

О. Є. Рубаненко

І. І. Смагло

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ І ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Вінницький національний технічний університет

Досліджено пошкоджуваність обладнання фотоелектричних станцій (ФЕС). Основна увага приділяється маслонаповненим трансформаторам напругою 10/0,4 кВ, 35/0,4 кВ, 35/10/0,4 кВ потужністю до 5 МВА та розробці алгоритму визначення ймовірних місць пошкоджень фотоелектричних модулів, що дозволяє вибрати діагностичне обладнання. Використання такого обладнання забезпечить виявлення пошкоджень силових трансформаторів та фотоелектричних модулів на ранній стадії їх розвитку, також вчасно вжити заходи спрямовані на попереджувальний ремонт, зменшити кількість пошкоджень трансформаторів, час простою та ремонту пошкоджених силових трансформаторів, які пошкодились під час їх експлуатації на ФЕС. Експлуатація силових трансформаторів на фотоелектричних станціях передбачає їх часті увімкнення та вимкнення. В якості високовольтних комутаційних апаратів використовуються високовольтні вакуумні вимикачі розраховані на напругу 10 кВ або 35 кВ. Ємність інверторів, індуктивність обмоток силових трансформаторів, індуктивність обмоток вимірювальних трансформаторів напруги, ємність кабельних ліній і вставок в умовах використання вакуумних вимикачів створюють передумови для виникнення комутаційних перенапруг, виникнення резонансів в контурах (силовий трансформатор, кабельна вставка або кабельна лінія, вимірювальний трансформатор напруги). В місцях експлуатації деяких фотоелектричних станцій спостерігається підвищена грозова активність. На електричне обладнання цих станцій впливають не лише комутаційні (внутрішні перенапруги), а і атмосферні перенапруги. Для захисту від перенапруг використовуються розрядники (типу РВО, РВС і т.п.) та обмежувачі перенапруг. Пошкоджуваність цих розрядників та обмежувачів перенапруг свідчить про існуванні та інтенсивності перенапруг. Пошкоджуваність кабельних вставок та кабельних муфт, вимірювальних трансформаторів напруги на фотоелектричних станціях та в електричних мережах поблизу цих станцій також свідчать про негативний вплив перенапруг на обладнання ФЕС, а серед нього і на силові трансформатори цих станцій.

Ключові слова: силові трансформатори, фотоелектричні станції, пошкоджуваність, фотоелектричні модулі, інвертори, алгоритм діагностування, тепловізійний контроль, моніторинг.

Вступ

Обладнання електроенергетичних систем експлуатується в складних умовах – в умовах комутаційних перенапруг [1]. Перенапруги, резонансні процеси, атмосферні фактори і т. п. погіршують умови експлуатації електричного обладнання, зменшують його ресурс, викликають пошкодження, наближають час виведення з експлуатації. А тому вимагають досліджень пошкоджуваності обладнання та методів і засобів його діагностування.

Відомо, що в наш час широко використовують фотоелектричні станції (ФЕС) [2–4], обладнання яких так само як і традиційних джерел енергії може пошкоджуватись, атому вимагає контролю його технічного стану. Фотоелектричні модулі (ФЕМ) все частіше стають джерелами розподіленого генерування, особливо в умовах пошкоджень критичної інфраструктури – потужних теплових та гідроелектростанцій, електричних підстанцій, ліній електропередач. Зростаюча кількість фотоелектричних модулів не лише на потужних фотоелектричних станціях (ФЕС), а і у громадян, які експлуатують до 15 кВт встановленої потужності, зменшує втрати електричної енергії на транспортування в електричному обладнанні розподільних електричних мереж (в лініях електропередач, в силових трансформаторах і т.п.), а і підвищує якість електричної енергії шляхом максимального наближення фотоелектричних модулів до споживачів, особливо, у споживачів, які значно віддалені від традиційних потужних джерел електроенергії. Електропостачання таким споживачам здійснюється віддаленими підстанціями та лініями електропередач енергопостачальних

