

Переваги та виклики впровадження систем онлайн-моніторингу стану вакуумних вимикачів

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній роботі проаналізовано методику діагностування вакуумних вимикачів, що поєднує безперервний моніторинг вакуумної дугогасильної камери (ВДК) та вібраційний аналіз механічного стану. Показано переваги кожного методу та їх взаємодоповнюваність у системах технічного обслуговування за станом.

Ключові слова: вакуумний вимикач, онлайн-моніторинг, вакуумна дугогасильна камера (ВДК), безперервний моніторинг вакууму, втрата вакууму.

Abstract

This paper analyzes a vacuum circuit breaker diagnostic technique that combines continuous vacuum arc chamber (VAC) monitoring and vibration analysis of mechanical condition. The advantages of each method and their complementarity in condition-based maintenance systems are shown.

Keywords: vacuum circuit breaker, online monitoring, vacuum arc extinguishing chamber (VAC), continuous vacuum monitoring, vacuum loss.

Вступ

Вакуумні вимикачі (ВВ) є ключовими елементами захисту в розподільних мережах середньої напруги – на їхню частку припадає понад 70 % усіх встановлених комутаційних апаратів [1]. Надійна робота ВВ критично важлива для безперебійного електропостачання, тому питання своєчасного виявлення деградації набуває особливої актуальності в умовах розвитку концепції Smart Grid.

Існуючі підходи до технічного обслуговування ВВ зосереджені переважно на планових перевірках, які вимагають відключення апарата від мережі. Такий підхід не дозволяє своєчасно виявити поступову деградацію – як втрату вакууму у вакуумній дугогасильній камері (ВДК), так і зношування механізму керування. За даними CIGRE, механічні несправності складають 43,5 % від усіх відмов ВВ, а електричні – 26 % [3].

Мета роботи – обґрунтувати доцільність поєднання двох принципово різних методів безперервного моніторингу стану ВВ: контролю тиску у ВДК та вібраційного аналізу механізму оперування, – та визначити переваги такого комплексного підходу порівняно з традиційними методами технічного обслуговування.

Дослідження

Вакуумний стан вакуумної дугогасильної камери є визначальним для його комутаційної та діелектричної здатності. Технологія виробництва, що розвивається з 1950-х років, забезпечує початковий тиск у ВДК на рівні близько 10^{-5} Па, тоді як критичний рівень, за якого діелектрична міцність стає недостатньою для підтримки номінальної напруги мережі (P_{fail}), становить приблизно 2 Па [1]. Між цими рівнями існує широкий проміжок тисків, у якому визначається ефективність різних методів моніторингу.

Традиційний метод HiPoT (High Potential Test) передбачає прикладання до розімкнених контактів ВДК напруги, що перевищує пробивну напругу тих самих контактів у повітрі. Метод має 50-річну практику застосування, однак вимагає відключення ВВ від мережі та може виконуватися лише під час планових технічних обслуговувань – зазвичай раз на рік [1]. За умови постійного темпу витоку вакууму і без безперервного контролю ймовірність виявлення дефекту своєчасно зменшується, і через 30 років без перевірок несправний ВДК може бути виявлений лише в кожному 500-му вимикачі [1].

Для усунення цього недоліку запропоновано чотири класи безперервних вакуумних моніторів, які відрізняються діапазоном вимірюваного тиску. Датчики високого вакууму (наприклад, Penning-датчик, діапазон $2 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Па) дозволяють прогнозувати майбутню відмову ВДК на ранній стадії, однак

потребують активного живлення на стороні високої напруги та інтеграції чутливого елемента безпосередньо у ВДК, що знижує надійність конструкції [1]. Датчики низького тиску (діапазон $10^1 - 10^4$ Па) фіксують появу часткових розрядів між контактами та металевим екраном ВІ. Хоча вони не дають прогнозу щодо втрати вакууму, їхня сліпа зона становить менше 0,01 % від часу роботи на рік (близько 40 хвилин), а час відгуку на раптовий витік – не більше 3 годин [1]. Водночас датчик не потребує модифікації конструкції ВІ, що є його ключовою практичною перевагою. Барометричні датчики виявляють факт заповнення ВДК газом при тиску понад 0,2 бар, проте їхня сліпа зона сягає 46 діб для повільного корозійного витоку.

Ефективність безперервного вакуумного моніторингу підтверджується кількісно. За умови встановлення монітора з МТТФ 100 років ймовірність непоміченої несправності знижується до менш ніж 1 на мільйон, а доступність ВДК підвищується до 99,9999 % порівняно з 99,8 % за щорічного HiPoT [1]. Час відгуку детектора на основі датчика низького тиску на раптовий витік $T_{\text{відгук}}$ визначається як:

$$T_{\text{відгук}} = P_{\text{виявлення}} \cdot \frac{V_{\text{ВІ}}}{(dQ/dt)_{\text{max}}} \quad (1)$$

де $P_{\text{виявлення}}$ – мінімальний тиск виявлення детектором,

$V_{\text{ВІ}}$ – об'єм ВДК (типово 1 л),

$(dQ/dt)_{\text{max}}$ – максимальний темп витоку (1 Па·л/с для виробничого дефекту) [1].

