

ДІЛЬНИЧНА ШАХТНА МЕРЕЖА ЯК АКТИВНИЙ ДВОПОЛЮСНИК ВІДНОСНО ЗАЗЕМЛЮЮЧОГО КОНТУРУ

Ковальов О.П., Черноус В.П., Черноус Є.В.
Донецький національний технічний університет
pm@cld.dgtu.donetsk.ua

It evidence possibility of presentation of the network with isolate neutral terminals and loading rotating induction motor as active two-terminal port relative to two points of isolation damage. It propose design procedure of district mine network at spaced two-phase shorting on ground circuit.

Подвійні замикання двох різних фаз дільничних шахтних мереж на заземлюючий контур у різних його точках становлять особливу небезпеку. Імовірність виникнення такого замикання невелика, тому що цьому передують відмовлення захисту від витоків, однак наслідки цієї аварії можуть бути вкрай важкими. Небезпеку являють не тільки корпуси механізмів, що опинились під напругою, але й відкриті ділянки мережі заземлення, де можливі іскріння або дугоутворення, небезпечні у відношенні вибуху і пожежі, причому, струми силової мережі можуть виявитися недостатніми для спрацьовування максимального захисту [1]. Необхідність дослідження такої аварійної ситуації не викликає сумнівів.

Спільне дослідження силового кола і розгалуженого заземлюючого контуру, як єдиної системи є складним і нерациональним. По-перше навантаженням силового кола ділянки є потужні асинхронні електродвигуни. Це значить, що необхідна вірогідність дослідження може бути забезпечена тільки методом симетричних складових (МСС) [2]. По-друге застосування МСС для одночасного аналізу двох різних по характеру і методу дослідження кіл, що являють єдину систему, є складним у формалізації, що пов'язано з необхідністю визначення граничних умов у точках КЗ і практично "ручними" еквівалентними перетвореннями схем заміщення для симетричних складових [1]. Крім того, у літературі практично відсутній досвід застосування МСС при несиметрії в декількох частинах силового ланцюга, і цілком відсутній для випадку розгалуженого заземлюючого контуру.

Проте, можливість розподілу цих двох задач існує. Основна його ідея полягає в тім, щоб силову частину ланцюга щодо точок замикання замінити еквівалентним активним двополюсником (еквівалентним генератором). Підключення такого генератора до відповідних точок мережі заземлення дозволяє досліджувати режим останньої, використовуючи методи, досить відпрацьовані і зручні для формалізації. Недоліком цієї ідеї є необхідність створення моделі і визначення параметрів еквівалентного генератора для кожної комбінації точок пробую. Однак ця задача незрівнянно простіше задачі спільного дослідження силового ланцюга і контуру заземлення.

Ціль даної статті – відпрацювати методику представлення силового трифазного кола з ізольованою нейтраллю еквівалентним генератором відносно двох довільних точок контуру заземлення.

На рис. 1 приведена принципова схема силової частини ланцюга електропостачання. Вона містить наступні складові:

- еквівалентне симетричне джерело живлення, ерс якого E дорівнює напрузі вторинної обмотки трансформатора в режимі холостого ходу, а внутрішній опір Z_g включає внутрішній опір трансформатора з урахуванням впливу високовольтного кабелю;
- еквівалентні подовжні опори гнучких силових кабелів ZL_0 (магістральний кабель), $ZL_1 \dots ZL_4$ (кабелі основних, найбільш потужних приводів споживачів);
- еквівалентні опори приводів механізмів $Zn_1 \dots Zn_4$ (приводи комбайна, конвейера, і ін.).

На рис. 1 не приведені поперечні опори кабелів, а також допоміжні малопотужні споживачі (освітлення, електросвердла й ін.), тому що в умовах поставленої задачі вони не є визначальними.