компаній облэнерго на клас напруги 10-35 кВ. Часто таке обладнання відпрацювало свій паспортний ресурс, потребує частого обслуговування, більш якісного ремонту та модернізації, особливо в умовах зростаючого споживання. Зростаюча кількість джерел генерування, обладнання таких джерел, наприклад, фотоелектричних модулів, інверторів, силових трансформаторів, кабельних ліній електропередач, зменшує надійність електропостачання. Тому експлуатація розподілених джерел генерування електричної енергії вимагає використання нових, сучасних методів та засобів діагностування їх електричного обладнання, а тема досліджень, в наш час, є актуальною [1]. Метою дослідження є пошкоджуваність обладнання фотоелектричних станцій, методи та засоби діагностування такого обладнання.

Результати дослідження

Відповідно до мети розглянемо та проаналізуємо пошкодження обладнання ФЕС. В умовах великої кількості діагностичного обладнання різних виробників розробимо алгоритм діагностування. Під час експлуатації фотоелектричних станцій важливим є постійний та періодичний контроль стану ФЕМ, оскільки вони є основною складовою ФЕС [5]. Тому необхідно вчасно виявляти пошкодження ФЕМ та усувати їх в найкоротші терміни. Потрібно знати технічний стан обладнання відновлювальних джерел енергії з метою його врахування під час експлуатації[5]. Існує багато методів для контролю стану ФЕМ, але через їх високу вартість, використовувати усі їх одночасно не можливо. Тому необхідні алгоритми діагностування, які одночасно були б ефективними і потребували мінімальних фінансових затрат. Пропонуємо наступний алгоритм діагностування (рис. 1).

