

УДК: 621.316.1.027

В.М. КУТІН, д-р техн. наук, проф., М.В. КУТІНА, канд. техн. наук.
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ЇЇ АНАЛІЗ

Запропонована діагностична модель роботоздатності ізоляції двопровідних мереж постійного струму, які використовуються в промисловості і на транспорті. Визначені умови роботоздатності ізоляції шляхом аналізу перехідної характеристики струму через шунтувальний зв'язок, який модулює тіло людини. Шляхом аналізу запропонованої моделі визначено оптимальну функціональну характеристику для пристрою захисного вимикання. Отримано умови обмеження струму в перехідному і сталому режимі, а також опору ізоляції полюсів відносно землі при симетричному її зниженню. Показано, що ємність мережі постійного струму впливає лише на час існування перехідного процесу при дотику людини до струмоведучої частини. Струм через тіло людини має максимальну величину в перший момент дотику. Час дії електричного струму не обмежується сумарним часом спрацювання пристрою захисного вимикання та комутаційного апарата, що вимикає джерело живлення. Час протікання струму визначається ще й часом існування зворотної е.р.с. вимкнених двигунів постійного струму навантаження, а значення струму визначається законом зміни спадання е.р.с. електродвигунів постійного струму, що обертається. Функціональна характеристика пристрою захисного вимикання побудована за визначеними умовами роботоздатності ізоляції і виключає невикористані вимикання високопродуктивних машин і механізмів.

Ключові слова: двопровідна мережа постійного струму, робота здатність ізоляції полюсів відносно землі

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Як і в мережах змінного струму, в мережах постійного струму основною умовою визначення роботоздатності ізоляції є забезпечення безпеки експлуатаційного персоналу. Гранично допустимі рівні напруги дотику і струму при аварійних режимах виробничих установок не повинні перевищувати величин, визначених ГОСТ 12.1038-82. Правила побудови електроустановок вимагають оснащення двопровідникових мереж постійного струму засобами захисного вимикання, контролю ізоляції, захисного заземлення.

Періодичний та неперервний контроль ізоляції дозволяє підтримувати опір ізоляції полюсів мережі відносно землі на високому рівні шляхом визначення та усунення місць дефектів. Захисне заземлення знижує напругу дотику, яка може з'явитись під час порушення ізоляції на металевих частинах електроустановки, яка нормально не знаходиться під напругою. Пристрій захисного вимикання призначений для автоматичного вимикання електроустановок в разі однополюсного дотику людини, або виникненню шунтувального зв'язку, коли струм витікання перевершує нормовану величину.

Аналіз досліджень і публікацій. Існуючі методи і засоби контролю ізоляції полюсів є недосконалими. Найбільш розповсюдженими є мостові схеми [1-6]. Вони мають різний рівень чутливості до зміни значень провідності ізоляції окремих полюсів відносно землі та не реагують на симетричне зниження опору ізоляції полюсів. В методах схеми [2, 7-9, 11-13], які ґрунтуються на принципі накладання гармонічного сигналу на контрольовану мережу, чутливість до зміни технічного стану ізоляції полюсів залежить від співвідношення між ємністю і активною провідністю ізоляції полюсів відносно землі. Зниження рівня частоти гармонічного сигналу з метою зменшення впливу ємнісної провідності на результати контролю не дає бажаного результату, так як значно ускладнюється задача контролю реакції на сигнал, що накладається через втрати потужності стороннього джерела живлення і внаслідок високого рівня завад.

Підвищення точності методів безперервного контролю ізоляції здійснюється шляхом застосування комбінації методів контролю і дублювання експерименту на основі точних методів періодичного контролю ізоляції [8,10,14,15-18].

Існуючі пристрої захисного вимкнення забезпечують виконання стандартів електробезпеки (ГОСТ 12.1.038.82), але на всьому діапазоні зміни опору ізоляції полюсів, можливих при експлуатації мереж постійного струму, мають "перезахист", тобто хибне спрацювання і невикористані вимикання високопродуктивних машин і механізмів.

Отже, для підвищення рівня надійності, безпеки та ефективності використання двопровідних мереж постійного струму необхідно вдосконалити контроль ізоляції та захисного вимкнення.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення умов роботи здатності ізоляції двопровідної мережі постійного струму, шляхом аналізу динамічної характеристики через шунтувальний зв'язок між полюсом мережі і землею.

