

УДК 621.313.333

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ СЕТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДВУХ ТОЧЕК ЗАМЫКАНИЯ НА ЗАЕМЛЯЮЩИЙ КОНТУР

Чорноус Е.В. аспирант

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина
pm@cld.dgtu.donetsk.ua*

При эксплуатации участковых шахтных сетей с изолированной нейтралью особую опасность представляют двойные замыкания двух различных фаз на заземляющий контур в различных его точках. Вероятность возникновения такого замыкания невелика, так как этому предшествует отказ защиты от утечек, однако последствия этой аварии могут быть крайне тяжелыми. При этом опасность представляет не только корпуса механизмов, оказавшихся под опасным потенциалом, но и открытые участки сети заземления, где возможны искрения или дугообразования, опасные в отношении взрыва и пожара. И это при том, что токи силовой цепи могут оказаться недостаточными для срабатывания максимальной защиты /1/. Актуальность исследования такой аварийной ситуации не вызывает сомнений.

Совместное исследование силовой цепи и разветвленного заземляющего контура, как единой системы представляется нерациональным. Обусловлено это следующими факторами:

1. Нагрузкой силовой цепи участка являются мощные асинхронные электродвигатели. Это значит, что необходимая достоверность исследования может быть обеспечена только методом симметричных составляющих (МСС) /2/.
2. Применение МСС для одновременного анализа двух различных по характеру и методу исследования цепей, являющихся одной системой, представляется затруднительным из-за сложностей его формализации, связанных с необходимостью определения граничных условий в точках КЗ и практически “ручными” эквивалентными преобразованиями схем замещения для симметричных составляющих /1/.
3. В литературе практически отсутствует опыт применения МСС при несимметрии в нескольких частях силовой цепи, и полностью отсутствует для случая разветвленного заземляющего контура.

Таким образом, совместное исследование силовой цепи и сети заземления шахтного участка, как единой системы, представляется сложным и нерациональным. Тем не менее, возможность разделения этих двух задач существует. Основная идея такого разделения заключается в том, чтобы силовую часть цепи относительно точек пробоя заменить эквивалентным генератором. Подключение такого генератора к соответствующим точкам сети заземления позволяет исследовать ее режим, используя методы, достаточно отработанные и удобные для формализации. Недостатком этой идеи является необходимость создания модели и определения параметров эквивалентного генератора для каждой ком-

бинации точек пробоя. Однако эта проблема несоизмеримо проще проблемы совместного исследования силовой цепи и контура заземления.

Цель данной статьи – отработать методику представления силовой трехфазной цепи с изолированной нейтралью эквивалентным генератором по отношению к двум произвольным точкам контура заземления.

На рис. 1 приведена принципиальная схема силовой части цепи электропитания. Она содержит следующие компоненты:

- эквивалентный симметричный источник питания, эдс которого E равна напряжению вторичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода, а внутреннее сопротивление Z_g включает влияние подводящего высоковольтного кабеля и внутреннее сопротивление трансформатора;
- эквивалентные продольные сопротивления гибких силовых кабелей Z_{L0} (магистральный кабель), $Z_{L1} \dots Z_{L4}$ (кабели основных, наиболее мощных приводов потребителей);
- эквивалентные сопротивления приводов механизмов $Z_{n1} \dots Z_{n4}$ (приводы комбайна, конвейера, и др.).

На рис. 1 не приведены поперечные сопротивления кабелей, а также вспомогательные маломощные потребители (освещение, электросверла и др.), так как в условиях поставленной задачи они не являются определяющими.

В настоящее время отсутствует опыт оценки уровня опасности, связанной с конкретным местом расположения точек замыкания двух различных фаз на заземляющий контур. С одной стороны, расположение точек замыкания вблизи подстанции приведет к большим токам в заземляющей сети и, соответственно, к большим токам КЗ, которые более активно воздействуют на элементы максимальной защиты. С другой стороны, расположение точек замыкания на удалении от подстанции приводит к меньшим токам КЗ и заземляющего контура, однако эти токи могут оказаться соизмеримыми с пусковыми токами двигателей и, следовательно, не чувствительны для максимальной токовой защиты. В связи с этим рассмотрим ситуацию, которая представляется наиболее неблагоприятной – точки пробоя находятся на максимальном удалении от подстанции (в конце кабелей питания приводов комбайна и конвейера – точки 3 и 4 на рис. 1). Отметим также, что для указанной комбинации точек математическое описание по МСС является наиболее сложным по сравнению с другими комбинациями.

