

## СУКУПНІСТЬ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ПАРАМЕТР СПРАЦЮВАННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ В БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ

Кутін В.М., Шпачук О.О.

Вінницький національний технічний університет

У даний час на електричних станціях для релейного захисту генераторів, що працюють в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю обмотки статора використовується широкий спектр пристроїв захисту. Дані захисти мають ряд принципових недоліків, таких як, нечутливість до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі, нечутливість захистів при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора. Також існує можливість хибних спрацювань при пусках блоків через несиметрію напруг у фазах машини, особливо гостро це проявляється в синхронних гідрогенераторах. В роботі розглянуто сукупність параметрів, контроль яких дасть змогу реалізувати метод захисту від однофазних замикань на землю обмотку статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який ґрунтується на визначенні значення струму однофазного замикання на землю в місці його виникнення.

**Ключові слова:** синхронний генератор, обмотка статора, релейний захист, однофазне замикання на землю.

**Постановка проблеми.** Сучасні засоби захисту потужних синхронних генераторів (СГ), що працюють в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) обмотки статора повинні забезпечувати зону захисту, що охоплює всю обмотку статора, можливість виявлення пошкодження на ранній стадії його розвитку а також усувати можливість хибних спрацювань захисту внаслідок зміни режиму роботи генератора. Пристрої релейного захисту, що експлуатуються в даний час мають ряд принципових недоліків, таких як нечутливість до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі, нечутливість захистів при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора, а також можливість хибних спрацювань при пусках блоків через несиметрію напруг у фазах машини, особливо гостро це проявляється в синхронних гідрогенераторах.

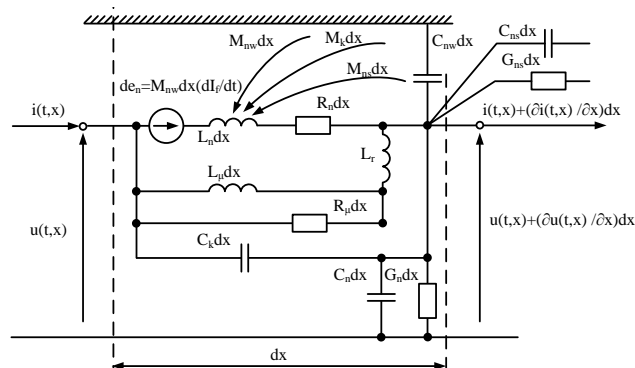
**Аналіз попередніх досліджень та публікацій.** В роботах [1-5] представлені основні підходи та принципи реалізації захистів від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором. У вказаних вище роботах показані переваги та недоліки методів захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором.

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення швидкодії та чутливості роботи захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, шляхом опосередкованого визначення струму однофазного замикання на землю в місці його виникнення.

**Матеріали дослідження.** Для реалізації методу захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, який працює в блоці з трансформатором, що ґрунтується на розрахунку струму в місці виникнення замикання, необхідно отримати аналітичний вираз для струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора. З цією метою варто розглянути різні складові моделі ОЗЗ обмотки статора СГ.

Схема заміщення елемента фазної обмотки генератора довжиною  $dx$  містить в своєму складі наступні елементи [6] (рисунк 1): власна індуктивність обмотки статора  $L_n$ , взаємна індуктивність між котушками обмотки однієї фази  $M_k$ , взаємна індуктивність між обмотками статора і обмоткою ротора  $M_{no}$ , взаємна індуктивність між обмотками фаз статора  $M_{ns}$ , активний опір обмоток статора  $R_n$ , еквівалентні

індуктивності розсіювання  $L_r$  і намагнічування сталевого ярма статора  $L_\mu$ , активний опір, що відображає втрати в сталі статора  $R_\mu$ , провідність ізоляції обмотки статора відносно сталі  $G_n$ , провідність ізоляції між фазою статора та іншими фазами обмотки  $G_{ns}$ , ємність обмотки статора відносно сталі  $C_n$ , ємність між котушками обмоток однієї фази  $C_k$ , ємність між обмоткою статора та обмоткою ротора  $C_{no}$ , ємність між обмотками статора  $C_{ns}$ , напруга, що індукується в обмотці статора від струму збудження ротора  $de_n$ .