Паралельно з вакуумним моніторингом механічний стан ВВ може оцінюватись методом вібраційного аналізу без відключення апарата від мережі. Результати прискореного ресурсного випробування вакуумного вимикача ABB VD4 36 кВ, у ході якого зафіксовано понад 26 000 операцій увімкнення-відімкнення протягом п'яти місяців. Вібраційні сигнали реєструвалися п'єзоелектричним акселерометром (діапазон 0,5 Гц – 14 кГц), встановленим на корпусі привода ВВ ззовні – без втручання у конструкцію апарата [3].

Для виявлення ключових моментів операції увімкнення запропоновано алгоритм на основі короточасної енергії (Short-Time Energy, STE). На відміну від стаціонарних сигналів, вібраційний сигнал ВВ є нестационарним, тому STE обчислюється локально із застосуванням вікна Хеммінга:

$$STE(t) = \frac{1}{W} \sum_{n=0}^{W-1} x^2(n) \cdot w(n) \quad (2)$$

де $x(n)$ – дискретний вібраційний сигнал,

$w(n)$ – вагова функція вікна Хеммінга довжиною W відліків [3].

Алгоритм визначає два ключові моменти: t_1 – початок руху засуву механізму оперування, та t_2 – момент торкання рухомого контакту з нерухомим, що відповідає визначенню часу увімкнення ВВ за стандартом IEEE C37.100.

Порівняння результатів виявлення t_2 з еталонними вимірюваннями контактного методу (9 В постійного струму між контактами) показало середньоквадратичне відхилення $RMSE = 0,550$ мс для запропонованого алгоритму на основі STE, тоді як метод бінарної сегментації (BS) дає $RMSE = 8,438$ мс через систематичну затримку ~ 8 мс [3]. Протягом усього ресурсу час увімкнення зростає від ~ 60 мс до понад 70 мс, що відповідає трьом стадіям деградації: ініціалізації (до 5000 операцій), стаціонарній (5000–20000) та стадії зношування (понад 2000 операцій).

Додатковою перевагою вібраційного підходу є можливість аналізу інтервалу $t_2 - t_1$, що характеризує час руху контактної системи від звільнення засуву до торкання контактів. Зростання цього інтервалу разом із t_1 свідчить про комплексне зношування механізму, тоді як ізольоване зростання t_1 вказувало б виключно на деградацію засуву [3]. Такий розподіл недоступний при традиційному контактному вимірюванні.

Нижче наведено зведену таблицю порівняння методів моніторингу за основними критеріями.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів діагностування ВВ

Метод моніторингу	Діапазон тиску / сигналу	Безперервний	Без від'єднання від мережі	Переваги / обмеження
HiPoT (діелектричний тест)	$2 \cdot 10^0 - 10^5$ Па	Ні	Ні	Перевірений метод; щорічне відключення
Датчик високого вакууму	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-1}$ Па	Так	Так	Прогнозує відмову; потребує джерела на ВН
Датчик низького вакууму	$10^1 - 10^4$ Па	Так	Так	Оптимальний вибір; не змінює конструкцію ВІ
Барометричний датчик	$10^4 - 10^5$ Па	Так	Так	Просте виявлення кінця ресурсу; пізні виявлення
Вібраційний моніторинг (STE)	Мех. сигнал (до 14 кГц)	Так	Так	Виявлення t_1, t_2 без відключення; RMSE 0,55 мс

Висновок

Проведений аналіз показав, що найбільш раціональним інженерним рішенням для забезпечення надійності вакуумних вимикачів є поєднання безперервного вакуумного моніторингу на основі датчиків низького тиску з вібраційним аналізом часу увімкнення. Перший метод підвищує доступність ВВ до рівня 99,9999 % [1], другий – дозволяє виявляти деградацію механізму оперування з точністю RMSE = 0,550 мс без відключення апарата [3]. Комплексне застосування обох методів відповідає вимогам сучасних інтелектуальних енергосистем (Smart Grid) і забезпечує реалізацію стратегії технічного обслуговування за станом у реальних умовах експлуатації розподільних мереж середньої напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Schellekens H. Continuous Vacuum Monitoring in Vacuum Circuit Breakers. Schneider-Electric, Energy B.U., Medium Voltage Switchgear, Grenoble, France.
2. Лесько В. О., Комар В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2018. 102 с.
3. Hsu C.-C., Frusque G., Muratovic M., Franck C. M., Fink O. Vacuum Circuit Breaker Closing Time Key Moments Detection via Vibration Monitoring: A Run-to-Failure Study. arXiv:2208.07607v1, 2022.

Березюк Євгеній Русланович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕСМ-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: zhakaranaldo7@gmail.com

Науковий керівник: **Сікорська Олена Вікторівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Olenasikorska@ukr.net

Supervisor: **Sikorska Olena Viktorivna** - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Olenasikorska@ukr.net

Berezyuk Yevheniy Ruslanovych – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ESM-22b, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zhakaranaldo7@gmail.com