

УДК 621.316.1.027.5/7.014.7

В. М. Кутін, д. т. н., проф.;

В. В. Вашковський

МЕТОД ТА СИСТЕМА НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6 — 35 КВ

Системи електропостачання промислових та сільськогосподарських споживачів, основу яких складають розподільні мережі (РМ) функційно різноманітні, конструктивно складні, вирішують складні задачі, мають високу ціну відмови та велику автономність. Кількість відмов, що припадають на долю РМ, складає 80...90 % від загальної кількості відмов. Відомо, що надійність РМ можна підвищити за рахунок використання надійних компонентів, створення полегшених режимів роботи, введення просторової та часової надлишковості тощо. Однак використання цих методів принципово обмежене, оскільки вони вимагають значних капітальних затрат. Підвищення надійності РМ можна забезпечити шляхом оптимізації процесу керування технічним станом (ТС) РМ в процесі експлуатації на основі технічної діагностики.

Задачами системи діагностики РМ є неперервний контроль реального ТС мережі та прогнозування його найближчої зміни. Таким чином можна вирішити головну задачу — виявлення моменту втрати працездатності мережі внаслідок розвитку пошкодження ще на ранній стадії. Тоді можна вжити відповідні заходи (вимкнути лінію, розвантажити її), що можуть зупинити процес переходу пошкодження, що утворюється, в стійке, виявлення і ремонт якого є тривалим та затратним процесом.

Наявна система технічного обслуговування (ТО) РМ є регламентною і використовує стратегію відновлення за відмовою і наробітком на відмову, а тому завжди маємо втрати і відмови, і від недовикористаного ресурсу, які неможливо одночасно зменшити. Цю проблему частково можна вирішити на основі комбінованої системи (КС), суть якої розкривається в [1]. В КС ТО використовується наявна регламентна підсистема перевірки, яка доповнена неперервною перевіркою інтегрального показника РМ — активного опору ізоляції фаз мережі відносно землі.

Можливість використання активного опору як контрольованого показника, доведена в [2]. Використання як обмежень гранично допустимих рівнів напруги дотику і струмів протікання через тіло людини дозволяє задати умови працездатності ізоляції мережі у вигляді залежності гранично допустимого рівня активного опору ізоляції РМ від загального опору ізоляції до утворення шунтувального зв'язку, якщо напруга джерела струму та ємність мережі постійні.

В РМ трифазного струму з ізольованою нейтраллю природною вхідною величиною є фазна (лінійна) напруга джерела живлення, а найінформативнішою ознакою, що характеризує зміну стану параметрів ізоляції, є струм витікання через шунтівний зв'язок між фазою мережі і землею.

Розрахункова схема для наведених обмежень показана на рисунку, де C_A, C_B, C_C — ємність фаз мережі відносно землі; r_A, r_B, r_C — активний опір відповідної фази мережі відносно землі.

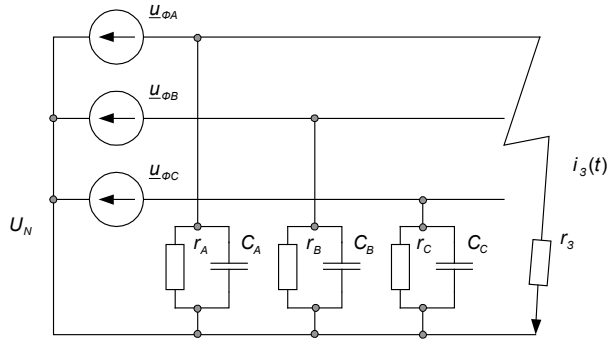
Миттєві значення напруг джерела живлення задані рівняннями

$$\left. \begin{aligned} u_{\Phi A} &= U_{m\Phi} \sin(\omega t + \varphi); \\ u_{\Phi B} &= U_{m\Phi} \sin(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}); \\ u_{\Phi C} &= U_{m\Phi} \sin(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де φ — початкова фаза коливання.