**Рис. 1. Схема заміщення елемента фазної обмотки генератора довжиною  $dx$**

Описана вище модель в найбільш повній мірі відображає структуру та фізичні процеси, що протікають в статорі. Проте така модель є складною для використання в цілях розрахунку струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора. Для отримання моделі обмотки статора синхронного генератора, яка б максимально адекватно відображала процеси при виникненні однофазного замикання на землю та була простою. Будемо вважати, що:

- генератор має симетричну конфігурацію;
  - параметри генератора не залежать від частоти і струму;
  - знехтувано впливом зміни параметрів режиму обмотки ротора на режим в фазах статора;
  - знехтувано індуктивність контура, до якого входять еквівалентна індуктивність розсіювання та індуктивність намагнічування сталевого ярма;
- При подальшому перетворенні моделі ємність між котушками обмотки однієї фази, та активний опір,

що являє собою втрати в сталі статора представлені як розподілені опір та ємність, що ключені між початком та кінцем фазної обмотки деякої довжини.

Наступним кроком у перетворенні моделі було вилучення міжфазних індуктивних та ємнісних зв'язків шляхом складання рівнянь падіння напруги та зміни фазних струмів на ділянці довжини обмотки і використання співвідношень для перетворення фазних величин у складові прямої, зворотної та нульової послідовності.

Отримана таким чином модель містить в собі складові, що відображають активний опір обмотки статора, індуктивність, що відображає вплив власної індуктивності обмотки статора, взаємної індуктивності між котушками обмотки однієї фази і взаємної індуктивності між обмотками фаз статора а також параметри ізоляції фазної обмотки, що відображають ємність обмотки статора відносно землі та ємність між обмотками статора, а також провідність ізоляції статорної обмотки. Описана вище модель може адекватно відобразити процеси, що протікають в синхронному генераторі, проте вона, навіть в такому вигляді, є надзвичайно складною.

Подальше спрощення моделі полягає у зміні підходу до відображення елементів моделі, оскільки реалізувати контроль моделі, параметри якої є розподіленими, неможливо. Значення таких параметрів обмотки статора як індуктивність та активний опір не змінюються в широких межах впродовж експлуатації генератора. Змінюються вони тільки в результаті виникнення різного роду пошкоджень. Також слід враховувати те, що отримані вирази для струму в місці ОЗЗ з урахуванням активного опору обмотки та її індуктивності описуються з використанням гіперболічних функцій, що унеможливило їх використання для реалізації пристроїв захисту. Крім того реалізація схеми контролю опору та індуктивності обмотки значно ускладнить схему пристрою захисту. Організація контролю фазних електрорушійних сил СГ також становить складну задачу, оскільки виникає необхідність контролю струму збудження машини і подальшого розрахунку ЕРС, що ускладнить схему і знизить швидкодію пристрою захисту. Саме тому приймаємо рішення про контроль параметрів ізоляції фазних обмоток статора, а також значень фазних напруг.

Ще одним важливим елементом моделі однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора є електрична дуга, що виникає в місці пошкодження ізоляції обмотки статора. Через дугу відбувається з'єднання стержнів обмотки статора, що знаходяться під напругою, зі сталевим осердям статора чи корпусом генератора. Розглянемо процеси виникнення і горіння дуги ОЗЗ обмотки статора СГ з метою обрання моделі яка б адекватно описувала дугу і в той же час була достатньо простою для використання в розрахунках [7].

