

ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ ЛІНІЇ МЕРЕЖ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

І.А. Жук¹, інж., О.Є.Рубаненко², канд. техн. наук, С.Є. Танкевич³, канд. техн. наук

1 – Філія «Дирекція з будівництва Дністровської ГАЕС»,
60236, м. Новодністровськ, Чернівецька область, Україна,
e-mail: zhuchokster@gmail.com,

2 – Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,
e-mail: rubanenko@bk.ru,

3 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: tankse@bk.ru

Розглянуто переваги та недоліки існуючих пристроїв контролю ізоляції мереж оперативного постійного струму (МОПС). Наведено опис вдосконаленого методу виявлення пошкодженої кабельної лінії (КЛ) на прикладі МОПС Дністровської ГАЕС. Бібл. 10, рис. 9.

Ключові слова: мережі оперативного постійного струму електричних станцій і підстанцій, опір ізоляції полюсів, пошкоджена кабельна лінія, контроль ізоляції.

Вступ. Мережі оперативного постійного струму (МОПС) електричних станцій і підстанцій призначені для живлення пристроїв релейного захисту і автоматики, систем сигналізації, відповідальних механізмів власних потреб, аварійного освітлення, котушок увімкнення та вимкнення високовольних вимикачів і т.п. Відповідальність таких споживачів обумовлює високі вимоги до їх надійності.

Існує багато пристроїв визначення пошкодженої кабельної лінії МОПС [2, 3, 6, 7, 9, 10]. Проте специфіка об'єкта контролю вимагає: збільшення достовірності правильного визначення появи небезпечного зниження опору ізоляції на ранній стадії; визначення пошкодженого кабелю та забезпечення швидкого знаходження місця замикання при зниженні активного опору ізоляції полюса відносно землі до 20...0 кОм без додаткових перемикачів у мережі; простоти і надійності в експлуатації, безперервного контролю величини опору ізоляції; спрацьовування на сигнал; умови, щоб параметри мережі не погіршувались (симетрії напруг полюсів відносно землі, величини опорів ізоляції, коефіцієнта пульсацій напруги на шинах акумуляторних батарей (АБ) тощо). Так, наприклад, відомо [8], що підзарядна акумуляторна установка повинна забезпечувати стабілізацію напруги на шинах АБ з відхиленнями, які не перевищують встановлені заводом-виробником, але не більше 2 % номінальної напруги (4,6 В). Однак значна частина відомих пристроїв передбачає накладання на контрольовану мережу тестового сигналу напругами 45 В (ПП-1М), 7 та 20 В (ЕРІС-ПКІ.01), 60 В (СКІФ-1, СКІФ-2), 70 В (EDS470 фірми BENDER). Використані в цих пристроях джерела тестових сигналів зменшують опір полюса відносно землі, наприклад: ЕРІС-ПКІ.01 – 240 Ом, ПП-1М – 17 кОм. Підключення генератора тестового сигналу тільки до одного полюса МОПС (ПП-1М та ЕРІС-ПКІ.01) призводить до багаторазової зміни симетрії мережі й перерозподілу заряду ємності полюсів мережі відносно землі та до протікання розрядного струму цих ємностей у колах релейного захисту (РЗА), що погіршує надійність пристроїв РЗА. Використання переносних сенсорів (ПП-1М, ЕРІС-ПКІ.01, СКІФ-1 та СКІФ-2) обмежується мережами, придатними для їх під'єднання, що не завжди можливо в умовах експлуатації. Також величина амплітуди імпульсу напруги на пошкодженому фідері в режимі пошуку при струмі 10 мА і більше досягає 180 В при опорі ізоляції приєднання 20 кОм і вище, що достатньо для спрацьовування дискретного входу в разі металевого замикання його на землю (EDS470 фірми BENDER) [1].

Відомі пристрої контролю ізоляції МОПС можна поділити за принципом дії: на пристрої, що реагують на різницю величин опорів ізоляції полюсів, утворюючи плечі вимірюва-

льного моста, в діагональ якого включено реагуючий орган (мостові схеми); пристрої контролю зміни накладеного на МОПС струму тестового змінного сигналу різної форми і частоти; пристрої, які реагують на струм перехідного процесу при замиканні полюса на землю; пристрої, що використовують комбіновані принципи.

Мостові схеми не потребують додаткового джерела тестового сигналу, що спрощує їх конструкцію, однак вони зменшують перехідний опір відносно землі та створюють передумови для порушення в роботі релейного захисту, який отримує живлення від МОПС, а також не дають змоги визначити пошкоджену ділянку мережі.

Пристрої, які визначають пошкоджені кабель з використанням струмів перезаряду ємностей його полюсів, також не використовують додаткового джерела тестового сигналу, що значно спрощує їх схему і конструкцію, однак вони можуть помилково спрацьовувати при різного роду комутаціях – увімкнення/вимкнення приєднань, не спрацьовують при повільних та близьких до симетричних зменшеннях опору полюсів відносно землі, а це викликає необхідність проведення додаткових досліджень щодо визначення значень опорів полюсів МОПС та пошкодженої КЛ.

Пристрої ж, які використовують гармонічний тестовий сигнал, не використовуються для визначення пошкодженої кабельної лінії, а здійснюють лише загально-мережевий контроль ізоляції.

