

КУТИН В. М.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5667-7323>e-mail: ymkytin@gmail.com

КУТИНА М. В.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7185-6795>e-mail: mkytina@gmail.com

ШПАЧУК О. О.

ВП «Хмельницька атомна електростанція»

<https://orcid.org/0000-0001-6946-2551>e-mail: shpachuk2@gmail.com

МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ БЛОКУ «ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР»

Значний ступінь зношення основного електротехнічного обладнання схеми видачі потужності (синхронні генератори, комплектні екрановані струмопроводи, трансформатори) теплових та атомних електричних станцій, впровадження політики продовження строків експлуатації існуючих енергоблоків електростанцій, а також поступове впровадження стратегії ремонту обладнання за технічним станом, обумовлює актуальність питання розробки нових та вдосконалення існуючих систем контролю технічного стану електрообладнання загалом та його ізоляційних характеристик зокрема.

Засоби діагностування ізоляції, засоби релейного захисту та інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час на енергоблоках електричних станцій, не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції електрообладнання як опір та ємність ізоляції відносно землі та тангенс кута діелектричних втрат, що унеможливує виявлення дефектів в ізоляції на ранній стадії їх розвитку. Засоби релейного захисту можуть бути нечутливими до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі та при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора, а також хибно спрацьовувати при пусках блоків через несиметрію напруг у фазах генераторів.

В роботі запропоновано метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання в колі блоку «генератор-трансформатор», що ґрунтується на комбінованому накладанні постійного струму та змінного струму з частотою меншою за промислову, контролі струму розряду попередньо зарядженого конденсатора та контролі розтікання змінного струму за допомогою котушок Роговського. Запропонований метод дозволить виявляти як стрибкоподібну, так і поступову зміну технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор», покращити якість планування ремонтних робіт та пришвидшить пошук несправних елементів у випадку виникнення пошкодження.

Ключові слова: синхронний генератор, трансформатор напруги, струмопровід, пошкодження ізоляції, інформаційно-вимірювальна система.

Vasil KUTIN, Marina KUTINA

Vinnytsia National Technical University

Oleksandr SHPACHUK

Khmelnyskyi Nuclear Power Plant

METHOD OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE GENERATOR-TRANSFORMER UNIT

Significant wear of the main electrical equipment of the power supply scheme (synchronous generators, complete shielded power lines, transformers) of thermal and nuclear power plants, implementation of the policy of extending the service life of existing power units, and gradual implementation of equipment repair strategies according to technical condition determines the relevance of development of new and improvement of existing systems for monitoring the technical condition of electrical equipment in general and its insulation characteristics in particular. Insulation diagnostics, relay protection devices and information-measuring systems currently operated on power units do not allow tracking changes in electrical insulation parameters of electrical equipment such as insulation resistance and capacitance relative to ground and tangent angle of dielectric loss detection that makes detection of defects in isolation at an early stage of their development impossible. Relay protection devices can be insensitive to single-phase earth faults of the stator winding near the neutral and with a symmetrical decrease in the insulation parameters of the stator winding, as well as malfunction when starting units due to voltage asymmetry in generator phases.

The method of control of technical condition of electrical equipment insulation in the generator-transformer unit circuit is proposed, which is based on combined superimposition of direct current and alternating current with frequency less than industrial, control of discharge of precharged capacitor and control of alternating current flow with Rogovsky coils. The proposed method will detect both abrupt and gradual changes in the technical condition of the insulation of electrical equipment of the "generator-transformer" unit, improve the quality of planning of repair work and speed up the search for faulty elements in case of damage.