Досвід оцінки рівня безпеки, пов'язаний з конкретним місцем розташування точок замикання двох різних фаз на заземлюючий контур, в даний час недостатній. З одного боку розташування точок замикання поблизу підстанції приведе до великих струмів у заземлюючій мережі і, відповідно, до великих струмів КЗ, що більш активно впливають на елементи максимального захисту. З іншого боку розташування точок замикання на віддаленні від підстанції приводить до менших струмів КЗ і заземлюючого контуру, однак ці струми можуть виявитися порівняними з пусковими струмами двигунів і, отже, не чуттєві для максимального струмового захисту. В зв'язку з цим розглянемо ситуацію, що представляється найбільш несприятливою – точки пробую знаходяться на максимальному віддаленні від підстанції (наприклад в кінці кабелів живлення приводів комбайна і конвейера – точки 3 і 4 на рис. 1). Відзначимо також, що для зазначеної комбінації точок математичний опис по МСС є найбільш складним у порівнянні з іншими комбінаціями.

Заміна силової частини мережі щодо точок замикання на заземлюючий контур еквівалентним генератором можлива тільки при використанні МСС і правомочна в наступних умовах. По-перше, замінювана

система повинна бути лінійною. Ця умова виконується при допущенні, що частота обертання двигунів за час дії аварійної ситуації не міняється (інакше МСС, в основі якого закладений принцип накладення, не може бути застосований). По-друге, замінювана система повинна бути двополосником. Це означає, що схема рис. 1 не повинна бути зв'язана з заземлюючим контуром, крім точок КЗ. Ця умова також виконується, якщо знехтувати поперечною провідністю кабелів, що в межах поставленої задачі цілком прийнятно (струми короткого замикання в сотні разів перевищують струми витоків кабелів).