Горіння дуги викликає випаровування і розкладання ізоляції обмотки статора, виділення деіонізуючих газів зі стінок каналу, в якому горить дуга, швидке випаровування вологи і призводить до виникнення ударних тисків та повздовжньо-поперечого обдування дуги, що в свою чергу викликає інтенсивне охолодження дуги і швидке зростання її опору. Інтенсивність обриву струму дуги залежить від частки складової промислової частоти струму замикання на землю. Якщо дана складова має значну частку, то обрив струму дуги відбуватиметься швидше, але в той же час дуга причинятиме більші руйнування та іонізуючу дію. В результаті горіння дуги утворюється газовий пузир, що містить провідні та напівпровідні елементи. Найбільш

повне розкладання матеріалів ізоляції і вибухоподібне газотворення відбувається в районі стовбура дуги. Під дією тиску газів, що утворюються підчас розкладання ізоляції, відбувається виштовхування провідних часток, таких як вуглець та пари міді та заліза, від стовбура дуги до стінок каналу в якому горить дуга. Поблизу стінок каналу температура є значно нижчою і тому відбувається осідання провідних часток на стінки і утворення асфальтених та оксидів металів. Проте в результаті осідання парів не утворюються суцільні струмопровідні містки, проміжки між містами утворені ізолюючим матеріалом, що насичений воднем і має дещо кращі ізоляційні характеристики. Після погасання дуги температура всередині каналу знижується відбувається інтенсивне осідання на стінки каналу провідних часток і створюються сприятливі умови для повторного запалювання дуги в місці першого пробію ізоляції. По мірі того, як в місці пробію ізоляції, після кожного повторного запалювання дуги, накопичуються провідні елементи, скорочується часовий інтервал між повторними запалюваннями дуги і вона переходить до стійкого горіння.

Отже, дуга, що виникає при однофазному замиканні на землю, є закритою і горить в каналі, який утворюється після пробію ізоляції обмотки статора, довжина дуги практично не змінюється впродовж усього часу горіння. В якості моделі ОЗЗ обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, будемо використовувати послідовно увімкнені ключ та активний опір, які з'єднують фазу статора з землею.

В результаті проведеного вище аналізу маємо модель із зосередженими параметрами, яка включає в себе такі елементи, як провідності та ємності фаз ізоляції обмотки статора, фазні напруги а також ключ та активний опір, які з'єднують фазу статора з землею (рисунки 2).

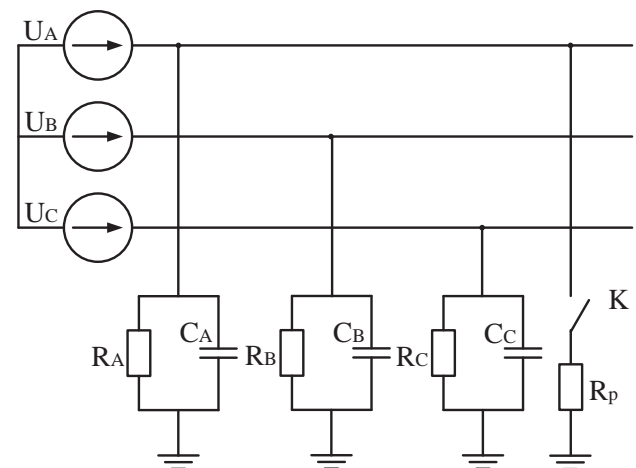


Рис. 2. Модель ОЗЗ обмотки статора синхронного генератора із зосередженими параметрами

Представлена вище модель здатна адекватно відобразити процес виникнення ОЗЗ обмотки статора, але існують проблеми з реалізацією контролю опору та ємності ізоляції кожної обмотки. Саме тому представлена модель потребує подальшого спрощення. Для моделювання процесу ОЗЗ обмотки статора СГ варто використати схему заміщення нульової послідовності (рисунки 3).

Дана схема включатиме в себе джерело напруги нульової послідовності  $U_0(p)$ , перехідний опір в місці замикання на землю  $R_p$ , загальний опір  $R_\Sigma$  та загальну ємність ізоляції обмотки статора  $C_\Sigma$ . Вра-

ховуючи те, що ємність ізоляції обмотки статора значно не змінюється в процесі експлуатації, то для розрахунку значення струму в місці виникнення ОЗЗ можна використати значення ємності отримані при періодичних вимірюваннях або довідникові значення. Вимірювання опору ізоляції обмотки статора та перехідного опору в місці замикання на землю можна реалізувати використовуючи метод накладання постійного струму та використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора. Схеми реалізації вимірювання фазних напруг, чи напруги нульової послідовності відомі.