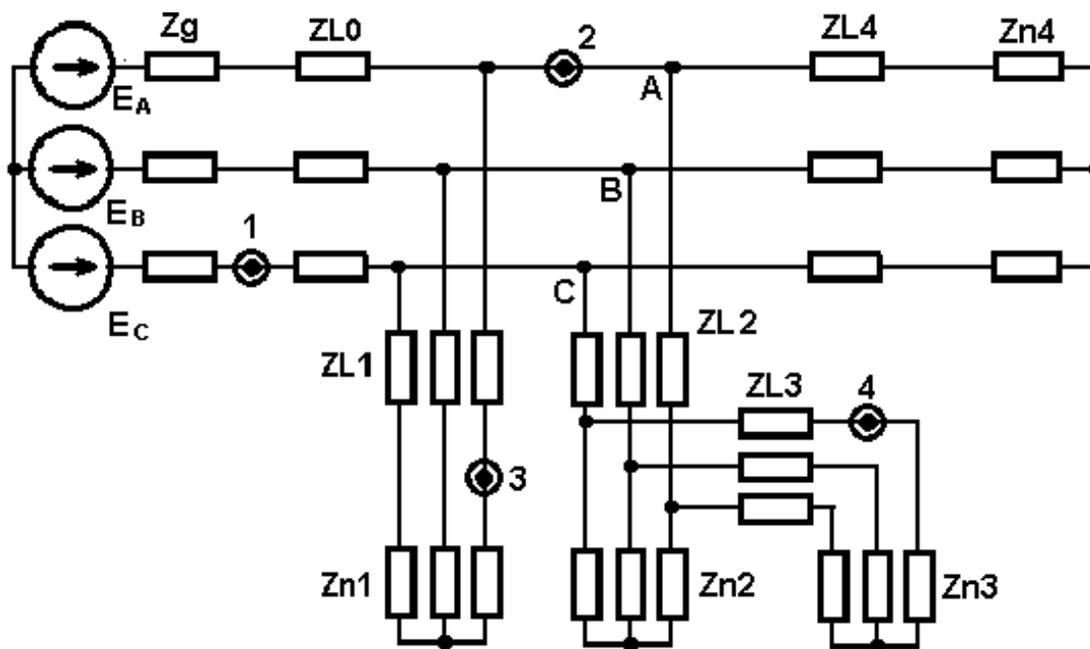


Рис. 1. Схема электроснабжения участка угольной шахты.

Замена силовой части сети относительно точек замыкания на заземляющий контур эквивалентным генератором возможна только при использовании МСС и правомочна в следующих случаях. Во-первых, заменяемая система должна быть линейной. Это условие выполняется при допущении, что частота вращения двигателей за время действия аварийной ситуации не меняется (иначе МСС, в основе которого заложен принцип наложения, не может быть применен). Во-вторых, заменяемая система должна быть двухполюсником, следовательно схема рис. 1 не должна быть связана с заземляющим контуром кроме точек КЗ. Это условие также выполняется, если пренебречь поперечной проводимостью кабелей, что в пределах поставленной задачи вполне приемлемо (токи короткого замыкания в сотни раз превышают токи утечек кабелей).

Для определения параметров эквивалентного генератора необходимы два численных эксперимента математических моделей: а) опыт холостого хода (по отношению к “земле”, а не к работающим двигателям), в результате которого определяется эдс эквивалентного генератора; б) опыт короткого замыкания (“настоящее” двухфазное КЗ), в результате которого определяется комплекс внутреннего сопротивления эквивалентного генератора.

При исследовании приняты допущения:

- поперечная проводимость кабелей отсутствует (силовая цепь имеет связь с заземляющей цепью только в двух точках КЗ и, следовательно, является активным двухполюсником);
- параметры вращающихся машин за время действия аварийной ситуации не изменяются (это значит, что рассматриваемая система линейна и к ней можно применить МСС);
- сопротивления двигателей прямой последовательности принимаются равными их эквивалентному входному сопротивлению в номинальном

- режиме, сопротивления обратной последовательности равны их эквивалентному входному сопротивлению в режиме противовключения; а сопротивления нулевой последовательности бесконечно велики;
- продольные сопротивления кабелей прямой и обратной последовательностей равны, а сопротивление нулевой последовательности равно их учетверенному значению;
 - в моделях рассматривается только статический режим; это значит, что экспоненциальные составляющие токов (потенциалов) не учитываются, а кратковременное действие их пиковых (ударных) значений не рассматривается.