Викладення матеріалу та результати. Проаналізуємо умови роботоздатності ізоляції двопровідної мережі постійного струму безвідносно до використання конкретних засобів користуючись тільки нормами безпеки, наведеними в ГОСТ 12.1038-82. Двопровідну мережу постійного струму будемо розглядати як перетворювач вхідних сигналів у вихідні. Вхідним сигналом будемо вважати напругу $U_0 = const$ джерела постійного струму, а вихідним сигналом – струм через шунтувальний зв'язок. Враховуючи те, що граничним випадком є дотик людини з опором R_h , тоді, струм через тіло людини може бути визначений як

$$i_h(t) = \frac{U_0 R_1}{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)} \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_h (R_1 + R_2)} \exp \left[-\frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{2 C_1 R_1 R_2 R_h} t \right] \right),$$

де R_1, R_2 - омичний опір полюсів мережі відносно землі; C_1, C_2 - ємність полюса мережі відносно землі.

Струм через тіло людини має максимальну величину в перший момент дотику, тобто при $t = 0$

$$i_h(0) = U_0 R_1 / R_h (R_1 + R_2).$$

Навіть в тому випадку, коли застосовується пристрій захисного вимикання (ПЗВ), час дії електричного струму не обмежується сумарним часом спрацювання ПЗВ та комутаційного апарата, що безпосередньо вимикає джерело живлення, час протікання струму визначатиметься ще й часом існування зворотної е.р.с. вимкнених двигунів постійного струму навантаження.

Після вимикання мережі від джерела струму закон зміни струму $i_h(t)$ визначається законом зміни часу спадання зворотної е.р.с. електродвигунів постійного струму, що обертаються. Найбільший час існування зворотної е.р.с. має місце, коли двигун не навантажений – в режимі холостого ходу. Постійна часу спадання зворотної е.р.с. залежить також від способу гасіння поля електродвигуна. Системи приводів постійного струму можуть використовуватись різні, тому визначити найбільший або середній час існування зворотної е.р.с. неможливо без розгляду конкретної схеми електроприводу.

Для узагальнення будемо розглядати вимикання мережі ПЗВ за допомогою фідерного автоматичного вимикача, встановленого після джерела, і відсутність гасіння поля електродвигуна. Визначивши момент інерції J через маховий момент GD^2 , кутову швидкість через кількість обертів у хвилину, а електромагнітний обертаючий момент M_3 через витрати потужності P_1 з початковою кількістю обертів n_0 перед вимиканням двигуна, маємо перетворене рівняння руху

$$GD^2 \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{dn}{dt} = -\frac{P_1}{n_0}$$

або

$$T_{e,d} dn = -n_0 dt, \quad (1)$$

де $T_{e,d} = \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{GD^2 n_0^2}{P_1}$ – постійна часу вибігу електродвигуна.

Інтегруючи рівняння (1) в межах n_0 до n , для проміжку часу від 0 до t отримаємо

$$e = K_e n_0 \Phi_e \left(1 - (t/T_{e,d}) \right). \quad (2)$$

Із виразу (2) видно, що зворотна е.р.с. в разі самогальмування вимкненого двигуна постійного струму без гасіння його поля для випадку $M_c = const$, змінюється за лінійним законом.

З урахуванням (1), (2) максимальна величина струму через тіло людини після вимкнення мережі

$$i_h(0) = e R_1 / R_h (R_1 + R_2) = \left(K_e \Phi_e n_0 \left(1 - (t/T_{e,d}) \right) R_1 \right) / R_h (R_1 + R_2). \quad (3)$$

Постійна часу $T_{e,d}$ залежить від конструктивних елементів частин механізму навантаження на двигун, що обертається, типу двигуна, втрат на тертя та інших факторів і може змінюватись в широких межах, досягаючи десятків секунд. В зв'язку з цим можна вважати, що за час дії ПЗВ та комутаційного апарату $t_{відк}$, струм через людину не буде зменшуватись, залишаючись максимальним, тобто

$$i_h(0) = i_{h\text{дон}} = U_0 R_1 / R_h (R_1 + R_2),$$

де $i_{h\text{дон}}$ - гранично допустимий струм через тіло людини коли час дії $t = t_{відк}$, який визначається ГОСТ 12.1038-82.

У сталому режимі

$$I_h = I_{h\text{дон}} = U_0 R_1 / (R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)), \quad (3)$$

де $I_{h\text{дон}}$ - граничнодопустимий струм через тіло людини коли час дії більше 1 с.