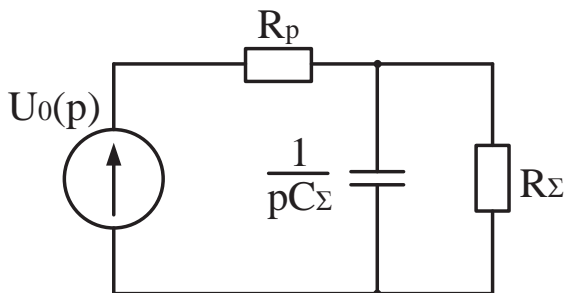


Рис. 3. Заступна схема нульової послідовності з елементами, що представлені в операторній формі запису

В операторній формі струм ОЗЗ обмотки статора СГ має вигляд:

$$I_p(p) = \frac{U_0 \left( \frac{e^{j0}}{p-j\omega} - \frac{e^{j0}}{p+j\omega} \right)}{2j \left( R_p + \frac{R_\Sigma \frac{1}{pC_\Sigma}}{R_\Sigma + \frac{1}{pC_\Sigma}} \right)} \quad (1)$$

Оригінал струму ОЗЗ обмотки статора СГ має вільну та вимушену складові, як показано в рівнянні представленому нижче:

$$I_p(t) = \frac{U_0 R_p \sin(\omega t) + U_0 R_\Sigma \sin(\omega t) + U_0 \omega^2 R_p C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 \sin(\omega t)}{\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2} + \frac{U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2 \cos(\omega t)}{\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2} - \frac{U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2 e^{\frac{-(R_p+R_\Sigma)}{R_p C_\Sigma R_\Sigma} t}}{\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2} \quad (2)$$

Струм ОЗЗ обмотки статора СГ можна вважати інтегральним показником технічного стану ізоляції обмотки статора, оскільки він враховує опір ізоляції обмотки статора, перехідний опір в місці замикання а також режим роботи генератора. Розглянемо можливі варіанти параметрів спрацювання захисту. Так струм ОЗЗ обмотки статора СГ містить

вільну та примусові складові і носить коливальний характер. Контроль миттєвих значень струму ОЗЗ не зможе забезпечити чіткого спрацювання пристрою захисту через постійну зміну його значення, а контроль пікового значення струму ОЗЗ не виправдано ускладнить проміжні розрахунки, а також реалізацію вимірювання контрольованих параметрів та тривалості перехідного процесу. З точки зору авторів доцільно в якості параметру спрацювання пристрою захисту від ОЗЗ обрати діюче значення примусової складової струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора (3)

$$I_{ps} = \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 \omega^2 R_p C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2} (\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)} \quad (3)$$

$$R_\Sigma = \frac{R_A R_B R_C}{R_A R_B + R_B R_C + R_A R_C} \quad (4)$$

$$C_\Sigma = C_A + C_B + C_C \quad (5)$$

де  $C_A, C_B, C_C$  – ємність обмотки статора фаз А, В та С, відповідно;  $R_A, R_B, R_C$  – опір ізоляції обмотки статора фаз А, В та С, відповідно;  $R_\Sigma$  – загальний опір ізоляції обмотки статора;  $C_\Sigma$  – загальна ємність ізоляції обмотки статора;  $R_p$  – перехідний опір в місці замикання на землю;  $U_0$  – максимальне значення напруги нульової послідовності.