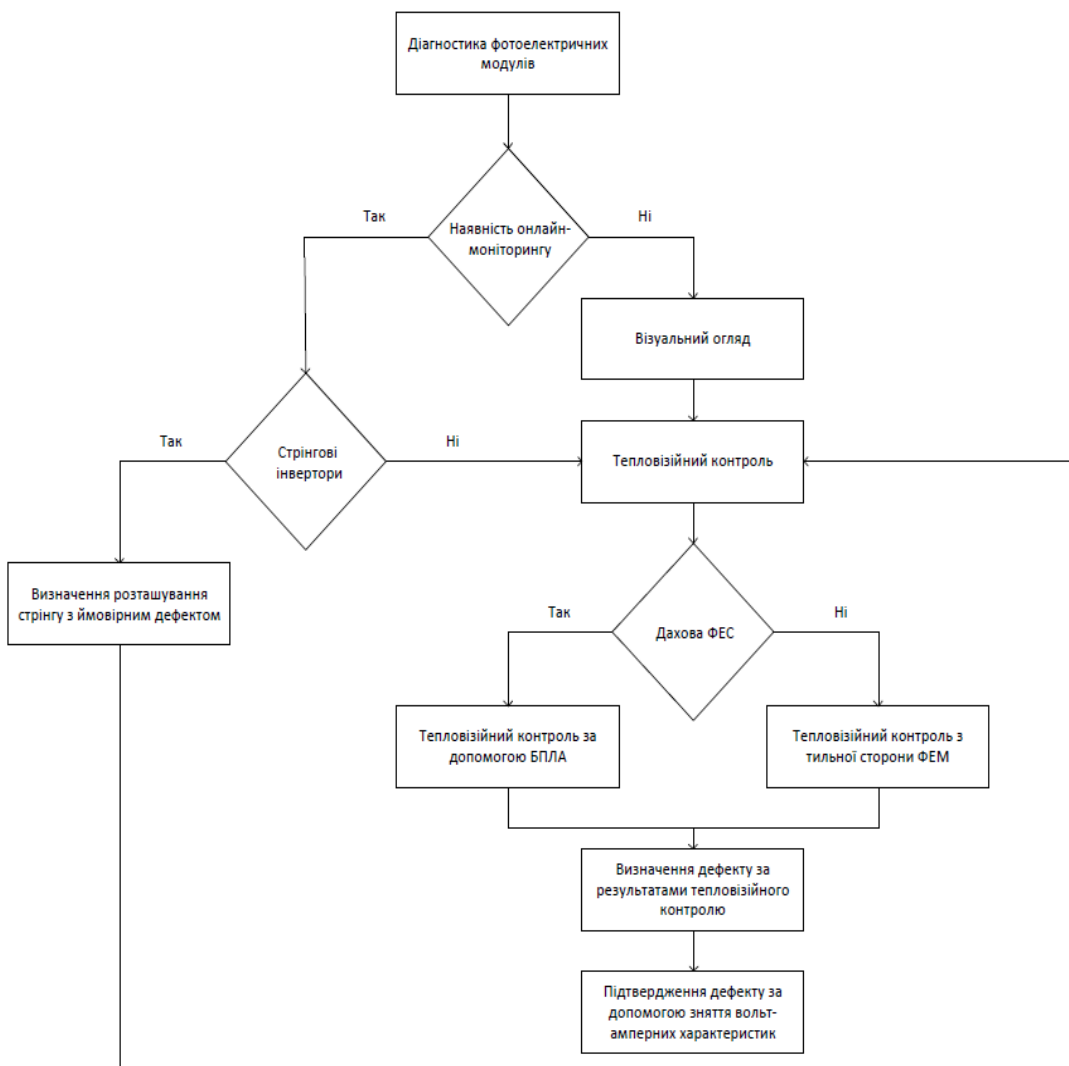


Рис. 1 Алгоритм діагностування фотоелектричних модулів

Найзручнішим і першочерговим методом діагностики є онлайн-моніторинг стану усієї ФЕС, але цей метод має обмеженість у використанні.

Звісно, неможливо підключити кожен модуль до приладів, які б постійно читували його стан у масштабах великих або середніх промислових ФЕС, тому даний моніторинг зводиться до контролю стану окремих збірок модулів (стрінгів), ящиків з'єднань (ЯЗ) або безпосередньо інверторів.

Під час моніторингу стрінгових інверторів з відносно невеликою потужністю є можливість контролю показників стрінгів, але не конкретно ФЕМ. Тобто, даний метод дає можливість зрозуміти, в межах якої збірки знаходиться ймовірно пошкоджений ФЕМ, але детальнішої інформації таким чином отримати неможливо.

Що стосується силових інверторів з великими потужностями, в них онлайн-моніторинг зводиться до контролю стану ЯЗ, оскільки такі інвертори потребують більших вхідних значень. В такому випадку, локалізувати ймовірний дефект ще важче, а знайти пошкоджений ФЕМ – майже неможливо або ж буде супроводжуватись великими втратами зусиль та часу.

Тим не менш, попередні методи контролю дозволяють локалізувати ймовірні місця пошкоджень та об'єм майбутніх обстежень.

Наступним більш ефективним етапом діагностування, є тепловізійний контроль фотоелектричних модулів, який дозволяє отримати максимальну кількість інформації за невеликий проміжок часу.

Тепловізійний контроль має ряд переваг над іншими видами діагностики:

Діагностування проводять на працюючому обладнанні, що не потребує його вимикання;

Відсутність необхідності виконувати оперативні перемикання;

Під час провадження діагностики забезпечується безпека персоналу, тому що при цьому використовується дистанційний безконтактний метод;

Під час проведення діагностики забезпечується висока продуктивність праці;

Забезпечується необхідна точність і достовірність результатів, використання тепловізора дає змогу бачити теплову картину в цілому, що унеможливорює пропуск дефектів.

Метод тепловізійного контролю також має свої особливості для ФЕС різних розмірів або різного розташування відносно поверхні, оскільки дане обстеження відбувається в декілька етапів.