Отже, нагальна практична потреба в найбільш повному забезпеченні зазначених вище вимог щодо властивостей та функцій пристроїв контролю ізоляції МОПС й спричинила проведення досліджень, опис і результати яких наведено далі.

Математичне моделювання процесів зміни струмів у МОПС. Одним з джерел живлення в МОПС є акумуляторна батарея, яка працює в режимі постійного підзаряду. Як прямі зарядно-підзарядні агрегати широко використовуються агрегати типу ВАЗП, які мають пульсації випрямленої напруги [5]. Дослідимо вплив параметрів МОПС на величину струмів пульсацій у провідниках полюсів окремої КЛ. Відповідно до вимог [4, 8] коефіцієнт пульсації на шинах постійного струму не повинен перевищувати допустимих значень, передбачених ТУ заводу-виробника та умовами живлення пристроїв релейного захисту й автоматики (РЗА) та АСК ТП, і приймається за меншою величиною. Проведемо дослідження можливості використання пульсацій випрямленої напруги ВАЗП як тестових сигналів пристрою визначення пошкодженої КЛ МОПС.

Розглянемо заступну схему МОПС (рис. 1 а), де u_1 , R_1 , R_2 , R_3 , C_1 , C_2 – загальномережеві параметри; I_1 , I_2 , R_4 , R_5 , R_9 , C_3 , C_4 , R_{10} – параметри КЛ; u_1 – напруга джерела пульсацій (ВАЗП) із внутрішнім опором R_1 , опір ізоляції додатного полюса (R_9) та опір навантаження КЛ (R_{10}); I_1 , I_2 – струми у додатному та від'ємному провідниках на початку контрольованої КЛ МОПС (відповідно); R_2 , R_3 , C_1 , C_2 – відповідно опори і ємності ізоляції полюсів мережі; R_5 , R_9 , C_3 , C_4 – відповідно опори та ємності ізоляції полюсів досліджуваної кабельної лінії; R_4 – опір ізоляції в місці замикання полюса кабельної лінії на землю.

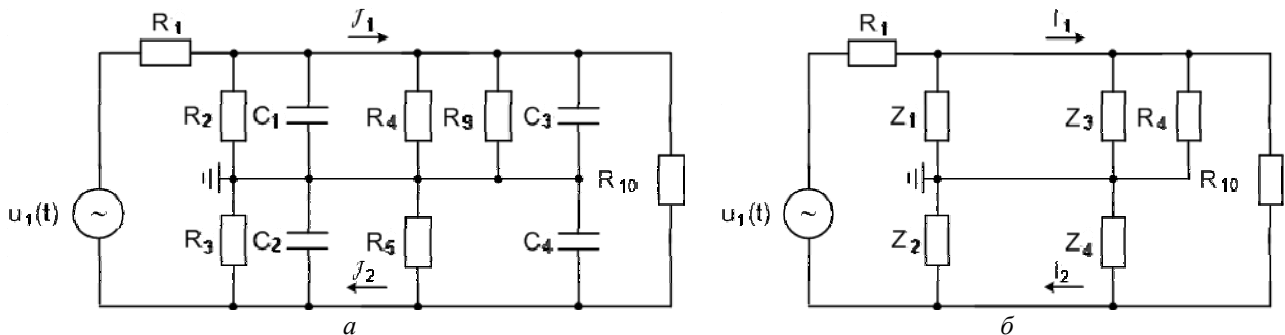


Рис. 1

При переході до комплексних опорів схема рис. 1 а набуде вигляду, показаного на рис. 1 б.

Дослідимо зміну струмів I_1 та I_2 при зміні опору (R_4) в місці замикання додатного полюса контрольованої КЛ на землю в усталеному режимі. Дослідженнями доведено, що зміна

внутрішнього опору джерела R_1 у межах від 0,01 до 0,001 Ом при $R_{10} = 1 \dots 10^6$ Ом мало впливає на струми I_1, I_2 , а тому (вважаємо, що $R_1=0$ Ом) опором R_1 знехтуємо.

Струм у додатному провіднику має вид

$$I_1 = \frac{u_1(t)}{Z_3 \cdot (A/B)}, \quad (1)$$

де $A = Z_1 \cdot \{R_4 \cdot [Z_2 \cdot Z_4 + (R_{10} + Z_3) \cdot (Z_2 + Z_4)] + R_{10} \cdot Z_3 \cdot Z_4\}$; $B = R_4 \cdot Z_1 \cdot [R_{10} \cdot (Z_2 + Z_4) + Z_2 \cdot Z_4] + R_{10} \cdot Z_4 \cdot Z_2 \cdot (Z_1 + R_4)$.

Струм у від'ємному провіднику такий:

$$I_2 = \frac{u_1(t)}{Z_3 \cdot (C/D)}, \quad (2)$$

де $C = R_4 \cdot Z_1 \cdot [Z_4 \cdot (Z_2 + R_{10}) + Z_3 \cdot (R_{10} + Z_3)] + R_{10} \cdot Z_2 \cdot (R_4 + Z_1) \cdot (Z_3 + Z_4)$;

$D = R_4 \cdot Z_1 \cdot [R_{10} \cdot (Z_2 + Z_4) + Z_2 \cdot Z_4] + R_{10} \cdot Z_4 \cdot Z_2 \cdot (Z_1 + R_4)$.