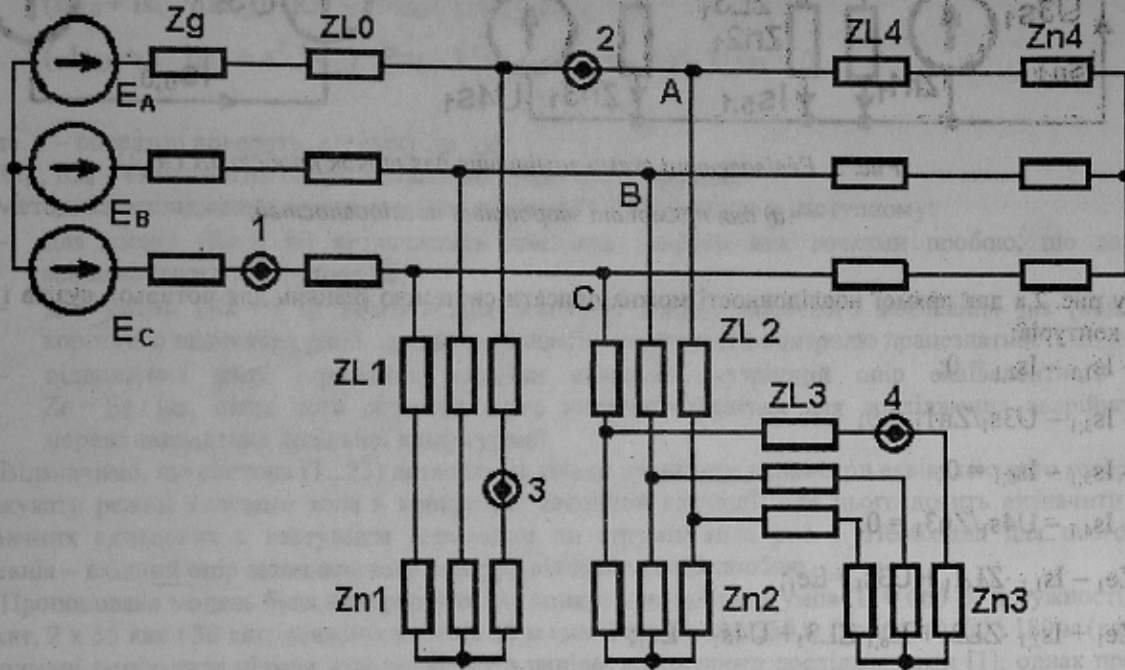


Рис. 1 Схема електропостачання дільниці вугільної шахти

Для визначення параметрів еквівалентного генератора необхідні два чисельних експерименти математичних моделей: а) дослід холостого ходу (відносно "землі", а не до працюючих двигунів), по результатам якого визначається ерс еквівалентного генератора; б) дослід короткого замикання ("справжнє" двофазне КЗ між точками пробую), за результатами якого визначається комплекс внутрішнього опору еквівалентного генератора.

Прийняті допущення:

- поперечна провідність кабелів відсутня (силове коло має зв'язок з колом заземлення тільки в двох точках КЗ, відносно яких є активним двополосником);
- параметри обертових машин за час дії аварійної ситуації не змінюються (це значить, що розглянута система лінійна і до неї можна застосувати МСС);
- опори двигунів прямої послідовності приймаються рівними їх еквівалентному вхідному опоріві в номінальному режимі, опори зворотної послідовності рівні їх еквівалентному вхідному опоріві в режимі протиключення; а опори нульової послідовності нескінченно великі;
- подовжні опори кабелів прямої і зворотної послідовностей рівні, а опір нульової послідовності дорівнює їх учетвереному значенню;
- у моделях розглядається тільки статичний режим; це значить, що експоненціальні складові струмів (потенціалів) не враховуються, а короткочасна дія їх пікових (ударних) значень не розглядається.

Розглянемо математичну модель силового ланцюга (рис. 1) для умови, коли замикання на заземлюючий контур відбувається в точках 3 (фаза А) і 4 (фаза С). Однолінійне (для фази А) зображення кола рис. 1 для струмів прямої послідовності приведені на рис. 2.а, де напруга в точках пробую позначається відповідно U_{3s1} і U_{4s1} . Схема заміщення для зворотної послідовності аналогічна схемі рис. 2.а і відрізняється тільки відсутністю ерс джерела живлення і зміною індексів, що визначають номер послідовності). На рис. 2.б приведена схема заміщення для нульової послідовності. На схемах рис. 2.а, 2.б приставка "s" говорить про належність до симетричних складових. Індекс для напруги відповідає номеру симетричної складової. Перший індекс струмів відповідають номеру галузі, а другий індекс – номеру симетричної складової.

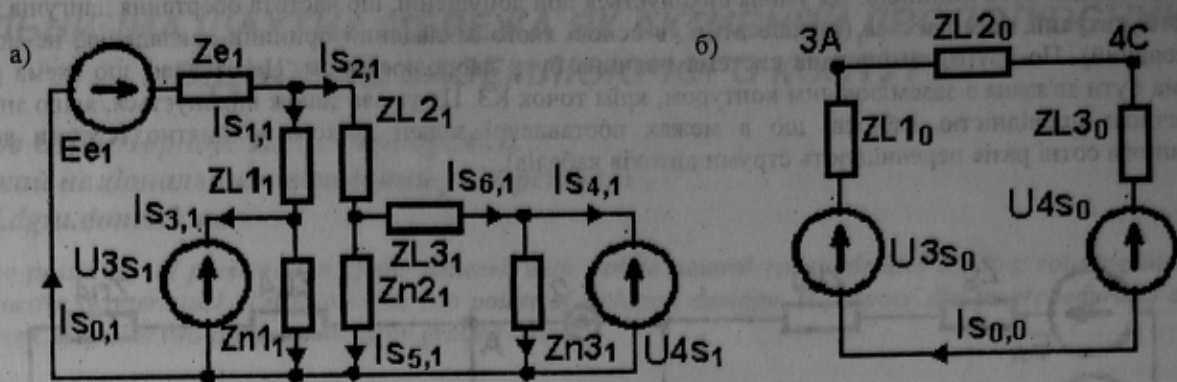


Рис. 2. Еквівалентні схеми заміщення для точок пробою 3А і 4С:

