпечити селективне відключення. При прискореній дії захисту після АПВ неселективні ступені захисту (НЗ) тимчасово прискорюються на час $t_{АПВ}$, що скорочує час локалізації КЗ на 20–30% порівняно з градованими схемами без АПВ [2]. Аналогічно, прискорена дія захисту до АПВ активує миттєве відключення ближніх ділянок, запобігаючи перегоранню запобіжників у разі неуспішного вмикання.

Моделювання перехідних процесів при АПВ проводилося за рівняннями електромагнітних та електромеханічних процесів. Для трифазного КЗ в радіальній мережі початковий струм повторного КЗ після паузи АПВ може перевищувати первинний на 20–25%, залежно від реактивної потужності, скинутої генератором: $I_{поч.повт} = 1,25 \cdot I_{поч.}$. Кутова характеристика

потужності після АПВ описується як $P = \frac{E_q \cdot U}{x_d + x_T + x_l} \sin \delta$, де E_q – ЕРС генератора, U –

напруга шини, x_d , x_T , x_l – реактивні опори [4]. Успішне АПВ збільшує площу гальмування $F_{гальм.}$, обмежуючи ріст кута δ до критичного значення $\delta_{кр} \approx 90\text{--}120^\circ$, що на 15–20% ефективніше, ніж без АПВ, за методом площ [3]. Для несинхронного АПВ (НАПВ) перевіряється умова допустимості кута вмикання: $\delta_{мд} = -25^\circ$ з урахуванням коефіцієнта повернення $k_{п} = 0,8$ [4].

Однофазне АПВ (ОАПВ) застосовується для мереж із заземленою нейтраллю, де при фазовому КЗ відключається лише пошкоджена фаза, зменшуючи поштовхи струму на 50–70% порівняно з трифазним [2]. Це знижує перенапруги на 1,5–2 п.у., оскільки зберігає синхронізм двох фаз. Комбіновані АПВ (КАПВ) обирають фазу за допомогою виборців, забезпечуючи селективність. Перевага ОАПВ над трифазним – у меншій механічній напруженості вимикачів, але ускладнює схему на 20–30% через додаткові реле [2]. У мережах 330–500 кВ комбінований пристрій АПВ-503 інтегрує РЗ, дозволяючи ОАПВ при однофазних КЗ та трифазне при стійких [2].

Прискорене АПВ (ПАПВ) з паузою 0,2–0,3 с ефективно для ліній, де час до δкр не перевищує 0,5 с, підвищуючи динамічну стійкість на 25% [3]. АПВ з очікуванням синхронізму (АПВОС) контролює різницю частот $f_s \leq (\delta_{\text{ср}} / 360^\circ (1 + k_{\text{п}}))$, де $\delta_{\text{ср}} = 20\text{--}40^\circ$, запобігаючи асинхронному ходу [2]. У моделях СЕП з кількома генераторами АПВ після АЧР (ЧАПВ) відновлює частоту за 1–2 с, зменшуючи відхилення на 2–3% [5]. Порівняно з традиційними градованими захистами, АПВ скорочує час перерви на 80%, але вимагає реле перевірки синхронізму для високовольтних мереж, аби уникнути втрат синхронізму [5].

Інтеграція АПВ з мікропроцесорними РЗ, як РПВ-01, спрощує схеми, усуваючи окремі реле, і забезпечує однократність дії через елементи блокування [2]. Розрахунки показують, що оптимальна витримка $t_{\text{АПВ}} = \max(t_{\text{д.с.}} + t_{\text{зап.}}, t_{\text{г.п.}} + t_{\text{в.в.}})$ для повітряних вимикачів становить 0,4–0,6 с, що на 10–15% ефективніше для випадкових КЗ [4].

Висновки

Дослідження продемонструвало, що АПВ суттєво пом'якшує перехідні процеси, відновлюючи 80–95% випадково-тимчасових (транзієнтних) КЗ за 0,3–0,6 с, з паузою без струму для деіонізації, та підвищує динамічну стійкість на 20–25% шляхом збільшення площі гальмування. Оптимальні параметри – однофазне для заземлених мереж, ПАПВ для ліній – зменшують перенапруги та поштовхи струму порівняно з традиційними схемами. Практичне значення полягає в інтеграції АПВ з ПДЗ та АЧР для реальних установок високої напруги, що забезпечує надійність живлення промислових об'єктів, скорочує економічні втрати від аварій та сприяє стійкості єдиної енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Автоматика протиаварійного управління електроенергетичних систем : монографія / Г. М. Сендерович, А. О. Запорожець, В. М. Кузьменко [та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 218 с. – ISBN 978-617-7912-24-7.
- [2] Стійкість та керування режимами електроенергетичних систем : підручник / П. П. Борисенко, І. О. Левченко, О. М. Лисенко. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 352 с., ISBN 978-617-607-987-3
- [3] Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с., ISBN 978-966-350-585-5, URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Pivnyak_2016_600.pdf
- [4] Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. - Вінниця : ВНТУ, 2023. – 125 с. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Rubanenko_2023_125.pdf
- [5] Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах : електронний конспект лекцій комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 183 с., ISBN 978-966-641-872-5

Бачинський Роман Валентинович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕС-22б, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: firesapfire@gmail.com

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

Bachynskyi Roman Valentinovich — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ES-22b, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: firesapfire@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