Дослідження проводимо за таких параметрів МОПС: $R_1=0$ Ом, $R_2=R_3=32$ кОм, $R_5=R_9=1$ МОм, $R_4=0 \dots 1$ кОм, $R_{10}=10$ Ом, $C_1=C_2=40$ мкФ, $C_3=C_4=1$ мкФ, частоти пульсацій ВАЗП $f=300$ Гц і напруги пульсацій $U_1=4,6$ В.

З отриманої розрахунковим шляхом залежності (рис. 2) видно, що струм I_1 у додатному провіднику пошкодженої КЛ залежить від опору в місці замикання цього провідника на землю. Струм I_2 у від'ємному провіднику пошкодженої КЛ майже не залежить від опору R_4 у місці замикання.

Метод визначення пошкодженої КЛ. Існує багато методів визначення пошкодженої

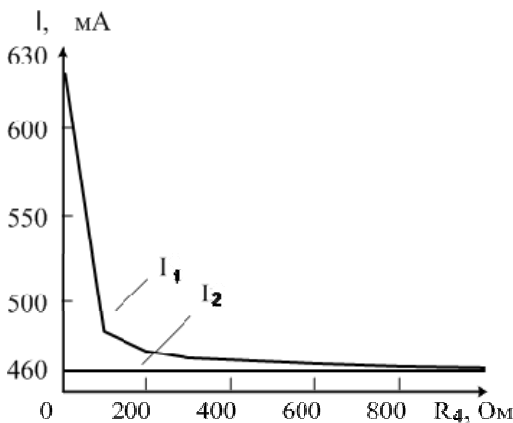


Рис. 2

КЛ у МОПС [1]. Всі вони мають свої переваги і недоліки.

На основі аналізу процесів зміни струмів у провідниках пошкодженої КЛ при зміні опору в місці замикання пропонуємо метод визначення пошкодженого фідера за величиною різниці струмів (I_1, I_2) пульсацій ВАЗП у додатному та від'ємному провідниках. На відміну від відомих [1], завдяки йому не погіршуються існуючі параметри мережі МОПС (кофіцієнт пульсації, несиметрія полюсів відносно землі), не потрібні генератор додаткового тестового сигналу та зміна мереж для створення місць підключення датчиків (ІПІ-1М, ЕРІС-ПКІ.01, СКІФ-1, СКІФ-

2, EDS470), оскільки використовуються модернізовані автоматичні вимикачі в місцях їх проектного розміщення.

Позначимо різницю струмів у провідниках пошкодженої КЛ як

$$\Delta I = I_1 - I_2. \quad (3)$$

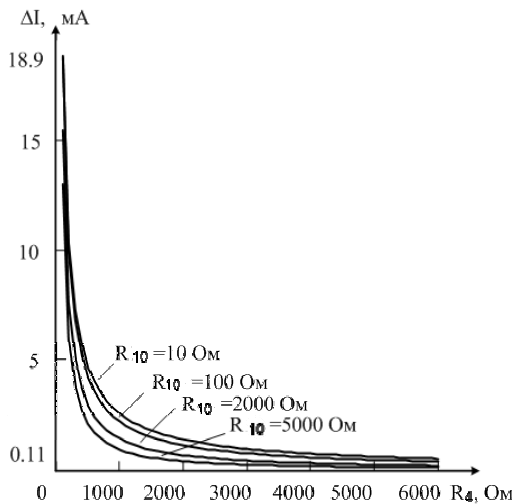


Рис. 3

Дослідимо вплив параметрів МОПС на величину ΔI . Лишаючи попередні параметри незмінними, знаходимо залежність ΔI від опору навантаження КЛ R_{10} (рис. 3). Як показують розрахунки, зміна опору в місці замикання від 1 до 5 кОм призводить до зміни контрольованої різниці струмів ΔI на 3 мА, у той час як зміна опору в місці замикання на землю від 5 до 6 кОм призводить до зміни струму ΔI на 10 мкА, що складає лише 0,33 % від попередньої величини – 3 мА. Подальше збільшення значення опору в місці замикання призводить лише до зменшення чутливості контрольованого параметра ΔI до зміни опору в місці замкнення на землю полюса МОПС, а тому значно ускладнює умови визначення пошкодженої КЛ.

Тому запропонований метод визначення пошкодженої КЛ можна використовувати лише в діапазоні змін опору в місці замикання (лише) від 0 до 5 кОм, тоді як згідно з НД [8] цей діапазон становить 0...20 кОм.

Недоліком запропонованого методу є також залежність амплітудного значення напруги пульсацій ВАЗП від потужності навантаження МОПС, що обмежує його застосування.

Такий метод дає змогу найбільш просто реалізувати пристрої визначення пошкодженого кабелю (ПВКП). Ознакою пошкодженої КЛ є збільшення вимірної різниці струмів пульсацій ВАЗП у провідниках додатного та від'ємного полюсів КЛ над уставкою спрацювання ПВКП.

Однак пристрої, які реалізують запропонований метод, надійно реагують на зміну опору в місці замкнення від 0 до 5 кОм, а при зміні цієї величини в діапазоні від 5 до 20 кОм потребують значного ускладнення схеми, спричиненого зменшенням різниці струмів у додатному та від'ємному провідниках КЛ. Особливо контроль різниці струмів ускладнюється в умовах зміни напруги пульсації ВАЗП у процесі експлуатації. Тому реалізація цього методу виправдана в МОПС, де зміна навантаження таких мереж не призводить до зміни коефіцієнта пульсації більше ніж на 0,01%.