а) для прямої та зворотної послідовностей;

Схему рис. 2.а для прямої послідовності можна описати системою рівнянь для чотирьох вузлів і трьох незалежних контурів:

$$I_{s0,1} - I_{s1,1} - I_{s2,1} = 0; \quad (1)$$

$$I_{s1,1} - I_{s3,1} - U_{3s1}/Z_{n11} = 0; \quad (2)$$

$$I_{s2,1} - I_{s5,1} - I_{s6,1} = 0; \quad (3)$$

$$I_{s6,1} - I_{s4,1} - U_{4s1}/Z_{n31} = 0; \quad (4)$$

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} - I_{s1,1} \cdot Z_{L11} + U_{3s1} = E_{e1}; \quad (5)$$

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} + I_{s2,1} \cdot Z_{L21} + I_{s6,1} \cdot Z_{L31} + U_{4s1} = E_{e1}; \quad (6)$$

$$I_{s6,1} \cdot Z_{L31} - I_{s5,1} \cdot Z_{n21} + U_{4s1} = 0; \quad (7)$$

Еквівалентна схема заміщення для зворотної послідовності аналогічна схемі рис. 2.а. Відмінність полягає в суттєвій зміні параметрів двигунів і відсутності джерела E_e . Цій схемі відповідає аналогічна система рівнянь:

$$I_{s0,2} - I_{s1,2} - I_{s2,2} = 0; \quad (8)$$

$$I_{s1,2} - I_{s3,2} + U_{3s2}/Z_{n12} = 0; \quad (9)$$

$$I_{s2,2} - I_{s5,2} - I_{s6,2} = 0; \quad (10)$$

$$I_{s6,2} - I_{s4,2} - U_{4s2}/Z_{n32} = 0; \quad (11)$$

$$I_{s0,2} \cdot Z_{e2} - I_{s1,2} \cdot Z_{L12} + U_{3s2} = 0; \quad (12)$$

$$I_{s0,2} \cdot Z_{e2} + I_{s2,2} \cdot Z_{L22} + I_{s6,2} \cdot Z_{L32} + U_{4s2} = 0; \quad (13)$$

$$I_{s6,2} \cdot Z_{L32} - I_{s5,2} \cdot Z_{n22} + U_{4s2} = 0; \quad (14)$$

$$I_{s0,2} \cdot Z_{e2} - I_{s1,2} \cdot Z_{L12} + U_{3s2} = 0; \quad (15)$$

$$I_{s0,2} \cdot Z_{e2} + I_{s2,2} \cdot Z_{L22} + (U_{4s2}/Z_{n32} + I_{s4,2}) \cdot Z_{L32} + U_{4s2} = 0; \quad (16)$$

Зважаючи на те, що струми нульової послідовності не замикаються по колах двигунів і трансформатора живлення, а поперечні провідності кабелів відсутні, схема заміщення для (рис. 2.б) моделюється наступним рівнянням для нульової послідовності:

$$I_{s0,0} \cdot (Z_{L10} + Z_{L20} + Z_{L30} + R_z) + U_{3s0} - U_{4s0} = 0; \quad (17)$$

Граничні умови в даній ситуації враховуються в такий спосіб:

- у перетинах кола (рис. 1), де знаходяться точки 3 і 4, два з трьох струмів, що замикаються на землю, дорівнюють нулю (для точки 3 струми фаз В і С, для точки 4 струми фаз А і В);
- потенціали (щодо землі) двох точок пробою дорівнюють добутковій струмів короткого замикання цих точок на опір заземлення R_z у цих же точках.