Для дахових ФЕС є неможливим проведення другого етапу, який полягає в обстеженні ФЕМ з тильної сторони для уникнення відблисків сонця або інших факторів, що зменшують точність вимірювань. В даному випадку, доцільним є використання лише першого етапу, при якому проводиться обстеження фотоелектричних модулів за допомогою квадрокоптера з вбудованою тепловізійною камерою, яка є лише індикаторною і дає змогу знайти конкретне місцезрештування дефекту та візуально оцінити, якого характеру даний дефект.

Для ФЕС, які мають наземне розміщення, проводяться обидва етапи тепловізійного контролю ФЕМ: проліт квадрокоптером над фотоелектричними модулями та візуальний пошук температурних відхилень і обстеження ФЕМ з тильної сторони для фіксації даних відхилень та детального аналізу температур.

Для ФЕС, які мають наземне розміщення, проводяться обидва етапи тепловізійного контролю ФЕМ: проліт квадрокоптером над фотоелектричними модулями та візуальний пошук температурних відхилень і обстеження ФЕМ з тильної сторони для фіксації даних відхилень та детального аналізу температур.

В обох випадках, для підтвердження чи спростування дефектів, виконується вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів з ймовірними дефектами. Для більш детального аналізу, вимірювання проводять не лише на ФЕМ з дефектами, а й на повністю справних, оскільки це дозволяє порівняти значення, отримані на різних фотоелектричних модулях при однакових умовах

вимірювання. У випадках, коли перегрівається збірка фотоелектричних модулів, мова йдеться про дефект стрінгу, який може бути пов'язаний із низкою факторів.

В першу чергу, оцінювання стану стрінгу ФЕМ проводиться шляхом вимірювання струму досліджуваної збірки. Якщо струм не відхиляється від номінальних значень, необхідно перевірити справність кожного з ФЕМ. При виявленні пошкоджених або технічно несправних ФЕМ, необхідно провести повний детальний аналіз, описаний раніше.

Якщо усі ФЕМ справні, а струм відповідає (майже відповідає) номінальним значенням, доцільним є припущення про неправильність підключення ФЕМ у цій збірці (порушено полярність при підключенні). При цьому, даний дефект може супроводжуватись і зміною струму як в меншу, так і в більшу сторону. Дане явище характеризується різноманітністю можливих помилок при підключенні ФЕМ.

При цьому необхідно провести вимірювання усіх параметрів даного стрінгу для виявлення характеру конкретного дефекту.

Також необхідно максимально локалізувати місцезнаходження ймовірного місця неправильного підключення для швидкого усунення.

Часто неправильне підключення або зворотна полярність супроводжуються хаотичним перегрівом комірок фотоелектричних модулів усього стрінгу.

Якщо ж при вимірюванні струм відсутній, необхідно перевірити усі інші показники для конкретизації ймовірного дефекту.

Далі проводиться перевірка відсутності замикань на землю. Для цього по черзі (спочатку полюс «+», а потім «-») міряється напруга відносно землі. В умовах відсутності замикання на землю, напруга повинна стрімко спадати. Якщо ж напруга є сталою або починає хаотично змінюватись, то наявне замикання на землю. Якщо при перевірці на замикання на землю наявний спад напруги, необхідно перевірити цілісність запобіжників, які встановлені на даний стрінг і, якщо наявні пошкодження, замінити їх, після чого знову перевірити усі показники даного стрінгу.

Також під час експлуатації ФЕС має місце пошкоджуваність конекторів ФЕМ та іншого обладнання ФЕС такого, як силові трансформатори (СТ) класів напруг 10 та 35 кВ.

Під час експлуатації силових трансформаторів на ФЕС вони піддаються впливу різних впливів (електричних, механічних, атмосферних та ін.). Проаналізуємо причини відмов силових трансформаторів.