Вдосконалення методу визначення пошкодженої лінії в мережах оперативного постійного струму (ОПС). У випадку, коли коефіцієнт пульсації ВАЗП змінюється в процесі експлуатації, доцільно використовувати додаткове джерело тестового сигналу стабільної напруги.

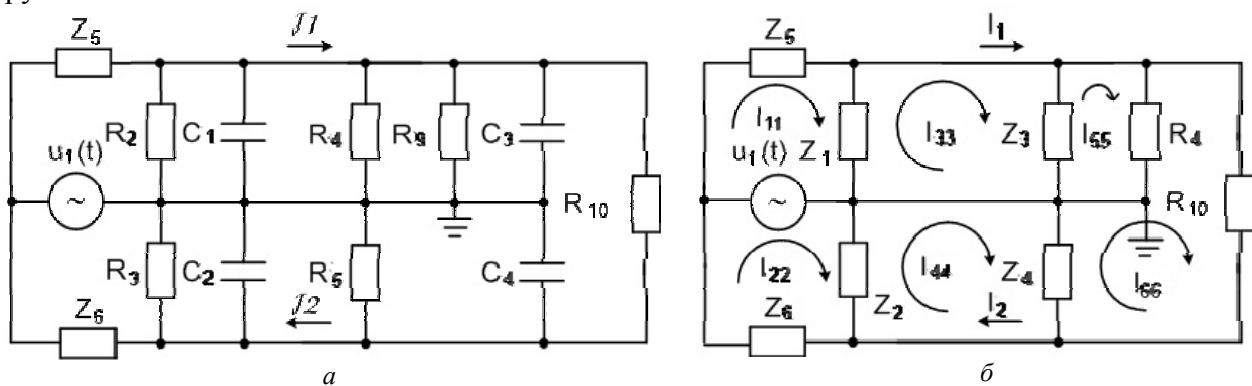


Рис. 4

Розглянемо можливість визначення знаходження пошкодженої кабельної лінії з використанням додаткового джерела тестового сигналу відповідно до схеми, зображеної на рис. 4 а. На цій схемі позначено: u_1 , R_1 , R_2 , R_3 , C_1 , C_2 – загально-мережеві параметри; I_1 , I_2 , R_4 , R_5 , R_9 , C_3 , C_4 , R_{10} – параметри КЛ; $u_1(t)$ – напруга додаткового джерела синусоїдального сигналу, опір ізоляції додатного полюса (R_9) та опір навантаження КЛ (R_{10}); I_1 , I_2 – струми у додатному та від'ємному провідниках (відповідно) на початку КЛ МОПС; опори Z_5 , Z_6 конденсаторів C_5 , C_6 (ємність по 1 мкФ).

Використання додаткового генератора тестового сигналу змінної частоти має такі переваги: напруга сигналу генератора стабілізована (не змінюється при зміні навантаження); частота 40 Гц (визначена дослідним шляхом для МОПС, що розглядається, за умови найбільшої достовірності знаходження пошкодженої КЛ з використанням певного трансформатора струму) дає змогу зменшити вплив завад частотою 50 Гц та кратних їй гармонік.

Струми в елементах МОПС (рис. 4 б) з приєднаним генератором тестового сигналу можна описати такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \underline{I}_{11} \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_5) - \underline{I}_{33} \cdot \underline{Z}_1 = \underline{E}(p) \\ \underline{I}_{22} \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_6) - \underline{I}_{44} \cdot \underline{Z}_2 = -\underline{E}(p) \\ -\underline{I}_{11} \cdot \underline{Z}_1 + \underline{I}_{33} \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) - \underline{I}_{55} \cdot \underline{Z}_3 = 0 \\ -\underline{I}_{22} \cdot \underline{Z}_2 + \underline{I}_{44} \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4) - \underline{I}_{66} \cdot \underline{Z}_4 = 0 \\ -\underline{I}_{33} \cdot \underline{Z}_3 + \underline{I}_{55} \cdot (\underline{Z}_3 + \underline{R}_4) - \underline{I}_{66} \cdot \underline{R}_4 = 0 \\ -\underline{I}_{44} \cdot \underline{Z}_4 - \underline{I}_{55} \cdot \underline{R}_4 + \underline{I}_{66} \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_{10} + \underline{R}_4) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Струм у додатному провіднику КЛ становить

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{33}, \quad (5)$$

а у від'ємному –

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{44}.$$

(6)

Опір ізоляції: додатного полюса МОПС:

$$\underline{Z}_1 = \frac{R_2 \cdot (-jX_{c1})}{R_2 - jX_{c1}}; \quad (7)$$

від'ємного полюса МОПС:

$$\underline{Z}_2 = \frac{R_3 \cdot (-jX_{c2})}{R_3 - jX_{c2}}; \quad (8)$$

додатного полюса пошкодженої КЛ:

$$\underline{Z}_3 = \frac{R_9 \cdot (-jX_{c3})}{R_9 - jX_{c3}}; \quad (9)$$

від'ємного полюса пошкодженої КЛ:

$$\underline{Z}_4 = \frac{R_5 \cdot (-jX_{c4})}{R_5 - jX_{c4}}. \quad (10)$$

Струм у додатному провіднику КЛ має вид

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{G + D + H} \cdot \left\{ R_4 \cdot [\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_6 + \underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_4) - F \cdot (\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2)] + \right. \\ \left. + R_4 \cdot \underline{Z}_1 \cdot R_{10} \cdot [\underline{Z}_2 \cdot E - F] + \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_{11} \cdot \{ \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_6 \cdot (\underline{Z}_4 - R_{10}) - \underline{Z}_4 \cdot [R_{10} \cdot E] \} \right\}, \quad (11)$$

