

ДО ПИТАННЯ ТЕПЛОДІАГНОСТИКИ ОБМОТОК СТАТОРА СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто актуальні питання теплодіагностики обмоток статора потужних синхронних генераторів у процесі тривалої експлуатації. Проаналізовано взаємозв'язок між деградацією ізоляційних систем та зміною їхніх теплофізичних властивостей. Визначено фізичні механізми старіння ізоляції та їх вплив на достовірність температурного моніторингу.

Ключові слова: синхронний генератор, обмотка статора, теплодіагностика, термодеградація ізоляції, теплопровідність.

Abstract

The paper considers topical issues of thermal diagnostics of stator windings of powerful synchronous generators during long-term operation. The relationship between the degradation of insulation systems and the change in their thermophysical properties is analyzed. The physical mechanisms of insulation aging and their influence on the reliability of temperature monitoring are determined.

Keywords: synchronous generator, stator winding, thermal diagnostics, thermal degradation of insulation, thermal conductivity.

Надійність енергосистеми залежить від технічного стану потужних турбо- та гідрогенераторів. Одним із найбільш вразливих вузлів генератора є ізоляція обмотки статора, яка піддається комплексному впливу високих температур, електричних полів та механічних вібрацій. Теплодіагностика дозволяє виявити дефекти на ранніх стадіях, проте інтерпретація даних моніторингу потребує врахування еволюції властивостей ізоляційних матеріалів.

Тривала експлуатація призводить до незворотних змін у структурі ізоляції (від бітумно-масляної до сучасних нанокompозитних систем). Основними факторами пошкодження є:

- Термічне старіння: деструкція полімерних сполучних, що спричиняє появу газових включень.
- Розшарування: утворення повітряних прошарків між провідником та ізоляцією, що різко знижує ефективний коефіцієнт теплопровідності.
- Часткові розряди: ерозія матеріалу в місцях локальної концентрації напруженості електричного поля.

Зміна теплофізичних характеристик ізоляції безпосередньо впливає на точність діагностики. Утворення мікротріщин та розшарувань діє як «тепловий бар'єр», через що температура міді обмотки може бути значно вищою за ту, яку реєструють штатні датчики температури, розташовані в пазах статора. У роботі показано, що для достовірної оцінки стану необхідно переходити від прямого вимірювання температури до математичного моделювання теплових потоків з урахуванням змінного теплового опору ізоляції.

Основним показником теплового стану є температура міді обмотки T_{Cu} , яка визначається балансом втрат та ефективністю тепловіддачі. Рівняння теплового балансу для пазової частини обмотки можна представити як:

$$P_{cm} = \frac{T_{Cu} - T_{st}}{R_{iz}} + C \frac{dT_{Cu}}{dt},$$

де T_{st} – температура сталі статора; R_{iz} – тепловий опір ізоляції; C – теплоємність обмотки.

Тепловий опір ізоляції R_{iz} є ключовим параметром діагностики. Він залежить від геометричних розмірів та коефіцієнта теплопровідності матеріалу λ :

$$R_{iz} = \frac{\delta}{\lambda \cdot S},$$

де δ - товщина ізоляції; S – площа поверхні теплообміну.

Фізика процесів деградації. Протягом тривалої експлуатації (понад 20 років) коефіцієнт λ суттєво зменшується через термодеструкцію полімерів. Поява повітряних включень ($\lambda_{air} = 0,026$ Вт/(м·К)) у структурі монолітної ізоляції ($\lambda_{iz} = 0,25-0,5$ Вт/(м·К)) призводить до різкого зростання загального теплового опору. Це описується моделлю еквівалентної теплопровідності багатшарового середовища:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum \delta_i}{\sum (\frac{\delta_i}{\lambda_i})},$$

Навіть незначне розшарування ізоляції товщиною 0,1 мм може підвищити температурний градієнт на 10-15°C, що не завжди фіксується штатними термометрами опору, розташованими між стержнями або на дні паза.

Сучасна теплодіагностика базується на аналізі температурних аномалій ΔT . Однак, при старінні ізоляції спостерігається ефект «теплого маскування»: через зростання R_{iz} тепловий потік від міді до датчика зменшується, що може призвести до хибних висновків про нормальний стан обмотки при фактичному перегріві міді.

Висновки

Для забезпечення надійної експлуатації генераторів необхідно впроваджувати алгоритми непрямого обчислення температури міді на основі розв'язання обернених задач теплопровідності. Це дозволяє врахувати динамічну зміну теплофізичних властивостей ізоляції та попередити аварійні ситуації, спричинені прихованими локальними перегрівами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 1. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
2. Zhang, S. Coupled electromagnetic–fluid–thermal analysis of a fully air-cooled generator motor // Machines. – 2023. – Vol. 11.
3. Yang, X. Study on air-cooled structure of direct-drive outer-rotor PMSG // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15.
4. Dong, L. Three-dimensional fluid-structure interaction in turbo-generator // Springer Nature. – 2022.

Бомбик Вадим Сергійович – к.т.н., ст. викл. кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bombyk.v.s@vntu.edu.ua

Vadym Bombyk – Phd, senior lecturer, department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bombyk.v.s@vntu.edu.ua