З проведеного аналізу видно, що технічний стан СТ характеризується різними параметрами, які впливають та загальний технічний стан СТ. Так, наприклад, в процесі експлуатації стан механічної частини СТ погіршується, присутній і факт природнього старіння. Ізоляція поступово втрачає свої властивості, якість контактних з'єднань погіршується, під дією механічних сил з'являються вібрації в обмотці, що сприяють прискореному пошкодженню ізоляції, зсуву обмотки вниз, виникненню часткових розрядів в обмотці, коротким замкненням між витками. Через електричні та електродинамічні сили відбувається зсув основних обмоток, причому такий дефект характеризується різною деформацією, наприклад, осьовий рух чи радіальний рух витків обмоток. Основні та часті пошкодження силових трансформаторів можна поділити на:

- а) пошкодження ізоляції: погіршення якості оливи; різке зниження рівня оливи; ненормальне підвищення температури оливи і місцеві перегріви; дефекти міжлистової (паперової) ізоляції (Рис. 5);
- б) пошкодження введів: пробій на корпус; замикання введів різних фаз між собою; негерметичність корпусу; неякісне армування; нагрів фарфору; нагрів сталевого фланця;
- в) пошкодження обмотки: виткове замикання; обрив обмоток; пробій на корпус; міжфазне коротке замикання; замикання паралельних проводів в витках гвинтової обмотки в місці транспозиції; обрив одного або декількох паралельних проводів у витку обмотки; радіальна деформація витків;
- г) пошкодження магнітопроводу: місцеве замикання пластин шихтованої сталі і «пожежа в сталі»; місцеве пошкодження ізоляції пластин сталі, що викликає замикання пластин сталі; підвищена вібрація; обрив заземлення;

- д) пошкодження РПН: оплавлення або вигорання контактних поверхонь; перекриття між фазами або окремими відгалуженнями (дефект подібний міжфазному короткому замиканню обмоток);
- ж) пошкодження системи охолодження: механічна деформація радіатора; вихід з ладу циркуляційного насосу; вихід з ладу системи примусового дуття;
- з) пошкодження баку: підтікання баку трансформатора (негерметичність); підтікання оливи в місцях з'єднань; механічне пошкодження.

Враховуючи таке різноманіття пошкоджень СТ, стає зрозуміло, що контролюючи один параметр та використовуючи один метод діагностування поточний технічний стан СТ визначити неможливо. Пропонується дослідити методи та засоби контролю технічних параметрів СТ з метою визначення його поточного стану.

Враховуючи таке різноманіття пошкоджень СТ, стає зрозуміло, що контролюючи один параметр та використовуючи один метод діагностування поточний технічний стан СТ визначити неможливо. Пропонується дослідити методи та засоби контролю технічних параметрів СТ з метою визначення його поточного стану.

Одним із виходів з такої ситуації, є своєчасне технічне обслуговування за результатами діагностування, що дасть змогу експлуатуючому підприємству бути готовим до повного виходу з ладу СТ, та максимально можливо збільшити термін його експлуатації. Насамперед такі рішення можливо забезпечити шляхом виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку. Та для реалізації такого завдання необхідний надійний інструмент діагностування. Одним із таких методів являється метод частотного діагностування СТ.

До пошкоджень СТ відносять осьову та радіальну деформацію і зсув витків обмоток.

Висновки

Враховуючи вартість силових трансформаторів на ФЕС та їх пошкоджуваність потрібно використовувати засоби on-line моніторингу їх технічного стану, а також сучасні методи та засоби періодичного контролю діагностичних параметрів.