де $E = \underline{Z}_6 + \underline{Z}_4$; $T = \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_5$; $F = \underline{Z}_4 \cdot \underline{Z}_6$,

$$G = R_4 \cdot R_{10} \cdot [\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_5 \cdot (\underline{Z}_2 \cdot E + F) + T \cdot (\underline{Z}_2 \cdot E + F) + \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_2 \cdot E + F)];$$

$$D = T \cdot \underline{Z}_1 \cdot \{ R_{10} \cdot [\underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_2) + F] + F \cdot \underline{Z}_2 \};$$

$$H = R_4 \cdot [T \cdot \underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_2 \cdot E + F) + \underline{Z}_4 \cdot \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_6 \cdot (\underline{Z}_5 + \underline{Z}_3) + \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_5].$$

Струм у від'ємному провіднику КЛ такий:

$$\underline{I}_2 = U \cdot \left\{ R_4 \cdot R_{10} \cdot \underline{Z}_2 \cdot [\underline{Z}_5 \cdot (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_1) + \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_1] - R_4 \cdot [T \cdot \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_1) + \right. \\ \left. + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 \cdot (\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_6 + \underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_2)] + T \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot (R_{10} \cdot \underline{Z}_4) \right\} / (G + D + H). \quad (12)$$

Різниця струмів у полюсних провідниках пошкодженої КЛ:

$$\Delta I = I_{33} - I_{44} = I_1 - I_2;$$

$$\Delta I = U \cdot \{R_4 \cdot R_{10} \cdot [Z_1 \cdot Z_4 \cdot (Z_6 + Z_2) + Z_1 \cdot Z_2 \cdot (Z_6 - Z_3) - Z_5 \cdot Z_2 \cdot (Z_3 - Z_1)] + R_4 \cdot [2 \cdot T \cdot Z_2 \cdot (Z_4 + Z_1) + 2 \cdot Z_3 \cdot Z_1 \cdot Z_6 \cdot (Z_2 + Z_4) + Z_1 \cdot Z_4 \cdot Z_2 \cdot (Z_6 + Z_5)] + Z_3 \cdot Z_1 \cdot R_{10} \cdot [Z_6 \cdot (Z_2 + Z_4) - Z_2 \cdot (Z_5 + Z_6)] + Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot (Z_6 + Z_5)\} / (G + D + H).$$

Отримані вирази дають змогу дослідити процеси зміни струмів I_1 та I_2 у провідниках КЛ, процеси зміни різниці ΔI струмів I_1 та I_2 при різних величинах опорів у місці замикання R_4 та при різних опорах навантаження R_{10} . Результати розрахунку залежностей величини ΔI від величин опору в місці короткого замикання R_4 і від опору навантаження R_{10} , отримані при $C_1=C_2=40$ мкФ, $R_2=R_3=32$ кОм, $C_3=C_4=0,01$ мкФ, $R_9=R_5=1$ МОм, наведені відповідно на рис. 5 та 6.

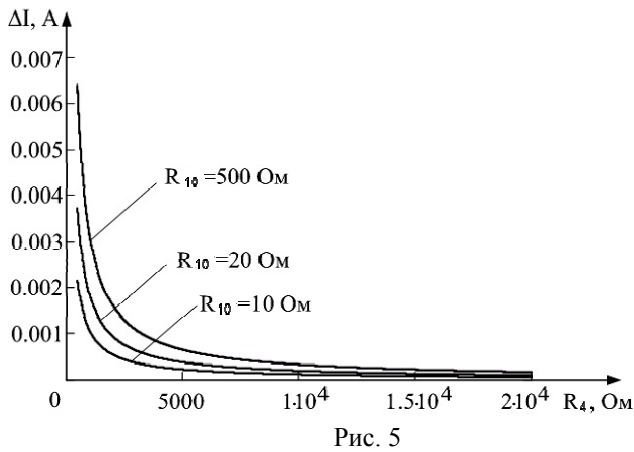


Рис. 5

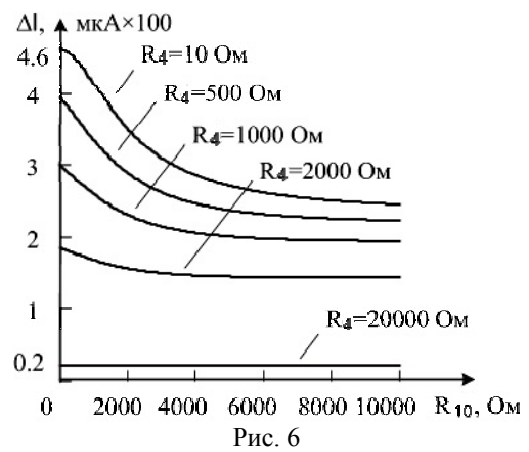


Рис. 6

Аналіз отриманих залежностей дає змогу стверджувати таке:

1. Існує залежність ΔI від опору в місці замикання КЛ (рис. 5), а тому метод контролю різниці струмів ΔI від стороннього джерела тестового сигналу (генератора) може бути використаний для визначення пошкодженої КЛ.
2. Залежність ΔI від опору навантаження у вдосконаленого методу (рис. 6) значно менша, ніж у попереднього (рис. 2).
3. Дослідження струмів у вітках схеми комп'ютерної моделі МОПС (рис. 7) із замиканням одного полюса на землю свідчить про те, що існує залежність різниці струмів ΔI додатного і від'ємного полюсів кабельної лінії від різниці ємностей ΔC (знаходиться як $|C_3 - C_4| / C_3$ із рис. 4 а, C_3 – у ролі базисної ємності) ізоляції її полюсів (рис. 8).