Граничні умовам відповідає система рівнянь:

$$I_{s_{3,1}} + I_{s_{3,2}} - I_{s_{0,0}} = 0; \quad (18)$$

$$I_{s_{3,1}} \cdot a^2 + I_{s_{3,2}} \cdot a - I_{s_{0,0}} = 0; \quad (19)$$

$$I_{s_{4,1}} \cdot a^2 + I_{s_{4,2}} \cdot a + I_{s_{0,0}} = 0; \quad (20)$$

$$I_{s_{4,1}} \cdot a + I_{s_{4,2}} \cdot a^2 + I_{s_{0,0}} = 0; \quad (21)$$

$$(I_{s_{0,0}} + I_{s_{4,1}} + I_{s_{4,2}}) \cdot R_{z_4} - U_{4s_0} - U_{4s_1} - U_{4s_2} = 0; \quad (22)$$

$$(-I_{s_{0,0}} + a \cdot I_{s_{3,1}} + a^2 \cdot I_{s_{3,2}}) \cdot R_{z_3} - U_{3s_0} - a \cdot U_{3s_1} - a^2 \cdot U_{3s_2} = 0; \quad (23)$$

де a – оператор повороту $a = \exp(j \cdot 2 \cdot \pi / 3)$;

R_{z_3}, R_{z_4} – еквівалентні опори заземлення щодо точок пробою.

Методика досліджень з використанням системи (1...23) полягає в наступному:

- для умови ($R_z \rightarrow \infty$) визначається комплекс напруги між точками пробою, що дорівнює ерс еквівалентного генератора E_e ;
- для умови ($R_z \rightarrow 0$) визначається комплекс струму короткого замикання I_{kz} (обидва струми короткого замикання рівні, що дає можливість додаткового контролю працездатності моделі);
- відношення двох отриманих величин визначає внутрішній опір еквівалентного генератора $Z_e = E_e / I_{kz}$, після чого останній може використовуватися для дослідження аварійного режиму мережі заземлення довільної конфігурації.

Відзначимо, що система (1...23) дозволяє не тільки визначити параметри еквівалентного генератора, але і досліджувати режим силового кола в конкретній аварійній ситуації. Для цього досить визначити всі струми симетричних складових з наступним переходом до струмів кола рис. 1. Необхідна для цього додаткова інформація – вхідний опір заземлюючого контуру відносно точок пробою.

Пропонована модель була використана для конкретних робочих умов ($U = 660$ В; потужності двигунів 2 х 125 квт, 2 х 55 квт і 30 квт; довжини кабелів 30 м (магістральний), 230 м (комбайн), 60 і 180 м (конвейер) і 70 м). Отримані результати цілком узгоджуються з раніше виконаними дослідженнями [1], однак пропонований метод простіший в застосуванні, менш трудомісткий і, головне, легше формалізується. Зокрема, отримані значення внутрішнього опору еквівалентного генератора для зазначених робочих умов знаходяться в межах $0.291 \cdot e^{j20 \text{ град}} \dots 0.286 \cdot e^{j22 \text{ град}}$, Ом, причому, першому (більшому по модулю) значенню опору відповідає номінальний режим двигунів, а друге значення отримано при двократному перевантаженні (режим близький до критичного) двигунів комбайна – найбільш потужного з приводів досліджуваного кола.

Той факт, що отримане значення внутрішнього опору еквівалентного генератора міняється незначно при зміні навантаження найбільш потужного з приводів (розкид значень менше 2%), є підтвердженням другого з прийнятих допущень (про лінійність системи незалежно від ковзання двигунів). Отже розглянута система може бути представлена еквівалентним генератором.

Висновок: На прикладі силового кола електропостачання шахтної ділянки для найбільш несприятливого аварійного режиму отримана математична модель, що дозволяє силове коло замінити еквівалентним генератором щодо двох, рознесених у просторі, точок замикання на мережу заземлення.

ЛІТЕРАТУРА.

- 1 Ковальов А. П., Черноус В. П., Черноус Е. В. Моделирование шахтной участковой сети при двухфазном замыкании на заземляющий контур. Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: "Електротехніка й енергетика", випуск 41: Донецьк: Дондту, 2002. – с. 234-238
- 2 Перхач В.С. Теоретична електротехніка. "Вища школа", К. – 1992.