Вважаючи, що $i_{h\text{дон}} = m I_{h\text{доп}}$, із рівняння (3) можна визначити допустиму величину опору шунтувального зв'язку в перехідному режимі

$$R_{3.від*}^{(n)} \geq 1/m \left(1 + \left(R_{2*} / R_{1*} \right) \right), \quad (4)$$

а із рівняння (3) для сталого режиму

$$R_{3.від*}^{(c)} \geq \left(1 - R_{2*} \right) / \left(1 + \left(R_{2*} / R_{1*} \right) \right), \quad (5)$$

де $R_{3.від*} = R_{3.від} I_{h\text{дон}} / U_0$; $R_{1*} = R_1 I_{h\text{дон}} / U_0$; $R_{2*} = R_2 I_{h\text{дон}} / U_0$ - відповідно відносні величини опору замикання та полюсів в мережі відносно землі.

Аналіз рівнянь (4) та (5) показав, що коли $R_{1*} = \text{const}$ і зміні опору ізоляції від'ємного полюсу в межах $(m-1)/m \leq R_{2*} \leq \infty$ переважають вимоги до обмеження струму в перехідному режимі і $R_{3.від*}$ визначається за рівнянням (4), а коли $0 \leq R_{2*} \leq (m-1)/m$, переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і $R_{3.від*}$ визначається за рівнянням (5), його величина $R_{3.від*} \leq 1$.

В реальних умовах існує необхідність обмеження симетричного зниження опору ізоляції полюсів мережі R_m як за умовами електробезпеки, так і утворенню небезпечного шунтувального зв'язку для навантаження двопровідникової мережі постійного струму. Враховуючи те, що найбільш несприятливим буде випадок дотику людини з мінімальним опором його тіла, яке згідно ГОСТ 12.1038-82 приймається $R_h = R_{\text{донmin}} = 6 \text{кОм}$, а $R_1 = R_2 = R_m$ і переважають вимоги обмеження струму в сталому режимі із (3) можна визначити

$$R_{m*} = 1 - 2R_{\text{донmin}*}, \quad (6)$$

де $R_{m*} = R_m I_{h\text{дон}} / U_0$; $R_{\text{донmin}*} = R_{\text{донmin}} I_{h\text{дон}} / U_0$.

Отже, рівняння (4)-(6) є умовами роботоздатності ізоляції. Згідно ГОСТ 12.1038-82 $i_{h\text{дон}} \leq 200 \text{мА}$; $I_{h\text{дон}} \leq 15 \text{мА}$, тому коефіцієнт m в рівняннях (4), (6) приймається $m = 13,3$.

Для оперативних мереж постійного струму, які використовуються на електричних станціях та підстанціях і пристрої контролю ізоляції яких діють на сигнал, правила побудови електроустановок рекомендують норми, згідно з якими зниження опору ізоляції одного з полюсів допускають до 20 кОм в мережі 220 В, до 10 кОм в мережі 110 В, до 5 кОм в мережі 48 В і до 3 кОм в мережі 24 В. Умовою роботоздатності ізоляції є неперевикнення цих величин.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Вперше побудована діагностична модель роботоздатності для двопровідних мереж постійного струму промислових підприємств у вигляді перехідної характеристики струму через шунтувальний зв'язок, величина та час існування якого обмежується гранично допустимим рівнем, який визначається стандартом. Аналіз моделі дозволив визначити оптимальну функціональну характеристику для пристроїв захисного вимикання. Доведено, що при постійному відносному значенні одного із омичних опорів полюсів R_{1*} і зміні опору ізоляції другого полюса в межах $(m-1)/m \leq R_{2*} \leq \infty$ переважають вимоги до об-

меження струму в перехідному режимі і допустима величина опору шунтувального зв'язку визначається як $R_{з.від*} \geq 1/m(1+R_{2*}/R_{1*})$ а коли $0 \leq R_{2*} \leq (m-1)/m$ переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і $R_{з.від*} \geq (1-R_{2*})/(1+R_{2*}/R_{1*})$. В разі симетричного зниження опору ізоляції умовами роботоздатності ізоляції є $R_{m*} = 1 - 2R_{дон\min*}$, де $m = i_{\text{ндоп}}/I_{\text{ндоп}}$ є відношення граничнодопустимих струмів в перехідному режимі ($t \leq 0,2 \text{ с}$) та сталому ($t > 1 \text{ с}$), $R_{k*} = R_k I_{\text{ндоп}}/U_0$, U_0 – напруга джерела струму; $R_{дон\min} = 6 \text{ кОм}$. Ємність мережі постійного струму впливає лише на час існування перехідного процесу в разі виникнення шунтувального зв'язку.