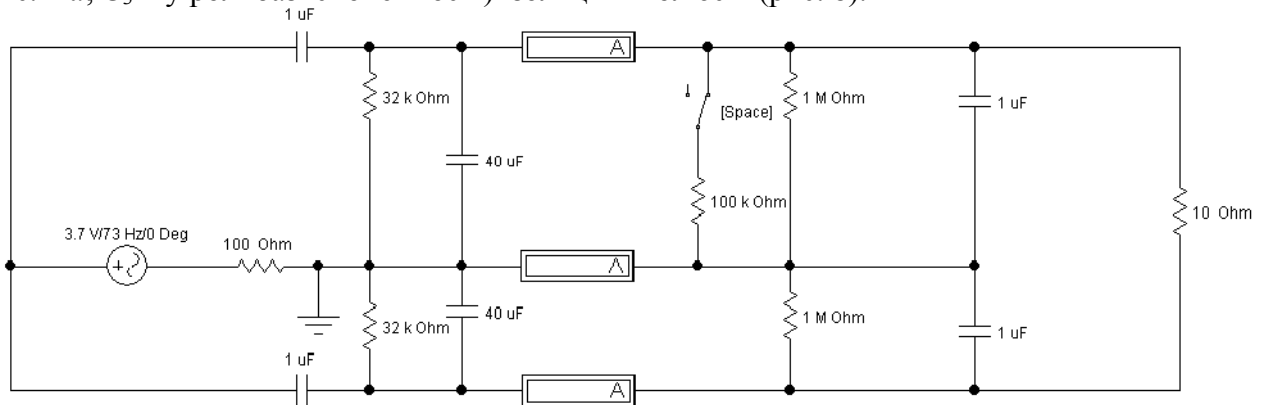


Рис. 7

З наведених на рис. 8 залежностей видно, що при зміні ΔC від 0 до 50 % (зростання ΔC від 0 до 2 мкФ при початковій ємності полюсів КЛ 4 мкФ) зміна різниці струмів ΔI не перевищує 3 %. При цьому зазначимо, що різниця величин ємностей ізоляції полюсів викликає

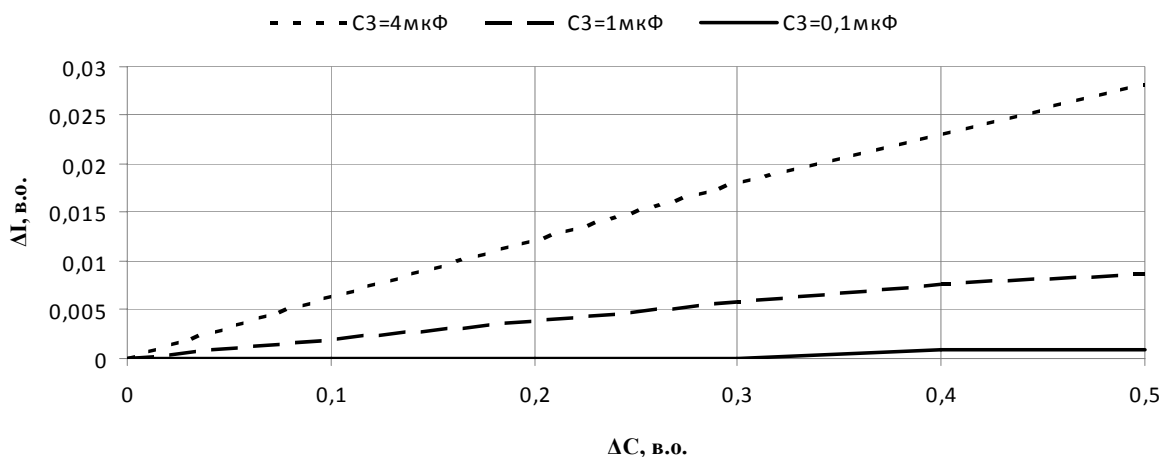


Рис. 8

на різну довжину провідників додатного та від'ємного полюсів КЛ МОПС, наприклад, на Дністровській ГАЕС не перевищує 11 %.

Проведені дослідження свідчать, що в процесі експлуатації (під час проведення ремонтів, пусків і зупинок агрегатів) у МОПС з'являються завади різних частот. Тому пропонуємо використовувати генератор тестового сигналу змінної частоти (трьох частот послідовно: 40, 70, 110 Гц) з метою зменшення впливу ємнісної складової полюсів КЛ відносно землі на результат контролю, усунення помилкових спрацьовувань пристроїв визначення пошкодженої ділянки МОПС в умовах дії завод на частотах тестового сигналу та контролю справності роботи генератора.