Для оцінки множини станів параметрів ізоляції в якості вихідної величини будемо розглядати струм $i_3(t)$ через шунтівний зв'язок, який утворюється між фазою А та землею (рис.).

Визначаючи $i_3(t)$, обмежимо кількість станів параметрів ізоляції. Будемо розглядати два граничних стани параметрів ізоляції до моменту виникнення шунтівного зв'язку: параметри ізоляції симетричні, тобто $r_A = r_B = r_C = r$, $C_A = C_B = C_C = C$, та випадок граничної несиметрії параметрів ізоляції $r_A \rightarrow \infty$; $r_B = r_C = r$; $r_A \gg r$; $C_A = C_B = C_C = C$.



Розрахункова схема мережі

Для випадку симетричного стану ізоляції

$$i_3(t) = \frac{U_m \sqrt{\left(r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^4}}{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2} \sin(\omega t + \varphi - \phi) - \frac{U_m \left(1 + \frac{r_3 + r_0}{r_3}\right)}{\sqrt{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2}} \sin(\varphi - \phi_1) \exp\left[\frac{-r_3 + r_0}{r_3 r_0 C_0} t\right], \quad (2)$$

де $r_0 = r/3$; $C_0 = 3C$; $\phi = \arctg \frac{\omega C_0 r_0^2}{r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_3 r_0^2}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega C_0 r_0 r_3}{r_3 + r_0}$.

В випадку граничної несиметрії

$$i_3'(t) = \frac{U_m \sqrt{\left(1,5 + 9\omega^2 C_0^2 r_0^2\right)^2 + 2,25\omega^2 C_0^2 r_0^2}}{1 + \omega^2 C_0^2 r_0^2} \left[\frac{\sqrt{\left(r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^4}}{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2} \times \right. \\ \left. \times \sin(\omega t + \varphi - \phi_1 - \phi) - \frac{\left(1 + \frac{r_3 + r_0}{r_3}\right)}{\sqrt{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2}} \sin(\varphi - \phi_1 - \phi) \exp\left(\frac{-r_3 + r_0}{r_3 r_0 C_0} t\right) \right], \quad (3)$$

де $\phi_1 = -\arctg \frac{\omega C_0 r_0}{1,5 + 9\omega^2 C_0^2 r_0^2}$.

Із рівнянь (2), (3) видно, що струм перехідного процесу відрізняється від струму усталеного режиму вільною складовою, величина та тривалість якої залежить від параметрів ізоляції та значення опору в місці пошкодження. У разі металевого замкнення ($r_3 \rightarrow 0$) на основну гармоніку струму накладається високочастотний струм власної частоти контуру замкнення та вищі гармоніки джерела напруги, що існують в реальних мережах. Наявність $r_3 > 0$ різко знижує вплив струму власної частоти коливань на основну гармоніку.

Результати досліджень для визначення реальних характеристик параметрів ізоляції [2] показали, що виникненню стійкого ОЗЗ передують поступове зниження активного опору ізоляції, або серія імпульсних пробів ізоляції з поступовим зниженням активного опору ізоляції. Симетричне зни-

ження активного опору ізоляції зумовлене наявністю шунтівних зв'язків та їх поступове зволоження. Наприклад, поступове зниження опору ізоляції регулярно спостерігається в нічний час доби або під час опадів. Імпульсні пробої ізоляції зумовлені наявністю шунтівних зв'язків та комутаційної перенапруги. В цих випадках ізоляція відновлюється зі зникненням перенапруги або після спрацювання релейного захисту та АПВ. Стійке замкнення на землю виникає зі зниженням активного опору ізоляції мережі до рівня 3...5 кОм. Виміри активного опору ізоляції в місці пошкоджень після відключення мережі показали, що для повітряної мережі напругою 6 кВ він знаходився в межах 0,25...4 кОм. Результати експериментальних досліджень інших авторів підтверджують поступовість розвитку пошкоджень в мережах. Це створює умови для своєчасного виявлення дефектів ізоляції та їх усунення шляхом профілактичних дій.