Рассмотрим математическую модель силовой цепи (рис. 1) для условия, когда пробой на заземляющий контур происходит в точках 3 (фаза А) и 4 (фаза С). Однолинейное (для фазы А) изображение цепи рис. 1 для токов прямой последовательности приведено на рис. 2,а, где напряжение в точках пробоя представляется величинами соответственно U_{3s_1} и U_{4s_1} . Схема замещения для обратной последовательности аналогична схеме рис. 2а и отличается только отсутствием эдс источника питания и сменой индексов, определяющих номер последовательности). На рис. 2,б приведена схема замещения для нулевой последовательности. На схемах рис. 2 а, б приставка “s” говорит о принадлежности к симметричным составляющим. Индекс для напряжения соответствует номеру симметричной составляющей. Первый индекс токов соответствуют номеру ветви, а второй индекс – номеру симметричной составляющей.

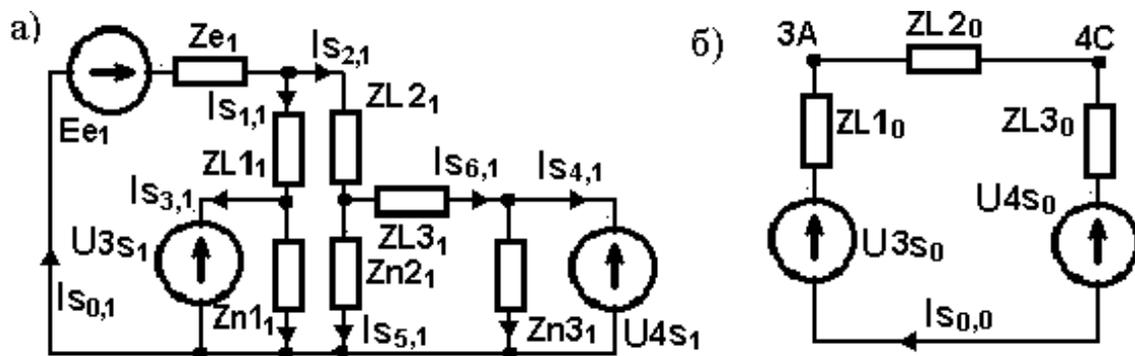


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения для точек пробоя 3А и 4С: а) для прямой и обратной последовательностей; б) для нулевой последовательности.

Схема рис. 2а описывается для прямой последовательности системой уравнений для четырех узлов и трех независимых контуров:

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

$$I_{s1,1} - I_{s3,1} - U_{3s_1}/Z_{n1_1} = 0, \quad (2)$$

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

$$I_{s6,1} - I_{s4,1} - U_{4s_1}/Z_{n3_1} = 0, \quad (4)$$

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} - I_{s1,1} \cdot Z_{L1_1} + U_{3s_1} = E_1, \quad (5)$$

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} + I_{s2,1} \cdot Z_{L2_1} + I_{s6,1} \cdot Z_{L3_1} + U_{4s_1} = E_1, \quad (6)$$

$$I_{s_{6,1}} \cdot ZL3_1 - I_{s_{5,1}} \cdot Zn2_1 + U4s_1 = 0, \quad (7)$$

Эквивалентная схема замещения для обратной последовательности аналогична схеме рис. 2,а. Различие состоит в существенном изменении параметров двигателей и отсутствии источника E_e . Этой схеме соответствует аналогичная система уравнений:

$$I_{s_{0,2}} - I_{s_{1,2}} - I_{s_{2,2}} = 0; \quad (8)$$

$$I_{s_{1,2}} - I_{s_{3,2}} + U3s_2/Zn1_2 = 0, \quad (9)$$

$$I_{s_{2,2}} - I_{s_{5,2}} - I_{s_{6,2}} = 0, \quad (10)$$

$$I_{s_{6,2}} - I_{s_{4,2}} - U4s_2/Zn3_2 = 0, \quad (11)$$

$$I_{s_{0,2}} \cdot Ze_2 - I_{s_{1,2}} \cdot ZL1_2 + U3s_2 = 0, \quad (12)$$

$$I_{s_{0,2}} \cdot Ze_2 + I_{s_{2,2}} \cdot ZL2_2 + I_{s_{6,2}} \cdot ZL3_2 + U4s_2 = 0, \quad (13)$$