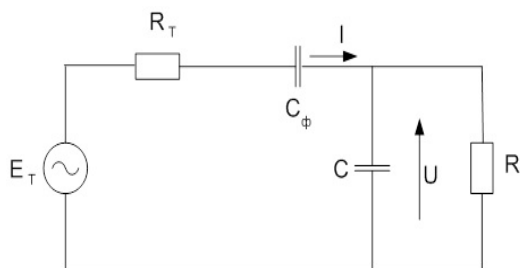


Рис. 9

Оскільки $R_9 \gg R_4$ і $R_5 \gg R_4$ (рис. 4 а), то $I_{55} \approx \Delta I \sim 1/R_4$ (рис. 4 б). Тому для подальшого розрахунку пропонуємо спростити схему (рис. 4 б) до схеми, зображеної на рис. 9, де E_T – напруга 3,7 В гармонічних тестових сигналів трьох частот $\omega_1, \omega_2, \omega_3$; R_T – внутрішній опір генератора; C_ϕ – сумарна ємність розділових конденсаторів фільтра тестового сигналу; C – сумарна ємність ізоляції полюсів лінії; R – опір у місці замикання полюса на землю; I – струм, що протікає через сенсор струму.

Для спрощення аналізу математичної моделі на схемі не враховано опір навантаження, приєднаного до мережі ОПС, та поздовжній опір кабелів, оскільки вони значно менші порівняно з опором ізоляції, а розподілені параметри мережі моделюються за допомогою зосереджених. Крім того, пропонуємо не враховувати внутрішній активний опір генератора тестового сигналу.

Розглянемо на прикладі частот f_1 та f_2 визначення повних опорів мережі ОПС з підключеним пристроєм визначення пошкодженої ділянки МОПС:

$$Z_{\omega_1}^2 = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot C^2 + \frac{1}{R^2}}; \quad (14)$$

$$Z_{\omega_2}^2 = \frac{1}{\omega_2^2 \cdot C^2 + \frac{1}{R^2}}, \quad (15)$$

де $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$; $\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2$.

Оскільки при розробці ПВПК пропонуємо використовувати розділові конденсатори досить великої ємності, то модуль вхідного комплексного опору ізоляції мережі відносно землі можна визначити з таких співвідношень:

- для ω_1 :

$$Z_{\omega_1} = \frac{E_T}{\Delta I_1}; \quad (16)$$

- для ω_2 :

$$Z_{\omega_2} = \frac{E_T}{\Delta I_2}. \quad (17)$$

Виходячи з отриманих співвідношень, визначимо значення активного опору полюсів мережі відносно землі:

$$\begin{cases} \frac{1}{Z_{\omega_1}^2} = \omega_1^2 \cdot C^2 + \frac{1}{R^2}; \\ \frac{1}{Z_{\omega_2}^2} = \omega_2^2 \cdot C^2 + \frac{1}{R^2}. \end{cases} \quad (18)$$

З отриманої системи рівнянь (18) визначимо активний опір полюсів мережі відносно землі у вигляді залежності від параметрів Z_{ω_1} , Z_{ω_2} , k :

$$R = Z_{\omega_1} \cdot Z_{\omega_2} \cdot \sqrt{\frac{k^2 - 1}{Z_{\omega_1}^2 \cdot k^2 - Z_{\omega_2}^2}}, \quad (19)$$

де $k^2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}$.

Для застосування формули (19) відповідно до схеми, зображеної на рис. 9, потрібно розрахувати сумарний струм у місці установки сенсора струму тестового сигналу і значення спаду напруги на опорі ізоляції мережі відносно землі, необхідні для розрахунку модуля вхідного комплексного опору мережі за відомих параметрів схеми заміщення мережі й частоти тестового сигналу.

З формули (19) видно, що знаючи співвідношення частот тестових сигналів k , за яких проводились вимірювання, можна визначити активний опір полюсів мережі відносно землі, а отже, контролювати появу небезпечних знижень сумарного активного опору полюсів мережі відносно землі. Вимірювання активного опору є непрямим, тому прилад контролю повинен мати не лише блок визначення різниці струмів у додатному та від'ємному провідниках контрольованої КЛ, а й блок розрахунку активної складової цього струму – за формулою (19). Оскільки для достатньої точності розрахунків потрібно забезпечити високу якість роботи сенсорів, то в них використовуються активні вузькополосні фільтри.

ПВПК працює відповідно до такого алгоритму: пристрій загальномережевого контролю ізоляції [3] на основі розрахунку параметрів і виявлення прогнозованого зниження ізоляції МОПС подає сигнал на увімкнення генератора тестового сигналу трьох частот. Генератор генерує синусоїдальний сигнал послідовно протягом 1 с для кожної частоти з паузою в 1 с між сигналами різних частот. Після передавання сигналів трьох частот настає пауза 5 с, а далі послідовно повторюється передавання трьох частот. Експериментальним шляхом встановлено, що в разі спрацювання пристрою загальномережевого контролю ізоляції полюсних провідників МОПС час роботи генератора тестового сигналу протягом 1 хв забезпечує виявлення пошкодженої КЛ. У сенсорах ПВПК, які розташовані на контрольованих КЛ, різниця струмів тестового сигналу в полюсних провідниках цих КЛ перетворюється в напругу, а далі за формулами (14)...(19) здійснюється розрахунок опорів для пар частот: ω_1 та ω_2 , ω_1 та ω_3 , ω_2 та ω_3 з урахуванням коефіцієнтів перетворення для кожної з частот тестового сигналу. Якщо завада має частоту, яка співпадає з однією з частот тестового генератора, то опорам, які розраховані для пар частот із частотою завади, присвоюється значення 0. А опір, який визначається з використанням двох частот, що не дорівнюють частоті завади, розраховується за виразом (19). Цей опір, у випадку дії завади, і є параметром, на який реагує сигнальний орган ПВПК.