Key words: synchronous generator, voltage transformer, current conductor, insulation damage, information-measuring system.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час на енергоблоках електричних станцій забезпечують контроль значного переліку технологічних параметрів, що характеризують режим

роботи синхронних генераторів до яких входять: електричні параметри (струми у фазах, лінійні чи фазні напруги на виводах машин, генерована потужність, контроль рівня часткових розрядів в ізоляції обмотки статора), теплотехнічні параметри (температура стержнів статорної обмотки та обмотки ротора, осердя статора, температура і витрати охолоджувача; температура підшипників, оливи та води в системі охолодження), механічні параметри (рівні вібрації статора та підшипників) а також параметри, що характеризують стан чи положення технологічної арматури та допоміжного устаткування. Проте такі інформаційно вимірювальні системи не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції синхронних генераторів та іншого устаткування блоку «генератор – трансформатор» як опір та ємність ізоляції обладнання відносно землі, а також тангенс кута діелектричних втрат, що унеможлиблює виявлення погіршення технічного стану ізоляції на ранній стадії його розвитку.

Сучасні пристрої релейного захисту надають захист від усіх видів пошкоджень електрообладнання блоку «генератор – трансформатор» і ненормальних режимів їх роботи, забезпечують високий рівень селективності, чутливості та, завдяки мікропроцесорній елементній базі, швидкодії. Проте вони позбавлені можливості виявлення погіршення стану ізоляції на ранній стадії розвитку дефектів.

Виходячи з описаного вище існує актуальна науково-практична задача з розробки та впровадження системи контролю електричних параметрів ізоляції в схемі видачі потужності блоку «генератор-трансформатор», вирішення якої дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан ізоляції електрообладнання.

В даній роботі об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор – трансформатор». Предметом дослідження є методи і засоби контролю технічного стану електричних параметрів ізоляції електрообладнання та релейного захисту електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» від електричних пошкоджень.

Метою дослідження є розширення функціональних можливостей системи контролю технічного стану ізоляції шляхом застосування комбінованого методу контролю, що ґрунтується на використанні накладання на контрольоване коло постійного та змінного струму частотою 20 Гц і струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, що дозволяє виявити поступову та стрибкоподібну зміну активного опору ізоляції статора, екранованого струмопроводу та обмотки трансформатора напруги вмонтованого у струмопровід.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботах [1, 2] розглянуто принципи побудови систем релейного захисту та розрахунку уставок спрацювання. У [3] показано принципи побудови релейного захисту електрообладнання в мережах з компенсованою нейтраллю. В роботах [4, 5] висвітлено особливості побудови релейного захисту елементів електричних систем загалом та синхронних генераторів зокрема. У публікації [6] висвітлено досвід використання сенсорів типу котушок Роговського у побудові систем релейного захисту.

Результати дослідження

Для виконання поставленої задачі пропонується використати комбінований метод накладання постійного струму, використання енергії попередньо зарядженого конденсатора, накладання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та контролю протікання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, в обладнанні блоку «генератор-трансформатор» за допомогою сенсорів типу котушок Роговського. Реалізація накладання постійного струму та використання енергії попередньо зарядженого конденсатора необхідна для виявлення стрибкоподібної зміни стану ізоляції та визначення перехідного опору в місці виникнення пошкодження типу однофазного замикання на землю. Накладання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та контроль протікання даного струму на виводах електрообладнання забезпечить визначення та контроль зміни активного опору та ємності ізоляції електрообладнання при поступовій зміні стану ізоляції. Контроль протікання змінного струму з частотою, що нижча за номінальну, можна реалізувати з улаштуванням сенсорів типу котушок Роговського наступним чином:

- для синхронного генератора – на лінійних виводах та виводах нейтральної точки;
- для трансформаторів напруги що підключені до мережі генераторної напруги – на частині корпусу, що контактує із заземленими конструкціями;
- для трансформаторів напруги, що вбудовані в комплектний екранований струмопровід – на лінійних виводах та частині корпусу, що контактує з екраном струмопроводу;
- для струмопроводу – на екранах струмопроводу поблизу місця заземлення струмопроводу перед алюмінієвими перемичками, що з'єднують екрани між собою.