З метою досягнення необхідних умов електробезпеки експлуатації РМ, ПВЕ [3] та ПТБ [4] накладають низку обмежень: на величину струму замкнення на землю, опору заземлення електрообладнання, струму та напруги дотику людини до струмопровідної частини, або до корпусу електрообладнання, що може бути під напругою при пошкодженні і інше. Враховуючи те, що вимоги безпечної експлуатації є незаперечними, скористаємося цими обмеженнями з метою нормування параметрів ізоляції РМ та визначення умов роботоздатності ізоляції мережі.

Дотик людини до струмопровідної частини електрообладнання є граничний випадок утворення шунтвального зв'язку в РМ. Наявні мережі напругою до 1000 В обладнані спеціальними засобами захисного відключення мережі, а РМ з напругою вище 1000 В захистом від ОЗЗ, які діють на відключення або на сигнал. Час дії захисту на відключення комутаційних апаратів не перевищує $t_{\text{в}} \leq 0,2 \text{ с}$, тому тривалість існування струму перехідного процесу у разі виникнення шунтвального зв'язків можна вважати $t_{\text{шп}} \leq 0,2 \text{ с}$. Для цього проміжку часу, згідно [4], $i_3(t)_{\text{доп}} \leq 250 \text{ мА}$. В РМ, де захист від ОЗЗ діє на сигнал $t_{\text{шп}} > 1 \text{ с}$, $i_3'(t)_{\text{доп}} \leq 6 \text{ мА}$ [4].

Використовуючи ці обмеження в рівняннях (2) та (3) за допомогою ЕОМ були визначені допустимі значення активного опору $r_{\text{з доп}}$ шунтвального зв'язку для напруг 0,4; 0,66; 6,0; 10; 20 та 35 кВ.

Аналіз розрахункових даних показав, що для будь-якої з напруг переважають вимоги обмеження рівня активного опору ізоляції фаз мережі в сталому режимі, тому далі враховується тільки сталий режим.

Умови роботоздатності ізоляції пропонується представляти у вигляді залежності допустимої зміни активного опору ізоляції мережі відносно землі від активного опору ізоляції r_0 до моменту виникнення шунтвального зв'язку у разі постійної ємності мережі.

$$r_{0\text{д}} = \frac{r_0 r_{\text{з доп}}}{r_0 + r_{\text{з доп}}} \quad (4)$$

Максимально допустиме значення активного опору ізоляції $R_{0\text{min}}$ під час поступового його зниження пропонується визначати, виходячи з необхідності обмеження рівня напруги дотику людини до корпусу обладнання $U_{\text{гд}}$, які в нормальних умовах не знаходяться під напругою. Очевидно, що граничним станом розподільної мережі в цьому випадку є металеве замкнення на землю, тобто замкнення через опір заземлення R_3 . Діагностичну модель, яка описує такі стани, можна отримати із рівнянь (2) та (3), перемноживши праву та ліву частину рівнянь на R_3 та замінивши r_3 на R_3 . Для часу існування металевого замкнення на землю $t_{\text{шп}} \leq 0,2 \text{ с}$ — $U_{\text{гд}} \leq 250 \text{ В}$, а якщо $t_{\text{шп}} > 1 \text{ с}$, то $U_{\text{гд}} = 36 \text{ В}$. З урахуванням цих обмежень за допомогою ЕОМ були розраховані умови роботоздатності ізоляції для цих випадків, які представлені у вигляді залежності $R_{0\text{min}} = f(C_0)$ при $R_3 = \text{const}$ [2].