Якщо в мережі немає завад на будь-якій з частот генератора, то активний опір ізоляції контрольованого кабелю визначається за виразом

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}, \quad (20)$$

де за виразом (19) визначаються: R_1 для ω_1 та ω_2 ; R_2 – для ω_1 та ω_3 ; R_3 – для ω_2 та ω_3 .

Якщо визначене значення R буде меншим, ніж уставка спрацювання ПВПК, то спрацює сигнальний орган (світлодіод), що свідчить про аварійне зменшення опору ізоляції контрольованої кабельної лінії.

Висновки. Запропоновано методи: визначення кабельної лінії зі зменшеним опором ізоляції шляхом реагування на перевищення різницею струмів пульсацій ВАЗП у полюсних провідниках КЛ уставки спрацювання ПВПК; визначення опору ізоляції контрольованого кабелю МОПС в умовах дії завад з використанням тестового сигналу частот 40, 70, 110 Гц та амплітудою 3,7 В.

Реалізація запропонованого методу трьох частот дає змогу значно зменшити залежність уставки від опору навантаження; уникнути впливу завад частотою тестового сигналу на надійність роботи пристрою визначення пошкодженої КЛ; зберегти працездатність ПКВП при відсутності сигналу однієї з тестових частот; уникнути впливу завад на частоті 50 Гц і кратним їм гармонікам.

1. Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Система контроля и измерения сопротивления изоляции в цепях оперативного постоянного тока 220 В "ЭКРА-СКИ" // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сб. докл. XX конф. – М.: Науч.-инженерное агентство, 2010. – С. 350–357.
2. Борухман В.А., Кулдыкин А.Н. Устройство ИПИ-1 для отыскания мест повреждения изоляции в сетях оперативного постоянного тока // Энергетик. – 1985. – № 2. – С. 28–29.
3. Рубаненко О.Є., Жук І.А. Вдосконалення методів контролю ізоляції мереж оперативного постійного струму електричних станцій і підстанцій // Гідроенергетика України. – 2011. – № 3–4. – С. 30–34.
4. Експлуатація стаціонарних свинцево-кислотних акумуляторних батарей: ГНД 34.50.501-2003. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2003. – 59 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).
5. Методические указания по наладке выпрямительного зарядно-подзарядного агрегата ВАЗП-380/260-40/80. – Офіц. вид. - М.: СПО ОРГРЕС, 1991. – 33 с.
6. Прибор контроля изоляции сетей постоянного тока ЭРИС-ПКИ.01. Паспорт и руководство по эксплуатации. – 2008г. – 7 с.
7. Система контроля изоляции фидеров «Скиф». Краткие технические характеристики. – М.: Белэнергоремонтналадка, 2013. – 6 с.
8. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: ГКД 34.20.507-2003. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: Мін-во палива та енергетики України, 2003. – 597 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).
9. Устройство для определения места снижения изоляции в сети оперативного постоянного тока типа ИПИ-1М. Паспорт:НШИЮ.411187.001ПС. – П.: АОЭТ «Псковский электротехнический завод». – 1995. – 18 с.
10. Пат. 1316065 СССР. Устройство для сигнализации замыканий на землю в двухпроводных сетях постоянного тока / В.М. Кутин, А.Е. Рубаненко, В.Н. Вишневыский, А.В. Кобылянский. Опубл. 09.10.1987, Бюл. № 21. – 257 с.

УДК 621.316.925

И.А. Жук¹, инж., **А.Е. Рубаненко²**, канд. техн. наук, **С.Е. Танкевич³**, канд. техн. наук

1 – Филиал «Дирекция по строительству Днестровской ГАЭС»,
60236, Новоднестровск, Черновицкая область, Украина,

2 – Винницкий национальный технический университет,
Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина,

3 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Определение поврежденной линии в сетях оперативного постоянного тока

Отмечены преимущества и недостатки устройств контроля изоляции сетей оперативного постоянного тока (СОПТ). Дано описание предложенного усовершенствованного метода выявления поврежденной кабельной линии (КЛ) на примере СОПТ Днестровской ГАЭС. Библ. 10, рис. 9.

Ключевые слова: сети оперативного постоянного тока, сопротивление изоляции, метод, математическая модель.

I.A. Zhuk¹, **A.E. Rubanenko²**, **S.Ye. Tankevych³**

1 – The branch is «Management from building of Dniester hydroelectric pump storage power plant»,
60236 Novodniestrovsk, Chernivtsi area, Ukraine,

2 – Vinnitskyi National Tehnical University,
Khmelnitske highway , 95, Vinnista, 21021, Ukraine,

3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Networks of operative direct-current have determination of the damaged line

Advantages and lacks of devices of control of isolation of networks of operative direct-current (NODC) are marked. Description of the offered improved method of exposure of the damaged cable bus (CB) is given on an example NODC of Dniester hydroelectric pump storage power plant. References 10, figures 9.

Key words: networks of operative direct-current, resistance of isolation, method, mathematical model.

Надійшла 21.03.2013

Received 21.03.2013