Зазначене розташування сенсорів дозволить реалізувати пофазний контроль стану ізоляції основного електрообладнання блоку генератор-трансформатор, а у випадку виникнення пошкодження, прискорити пошук пошкодженого елемента в схемі блоку «генератор – трансформатор». Для захисту від впливу на результати вимірювань завад необхідним буде використання фільтрів верхніх частот на виводах трансформаторів напруги та сенсорах типу котушок Роговського.

Запропонована система контролю ізоляції працює таким чином. Блок живлення U2 забезпечує живлення блоків обробки сигналу напруги частотою 20 Гц U9, обробки сигналу струму частотою 20 Гц U6, обробки сигналів від сенсорів типу котушок Роговського U1, обробки сигналу постійного струму, що накладається на статорну обмотку U8, обробки сигналу струму розряду попередньо зарядженого конденсатора U7, а також блоку керування U10, що здійснює керування системою контролю ізоляції та формує вихідні сигнали для оперативного персоналу енергоблоку. Сигнал змінного струму з частотою 20 Гц, від блоку накладання змінного струму U4 через смуговий фільтр U3 та резистор R_1 вводиться в схему блоку генератора-трансформатор через трансформатор напруги TV. До блоку обробки сигналу напруги частотою 20 Гц U9 через резистор R_2 від смугового фільтра U3 підводиться напруга U_5' , що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається. До блоку обробки сигналу струму частотою 20 Гц U6 через трансформатор струму ТА1 підводиться струм I_5' , що пропорційний струму I_2' , в колі з джерелом накладеної напруги змінного струму частотою 20 Гц. Сигнали струму від сенсорів типу котушок Роговського та блоків фільтрів і підсилювачів U1.1-U1.18, що розташовані на обладнанні в схемі блоку генератор-трансформатор подаються до блоку обробки сигналів струму від сенсорів струму типу котушок Роговського U1. Сигнал постійного струму формується блоком живлення U6 та через резистори R_4 , R_6 та вимірювальні шунти R_3 , R_5 підводиться до обмотки статора генератора через нейтральну точку обмотки високої напруги TV. Обробка сигналу здійснюється блоком U8. Сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора C_2 формується в результаті виникнення раптового замикання на землю та надходить на обробку до блоку U9. Їмність C_1 та нелінійний обмежувач перенапруг FV1 встановлюються для забезпечення захисту від завад та можливих перенапруг.