Список літератури

1. Гумин И.Я. Вторичные схемы электрических станций и подстанций / И. Я. Гумин, М. И. Гумин, В. Ф. Устинов. - М.-Л.: Энергия, 1964. - 176 с. -Бібліогр.: С. 174-176.
2. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В / Е. Ф. Цапенко -М.: Энергия, 1972. - 130 с.
3. А.с. 139057 СССР. Устройство для контроля сопротивления изоляции электрических сетей постоянного тока: В. С. Осетров, Г. Е. Пиколин; - №4115616/24-21; Заявл. 25.06.86; Оpubл. 23.04.86, Бюл. № 15.
4. А.с. 1305608 СССР. Устройство для измерения сопротивления изоляции электрических сетей:/ Л. Н. Карпиловский, Е. Я. Бойко, Л. Л. Лесняк; - № 3939333/24-21; Заявл. 25.06.86; Оpubл. 23.04.86, Бюл. №15.
5. А.с. 1308938 СССР. Устройство контроля сопротивления изоляции электрических сетей:/ Е. А. Иванов, Л. И. Гребешков, Е. Д. Гусев, В. Д. Дудник, В. С. Лебедев, В. М. Ребров, Ю. А. Шестопалов; - № 3964533/24-21; Заявл. 08.10.85; Оpubл. 07.05.87, Бюл. №17.
6. А.с. 1272278 СССР. Устройство для контроля сопротивления изоляции сетей постоянного тока: / Ю. Н. Лебедев (СССР); - № 3901112/24-31; Заявл. 23.05.85; Оpubл. 23.11.86, Бюл. №43.
7. Трояновский В. А. Установка для непрерывного контроля изоляции в сетях постоянного тока / В. А. Трояновский // Промышленная энергетика. - 1962. -№ 6. - С. 14-15.
8. Кононенко В. Л. Исследование и разработка защиты от утечек в подземных изолированных от земли электрических сетях постоянного тока: дис.на соискание канд. техн. наук: спец 05.09.03 - "Электрооборудование горного производства" / Кононенко Владимир Петрович- Донецк: Донецкий Ордена Трудового Красного знамени политехнический институт, 1971, - 212 с. - Бібліогр.: С. 166-173.
9. Кононенко В. П. Влияние емкости сети на работу устройства защиты от утечек сети постоянного тока / В. П. Кононенко // Сб. Взрывоопасное оборудование. - М.: Энергия , 1967. - Вып. № 5 - С. 306-309.
10. Кобылянский А. В. Поиск места повреждения в сетях постоянного тока / А. В. Кобылянский, А. Е. Рубаненко // Энергетика и электрификация. -1987.-№4 С. 17-19.
11. Кутін В. М. Система діагностики розподільних мереж постійного струму електричних станцій і підстанцій / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, Ештїба Алі Мусбах, Аль Нсур Мохамед // Вісник Вінницького полг-технічного інституту. - 1994. - № 2. - С. 51-56.
12. Борухман А. В. Определение места повреждения оперативного постоянного тока / А. В. Борухман, А. Н. Кулдыкин // Электрические станции. -1982. -№7.- С. 58-60.
13. А.с. 1323984 СССР. Способ определения сопротивления изоляции электрических сетей и устройство для его осуществления; / Л.А. Лысенко, В.М. Машенков, В.К. Потапкин; - №4036940/24-21; Заявлено 29.01.86; Оpubл. 15.07.87, Бюл. №26.
14. А.с. 246641 СССР. Устройство автоматического контроля изоляции сетей постоянного тока:/ В. С. Дзюбан, В. П. Кононенко; - № 3892243/21-21; Заявл. 25.06.69; Оpubл. 12.03.70, Бюл. №2. С. 53.
15. Кутин В. М. Совершенствование средств защиты от утечек в цепях постоянного тока экскаваторов / В. М. Кутин, В. М. Хлыстов // Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР, Тезисы докладов и сообщений II Всесоюзный н-т конференции. - Днепропетровск, 1979.-№ 8.-С. 51-53.
16. Кутин В. М. Диагностика оперативных цепей постоянного тока, средства автоматики на электрических станциях и подстанциях / Кутин В. М., Рубаненко А. Е., Шахид Умар /У Тез. докл. н-т конференции, 21- Киев, 1991.-220 с,
17. Брызгалo В. Н. Метод измерения сопротивления изоляции сети постоянного тока / В. Н. Брызгалo, Л. А. Лысняк, В. Б. Якомаскин // Электротехника.- 1981.-№ 10.-С. 56-58.
18. Кутін В. М. Комбінована система діагностування оперативних мереж постійного струму на електричних станціях і підстанціях / В.М. Кутін, М. П. Свиридов, В. В. Жогов // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003). Тези доп., VII міжнародної н-т конф.- Вінниця, 2002 - 158 с.