Граничні умови для простого замикання ті ж самі, що для однофазного короткого замикання. Симетричні складові струмів в місці короткого замикання пов'язані з простими співвідношеннями [8]:

$$I_{k1}^{(1)} = I_{k2}^{(1)} = I_{k0}^{(1)} = \frac{1}{3} I_{k1}^{(1)} \quad (6)$$

Виходячи з таких міркувань можна розрахувати уставку спрацювання запропонованого захисту на відключення генератора від мережі. Для генераторів потужністю більше 160 МВт, що працюють в блоці з трансформатором, значення струму ОЗЗ, яке обумовлює відключення генератора від мережі становить 2 А, а отже значення складової нульової послідовності становитиме 0,667 А. Для генераторів потужністю до 160 МВт значення струму ОЗЗ, яке обумовлює відключення генератора, становить 5 А, а значення складової нульової послідовності становитиме 1,667 А.

**Висновки.** В роботі була проаналізована математична модель обмотки статора синхронного генератора. В результаті аналізу та спрощення моделі була отримана сукупність контрольованих параметрів а також визначено параметр спрацювання пристрою захисту від однофазних замикань на землю синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який ґрунтується на опосередкованому контролі струму в місці однофазного замикання на землю обмотки статора.

**Список літератури:**

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Э.М. Шнеерсон – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем/ Э.И. Басс, В.Г. Дорогунцев – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 296 с.
3. Федосеев А.М. Релейная защита электро-энергетических систем/ А.М. Федосеев, М.А. Федосеев – М.: 1992. – 528 с. – ISBN 5-283-01171-2.
4. Голговских А.В. Расчет релейной защиты блока турбогенератор – трансформатор / А.В. Голговских – Киров: 2000. – 54 с.
5. Копьев В.Н. Релейная защита основного электрооборудования электростанций и подстанций. Вопросы проектирования/ В.Н. Копьев – Томск: 2005. – 107 с.
6. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
7. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы/ С.А. Ульянов – М.: Энергоатомиздат, 1970. – 519 с.

**Кутин В.М., Шпачук А.А.**

Винницкий национальный технический университет

## **СОВОКУПНОСТЬ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В БЛОКЕ С ТРАНСФОРМАТОРОМ**

### **Аннотация**

В настоящее время на электрических станциях для релейной защиты генераторов, работающих в блоке с трансформатором, от однофазных замыканий на землю обмотки статора используется широкий спектр устройств защиты. Данные защиты имеют ряд принципиальных недостатков, таких как, нечувствительность к возникновению однофазных замыканий на землю обмотки статора вблизи нейтрали, нечувствительность защит при симметричном снижении параметров изоляции обмотки статора. Также существует возможность ложных срабатываний при пусках блоков из-за несимметрии напряжений в фазах машины, особенно остро это проявляется в синхронных гидрогенераторах. В работе рассмотрены совокупность параметров, контроль которых позволит реализовать метод защиты от однофазных замыканий на землю обмотку статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, который основывается на определении значения тока однофазного замыкания на землю в месте его возникновения.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, обмотка статора, релейная защита, однофазное замыкание на землю.

**Kutin V.M., Shpachuk O.O.**

Vinnitsia National Technical University

## **COMPLEX OF CONTROLLED PARAMETERS AND PARAMETER OF TRIGGERING OF PROTECTION DEVICE FROM SINGLE PHASE EARTH FAULTS OF STATOR WINDING SYNCHRONOUS GENERATOR WORKING IN THE UNIT WITH A TRANSFORMER**

### **Summary**

Currently, at the power plants for relay protection of generators operating in block with a transformer, from single-phase earth fault of the stator winding, using a wide range of protection devices. That devices have a number of disadvantages such as insensitivity to the emergence of single-phase earth fault of the stator winding near the neutral point of winding, insensitivity at symmetrical reducing of insulation parameters of stator winding. There is also the possibility of false positives when starting blocks through voltage asymmetry in the phases of the machine, it appears particularly acute in synchronous hydro generators. We consider a set of parameters, control of which will help implement the method of protection against earth fault phase stator winding synchronous generator that operates the block with a transformer, which is based on determining the value of the current single-phase ground fault at its source.

**Keywords:** synchronous generator stator winding, relay protection, single-phase ground fault.