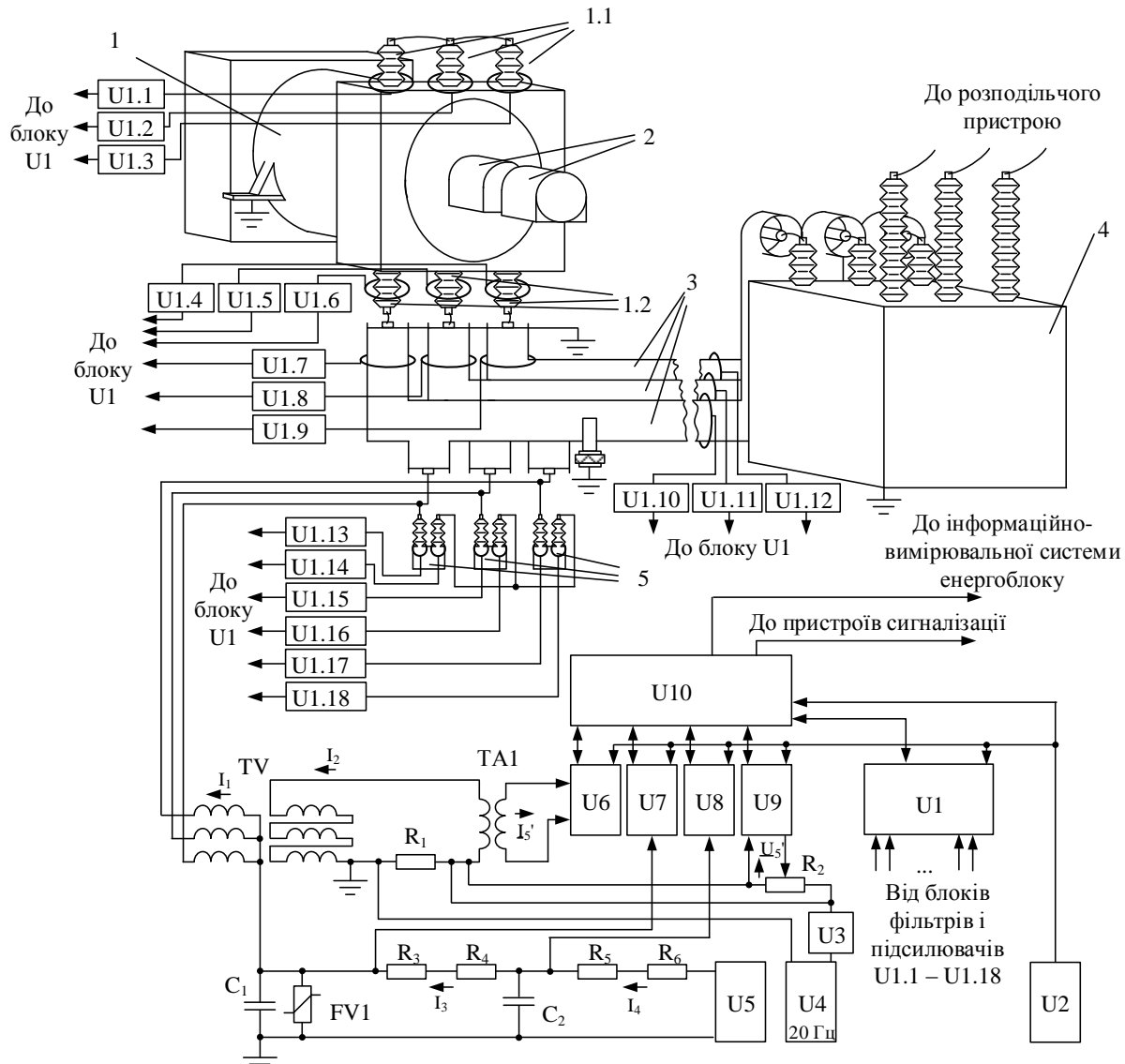


Рис. 1. Структурна схема системи контролю ізоляції, де 1 – генератор, 1.2 – лінійні виводи генератора, 1.1 – виводи нейтральної точки генератора; 2 – будинки генератора; 3 – комплектний екранований струмопровід; 4 – блочний трансформатор; 5 – трансформатор напруги

При справному стані ізоляції обладнання блоку «генератор-трансформатор» струм частотою 20 Гц, що стікає через ізоляцію на землю незначний. При поступовому зниженні опору ізоляції контрольованого

обладнання збільшується струм частотою 20 Гц, що стікає через ізоляцію на землю. Дану зміну струму фіксують сенсори типу котушок Роговського та через блоки фільтрів та підсилювачів U1.1-U1.18 передають до відповідного блоку обробки U1, а далі до блоку керування U10.

Розрахунок параметрів ізоляції електрообладнання здійснюватиметься за допомогою визначення різниці струмів частотою 20 Гц на лінійних виводах та виводах нульової точки обладнання з врахуванням напруги сигналу частотою 20 Гц та кутів між ними за такими співвідношеннями:

$$Z_{iz} = (k \cdot \underline{U}_5') / (I_{UL} \cdot e^{j\omega t + \varphi_L} - I_{UN} \cdot e^{j\omega t + \varphi_N}), \quad (1)$$