Завдання умов роботоздатності ізоляції РМ змінного струму у вигляді обмежень на зміну активного опору та ємності ізоляції фаз мережі відносно землі дозволяє упорядкувати показники, які характеризують технічний стан ізоляції РМ. У практичній реалізації діагностики РМ необхідно здійснювати вимірювання відповідних параметрів мережі, що для даного типу мереж має ряд своїх особливостей та труднощів.

Методи вимірювання параметрів опору мережі відомі давно [5]. Проте, наприклад, в методі Є. Ф. Цапенка для визначення параметрів використовуються вимірювання в трьох режимах, причому в третьому випадку до мережі підключається відома ємність. Остаточне визначення здійснюється шляхом розрахунку на ЕОМ. Недоліками методів такого типу є потреба в додаткових вимірюваннях в умовах експлуатації і потреба використання додаткових елементів під час вимірювання.

Метод неперервного контролю ТС ізоляції РМ і система для його реалізації дозволяють спростити процес та засоби контролю РМ, водночас визначаючи працездатність мережі або її втрату ще на ранніх стадіях розвитку пошкодження. Досягається це за рахунок контролю зміни активного опору ізоляції в процесі експлуатації мережі та порівняння його величини із початковими величинами (зі введенням в експлуатацію РМ) або попереднім експлуатаційним та допустимим значеннями опору ізоляції та визначення можливості продовження експлуатації в даних умовах.

Метод передбачає вимірювання поточних значень фазних напруг мережі. В процесі оброблення виміряні дані порівнюються з попередніми даними для лінії та з граничним рівнем активного опору, з яким РМ вважається працездатною і можлива її експлуатація.

За відомим співвідношенням на ЕОМ розраховуються значення поточних параметрів ізоляції мережі і шляхом моделювання ТС визначаються реальні значення опорів фаз мережі відносно землі (при постійній ємності мережі).

Таким чином реалізується моделювання фактичного ТС РМ по двох режимах, які дозволяють, використовуючи залежності між напругами та опорами, визначити як загальний стан мережі, так і фазу, де відбулось зменшення активного опору, тобто можлива поява шунтівного зв'язку та виникнення пошкодження.

Метод реалізується інформаційно-вимірювальною системою, яка передбачає збір даних по підстанціям РМ, передачу їх на центральний пункт, оброблення спеціальною програмою та здійснення керувального впливу (наприклад, вимикання лінії, де опір ізоляції досягнув гранично допустимого рівня). Ієрархічно ІВС можна розділити на два рівня — первинного збору та остаточної обробки. Перший рівень складають розміщені на підстанціях РМ пристрої вимірювання фазних напруг та первинної обробки даних (перетворення їх з аналогової в цифрову форму, підготовку до передачі по лінії зв'язку), а також каналоутворювальна апаратура передачі даних на більш високий рівень. Другий рівень складає центральна ЕОМ, у якій збираються і обробляються первинні дані, а також розміщується база даних з інформацією про параметри ліній ПРМ, про ТС ліній, про виникнення пошкоджень тощо.

Впровадження системи дозволяє значно підвищити надійність РМ, реалізувати систему ТО по фактичному ТС ізоляції мережі та зменшить затрати від недовідпуску електроенергії споживачам, на ремонтно-відновлювальні роботи, а також зменшить час пошуку місця пошкодження РМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кутін В. М. Оптимізація системи керування технічним станом розподільної мережі змінного струму // Вісник ВПІ. — 1999. — № 5. — С. 56—64.
2. Кутін В. М., Вашковський В. В. Визначення роботоздатності ізоляції розподільної мережі змінного струму // Вісник ВПІ. — 2000. — № 1. — С. 29—36.
3. Правила устройств электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 640 с.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. — М.: Энергия, 1985. — 547 с.
5. Цапенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6—35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.

Рекомендована VII Міжнародною конференцією «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2003)

Кутін Василь Михайлович — професор,

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет.

Вашковський Василь Володимирович — викладач

Коледж менеджменту, м. Вінниця