Комплексне використання тепловізорів, квадрокоптерів, вимірювачів ВАХ ФЕМ, FRA аналізаторів та іншого сучасного діагностичного обладнання дозволяє виявляти пошкодження обладнання ФЕС на ранній стадії їх розвитку, а також доцільність, час, обсяги ремонту та заміни такого обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Belik, V. Kuchanskyu, O.E., Rubanenko, O.O. Rubanenko, «Method for Determining the Resonant Frequencies of Extra High Voltage Power Transmission Line.» *Przegląd Elektrotechniczny*. № 10. Pp. 39-42, 2023.
- [2] M. Belik, «Optimization of energy accumulation for renewable energy sources.» *Renewable Energy and Power Quality Journal*, №19, Pp. 205–210, 2023.
- [3] M. Belik, O. O. Rubanenko, «Implementation of Digital Twin for Increasing Efficiency of Renewable Energy.» *Sources Energies*. №16(12), P.4787, 2023.
- [4] M. Belik, O. O. Rubanenko, «Evaluation of long term degradation process of monocrystalline si photovoltaic panels.» *Renewable Energy and Power Quality Journal*, №431. Pp. 551–555, 2020.
- [5] М. Гришук, О. Є. Рубаненко, та І. Гунько, «Дослідження пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електростанції». *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6. С. 178–183, 2019.
- [6] В. Комар, П. Лежнюк, І. Гунько, І. Смагло, «Оцінювання технічного стану обладнання фотоелектричних станцій програмно-апаратними засобами.» / Комар В.О., Лежнюк П.Д., Гунько І.О., Смагло І.І. // *Відновлювана енергетика*, № 1. С. 19–26, 2023.

Рубаненко Олександр Євгенійович — к.т.н., професор, професор кафедри електричних станцій і систем, e-mail: rubanenkae@ukr.net;

Смагло Іван Іванович — аспірант каф. електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**О. Е. Rubanenko
I. I. Smaglo**

Damage and diagnosis of power transformers of photovoltaic plants

Vinnitsa National Technical University

The damage to the equipment of photovoltaic plants (PHS) was studied. The main attention is paid to oil-filled transformers with a voltage of 10/0.4 kV, 35/0.4 kV, 35/10/0.4 kV with a capacity of up to 5 MVA and the development of an algorithm for determining probable places of damage to photovoltaic modules, which allows you to choose diagnostic equipment. The use of such equipment will ensure the detection of damage to power transformers and photovoltaic modules at an early stage of their development, as well as timely measures aimed at preventive repairs, reduce the number of transformer damages, downtime and repair of damaged power transformers that were damaged during their operation on FES. Operation of power transformers at photovoltaic plants involves their frequent switching on and off. High-voltage vacuum switches designed for a voltage of 10 kV or 35 kV are used as high-voltage switching devices. The capacity of inverters, the inductance of the windings of power transformers, the inductance of the windings of measuring voltage transformers, the capacity of cable lines and inserts under the conditions of using vacuum switches create prerequisites for the occurrence of commutation overvoltages, the occurrence of resonances in circuits (power transformer, cable insert or cable line, measuring voltage transformer). Increased thunderstorm activity is observed in the places of operation of some photovoltaic plants. The electrical equipment of these stations is affected not only by switching (internal overvoltages), but also by atmospheric overvoltages. To protect against overvoltages, arresters (type RVO, RVS, etc.) and overvoltage limiters are used. The damage of these surge arresters and limiters indicates the existence and intensity of overvoltages. Damage to cable inserts and cable couplings, voltage measuring transformers at photovoltaic stations and in electrical networks near these stations also testify to the negative impact of overvoltages on the FES equipment, including power transformers of these stations.

Key words: power transformers, photovoltaic stations, damage, photovoltaic modules, inverters, diagnosis algorithm, thermal imaging control, monitoring.

Keywords: origin of electricity, mathematical model, low-carbon energy sources, renewable sources of energy, matrix of LCES power distribution coefficients

Rubanenko Oleksandr Yevheniyovych – candidate of technology of Sciences, professor, professor of the department of electrical plants and systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. *e-mail: rubanenkoa@ukr.net.*

Smaglo Ivan Ivanovich – Post-Graduate Student; e-mail:smagloivan91@gmail.com.