$$I_{s_{6,2}} \cdot ZL3_2 - I_{s_{5,2}} \cdot Zn2_2 + U4s_2 = 0, \quad (14)$$

$$I_{s_{0,2}} \cdot Ze_2 - I_{s_{1,2}} \cdot ZL1_2 + U3s_2 = 0, \quad (15)$$

$$I_{s_{0,2}} \cdot Ze_2 + I_{s_{2,2}} \cdot ZL2_2 + (U4s_2/Zn3_2 + I_{s_{4,2}}) \cdot ZL3_2 + U4s_2 = 0, \quad (16)$$

Схема замещения для токов нулевой последовательности (рис. 2,б) предельно упрощена, так как последние не замыкаются по цепям исправных двигателей и питающего трансформатора, а поперечные проводимости кабелей отсутствуют. Уравнение для нулевой последовательности:

$$I_{s_{0,0}} \cdot (ZL1_0 + ZL2_0 + ZL3_0 + Rz) + U3s_0 - U4s_0 = 0; \quad (17)$$

Граничные условия в данной ситуации учитываются следующим образом:

- в сечениях цепи (рис.1), где находятся точки 3 и 4, два из трех токов, замыкающихся на землю, равны нулю (для точки 3 токи фаз В и С, для точки 4 токи фаз А и В);
- потенциалы (относительно земли) двух точек пробоя равны произведению токов короткого замыкания этих точек на сопротивление заземления Rz в этих же точках.

Граничные условиям отвечает система уравнений:

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

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

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

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

$$(I_{s_{0,0}} + I_{s_{4,1}} + I_{s_{4,2}}) \cdot Rz - U4s_0 - U4s_1 - U4s_2 = 0; \quad (22)$$

$$(-I_{s_{0,0}} + a \cdot I_{s_{3,1}} + a^2 \cdot I_{s_{3,2}}) \cdot Rz - U3s_0 - a \cdot U3s_1 - a^2 \cdot U3s_2 = 0; \quad (23)$$

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

Rz – эквивалентное сопротивление заземления относительно точек пробоя.

Отметим, что система (1...23) позволяет не только установить параметры эквивалентного генератора, но и исследовать режим силовой цепи в конкретной аварийной ситуации. Для этого достаточно определить все токи симметричных

составляющих с последующим переходом к токам ветвей цепи рис. 1. Необходимая для этого добавочная информация – входное сопротивление заземляющего контура относительно точек пробоя.

Предлагаемая модель была использована для конкретных рабочих условий ($U = 660$ В; мощности двигателей 2 х 125 кВт, 2 х 55 кВт и 30 кВт; длины кабелей 30 м (магистральный), 230 м (комбайн), 60 и 180 м (конвейер) и 70 м – другие потребители участка). Полученные результаты полностью согласуются с ранее выполненными исследованиями /1/, однако предлагаемый метод проще в применении, менее трудоемок и, главное, легче формализуется. В частности, полученные значения внутреннего сопротивления эквивалентного генератора для указанных рабочих условий находятся в пределах $0.291 \cdot e^{j \cdot 20 \text{ град.}} \dots 0.286 \cdot e^{j \cdot 22 \text{ град.}}$, Ом, причем, первому (большему по модулю) значению сопротивления соответствует номинальный режим двигателей, а второе значение получено при двукратной перегрузке (режим близкий к критическому) двигателей комбайна – наиболее мощного из приводов исследуемой цепи.

Тот факт, что полученное значение внутреннего сопротивления эквивалентного генератора меняется незначительно при изменении нагрузки наиболее мощного из приводов (разброс значений меньше 2 %), является подтверждением второго из принятых допущений (о линейности системы вне зависимости от скольжения двигателей), следовательно рассматриваемая цепь может быть представлена эквивалентным генератором.

ВЫВОД: На примере силовой цепи электроснабжения шахтного участка для наиболее неблагоприятного аварийного режима получена математическая модель, позволяющая силовую цепь заменить эквивалентным генератором относительно двух, разнесенных в пространстве, точек замыкания на сеть заземления.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ковалев 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 і енергетика”, випуск 41: Донецьк: ДонДТУ, 2002. – с. 234-238.
2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка – К.: Вища шк., 1992, – 439 с.
3. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрifiкация подземных горных работ. «Недра», М. – 1972.