де Z_{iz} – повний опір ізоляції фази електрообладнання відносно землі; k – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги; U_5' – напруга, що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається на статорну обмотку; I_{UL} – струм частотою 20 Гц на лінійних виводах обладнання; I_{UN} – струм частотою 20 Гц на виводах нульової точки обладнання; ω – кутова частота; φ_{UL} – кут зсуву фази струму на лінійних виводах обладнання; φ_N – кут зсуву фази струму на виводах нейтральної точки обладнання

$$R_{iz} = \text{Re}(Z_{iz}), \quad (2)$$

де R_{iz} – активний опір ізоляції електрообладнання відносно землі;

$$X_{iz} = \text{Im}(Z_{iz}), \quad (3)$$

де X_{iz} – реактивний опір ізоляції електрообладнання відносно землі;

$$C_{iz} = 1/(\omega \cdot X_{iz}), \quad (4)$$

де C_{iz} – ємність ізоляції електрообладнання відносно землі

$$\text{tg} \delta = 1/(C_{iz} \cdot \omega \cdot R_{iz}), \quad (5)$$

де $\text{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат ізоляції.

Розраховані значення опору ізоляції обладнання відносно землі, ємності ізоляції відносно землі та тангенсу кута діелектричних втрат, що надходять до інформаційно-виміральної системи енергоблоку дозволять організувати додатковий контроль за станом обладнання з погіршеними значеннями параметрів ізоляції, запланувати додаткові обсяги ремонтних робіт, завчасне виведення обладнання в ремонт без його пошкодження, або полегшать пошук пошкодженої ланки в колі «генератор-трансформатор».

У випадку виникнення раптового замикання на землю в перші моменти струм через R_5 , R_6 змінюватися не буде, натомість на струм I_4 , що протікає через резистор R_4 буде накладатися струм розряду попередньо зарядженого конденсатора C_2 . Максимальне значення результуючого струму I_3 через резистор R_4 і шунт R_3 зворотно пропорційне перехідному опору в місці замикання на землю R_p

$$R_p = (s + fI_3) / (1 + gI_3 + hI_3^2), \quad (6)$$

де I_3 – сигнал струму розряду попередньо зарядженого конденсатора; s , f , g , h – коефіцієнти, що обумовлюються параметрами резисторів, а також активним та індуктивним опорами первинної обмотки трансформатора напруги.

Таким чином, можна реалізувати контроль ізоляції генератора та трансформаторів напруги, що вбудовані в струмопровід. Параметри ізоляції комплектного екранованого струмопроводу можна визначити як різницю струмів частотою 20 Гц, яка накладається системою контролю ізоляції блоку «генератор-трансформатор» та струмів, що фіксують сенсори які встановлені на решті контрольованого обладнання в колі «генератор трансформатор», з врахуванням напруги сигналу частотою 20 Гц та кута між ними.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Реалізація контролю електричних параметрів ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан обладнання та забезпечить можливість прогнозування зміни технічного стану та реалізації ремонту і обслуговування електрообладнання за технічним станом.

2. У випадку виникнення пошкодження на обладнанні блоку «генератор-трансформатор», запропонована система дозволяє оперативно виявити пошкоджений елемент, що зменшить тривалість відновлювальних робіт та недовідпуск електроенергії.

Література

1. Sleva A. M. Protective Relay Principles. CRC Press, 2009, 368 p. ISBN 9780824753726.
2. Thomas E. Baker Electrical Calculations and Guidelines for Generating Stations and Industrial Plants. CRC Press, 2012, 274 p. ISBN 978-1-4398-5521-8.
3. Loos M. Single Phase to Ground Fault in Compensated Network. Lambert Academic Publishing, 2014, 228 p.
4. Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, Florida, USA,

Taylor&Francis Group CRC Press, 2005, 592 p.

5. Thompson M. IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators. Second Edition. Special publication of the IEEE. 2011. 113 p.

6. Kojovic L. A. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying. IEEE PSRC Special Report. 2010. 72 p.