

УДК 621.311

Ковалев А.П.¹, Черноус Е.В.², Черепня Е.Н.³, Нагорный М.А.⁴

О ВЛИЯНИИ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ НА БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Предложено и на примере обосновано техническое решение, направленное на повышение уровня безопасности труда на предприятиях горнодобывающей промышленности. Идея заключается во введении в систему защитного отключения участковых низковольтных электрических сетей дублирующих звеньев. Предварительные расчеты указывают на существенное (на целый порядок) повышение работы системы защитного отключения при относительно небольших капиталовложениях.

Известно, что в участковых шахтных сетях напряжением до 1000В двойному замыканию на заземляющий контур в различных точках и фазах сети предшествует появление однофазной утечки на землю в одной из фаз. За время существования неотключенного однофазного замыкания (ОЗ), как правило, происходит пробой в месте ослабленной изоляции одной из фаз, находящихся под повышенным напряжением.

Ранее проведенные исследования подобной ситуации [1] показали, что при некоторых условиях (например, точки замыкания на заземляющий контур удалены от подстанции либо оказывают влияние сопротивления сопровождающих аварию дугообразований) токи замыкания соизмеримы с пусковыми токами двигателей, что исключает надежную работу максимальной токовой защиты и способствует развитию аварии до катастрофических последствий. Существование двухфазного замыкания в различных точках сети представляет собой чрезвычайную опасность в отношении взрывов (при наличии повышенной концентрации метана или угольной пыли), пожаров (возможность воспламенения изоляции кабелей и прочих горючих материалов) и поражения человека электрическим током (при прикосновении к корпусу электрооборудования или элементам сети заземления между точками ОЗ).

Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что подобная аварийная ситуация недопустима, и, для ее предотвращения следует исключить предпосылки ее возникновения, то есть, предусмотреть надежное отключение ОЗ системой защитного отключения (устройство защитного отключения УЗО, автоматический выключатель). Для этого, по мнению авторов, еще следует разработать и обосновать соответствующие технические решения.

Задачей данной статьи ставится разработка и обоснование технических решений по повышению надежности системы защитного отключения, применяемого в участковых шахтных сетях.

Материалы и результаты исследований

Для определения частоты появления неотключаемых утечек тока на землю Я предлагается формула:

$$H = \frac{1}{2^m} \lambda_j \prod_{i=1}^m \theta_i^2 \lambda_{x,i}^2, \quad (1)$$

где λ_j – параметр потока появления ОЗ в j -том элементе сети; $\lambda_{x,i}$ – параметр потока отказов в срабатывании i -того защитного устройства; θ_i – интервал времени между профилактическими осмотрами системы отключения i -того защитного коммутационного аппарата или i -той схемы УЗО; m – число защитных аппаратов, отключающих сеть при появлении утечки тока на землю.

¹ ДонНТУ, д-р техн. наук, проф.

² ДонНТУ, аспирант

³ ДонНТУ, магистрант

⁴ УкрВНИИВЭ

Формула (1) справедлива при выполнении следующих условий: интервалы времени между появлениями токов утечки в сети, интервалы времени между отказами в срабатывании системы отключения защитных коммутационных аппаратов, а также, интервалы времени между повреждениями в схеме УЗО не противоречат экспоненциальным функциям распределения вероятностей с параметрами соответственно λ_j и $\lambda_{s,i}$ и, кроме того, соблюдается условие

$$\theta_i \lambda_{s,i} < 0.1. \quad (2)$$

Для случаев, при которых условие (2) не выполняется, кафедра Электроснабжения промышленных предприятий и городов разработала математические модели в виде систем линейных дифференциальных уравнений, позволяющих определить частоту (вероятность) возникновения в сети неотключаемых замыканий на землю. Разработан принцип составления логических схем замещения для оценки сложных аварийных ситуаций, а также методы сбора и обработки необходимой статистической информации.

При выводе зависимости (1) были приняты следующие допущения:

- устройства защиты могут выходить из строя только в режиме ожидания, т.е. мало вероятно, что бы оно отказало в момент повреждения в сети [2, 3];
- отказы в схеме УЗО и приводе выключателя выявляются и устраняются только в результате профилактических проверок, при этом предполагается, что проверки УЗО и привода выключателя абсолютно надежны;
- под отказом в срабатывании защитного коммутационного аппарата и средств защиты будем понимать событие, которое может привести к отказу коммутационного аппарата в срабатывании при ОЗ в зоне действия УЗО.

При равенстве сроков профилактики систем отключения защитных коммутационных аппаратов (т.е. $\theta_i = \theta$, $i = \overline{1, m}$) выражение (1) примет вид:

$$H = \frac{1}{2^m} \lambda_j \theta^{2m} \prod_{i=1}^m \lambda_{s,i}^2. \quad (3)$$

Вероятность появления неотключаемого замыкания на землю в течении времени t можно определяется зависимостью:

$$Q(t) = 1 - e^{-H \cdot t}. \quad (4)$$

Если $H \cdot t < 0.1$, тогда $Q(t) \cong H \cdot t$ при $t = 1$ год $Q(1) \cong H$.

Пример. В сети рис.1, а неотключаемая однофазная утечка тока на землю ОЗ происходит в случае: появилось ОЗ в элементе 3 с частотой λ_3 , отказывает в срабатывании либо устройство защитного отключения (УЗО), которое имеет параметр потока отказов λ_2 , либо автоматический выключатель – 1, на привод которого подается сигнал УЗО. Параметр потока отказов системы отключения автоматического выключателя в подстанции обозначим λ_1 , параметр потока отказов в срабатывании системы отключения фидерного автоматического выключателя – λ_5 , а параметр потока отказов системы отключения высоковольтного КРУ-6 кВ обозначим λ_4 .

Контроль исправности УЗО и системы отключения автоматического выключателя 1, на которую воздействует УЗО, проверяется с помощью нажатия кнопки «Проверка» на панели УЗО, в результате чего, при исправной системе отключения, происходит срабатывание выключателя 1. Интервал времени между проверками УЗО обозначим θ_2 , время между проверками системы отключения автоматического выключателя 1 – θ_1 . В данном случае $\theta_2 = \theta_1$. Интервалы времени между проверками систем отключения высоковольтного КРУ (элемент 4 на схеме замещения) и автоматического фидерного выключателя (элемент 5) обозначим соответственно θ_4 и θ_5 .

Дано: $\lambda_1 = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_2 = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_3 = 5.9 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_4 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_5 = \lambda_1$;
 $\theta_1 = \theta_2 = 6 \text{ ч}$; $\theta_4 = 2190 \text{ ч}$; $\theta_5 = 168 \text{ ч}$.

Определить для систем электроснабжения изображенных на рис. 1а и для предполагаемых вариантов построения схемы защитного отключения (рис. 1, а, б, в):

а) частоту H_i при $i = \overline{1, 4}$ появления неотключаемой утечки тока на землю при повреждении изоляции в кабеле 3.

б) во сколько раз повышается безопасность участка угольной шахты по отношению к базовому варианту рис. 1, а, если вместо схемы защитного отключения рис. 1, а использовать схемы рис. 1, б, в, д.

Решение. Используя схему рис. 1, а, б, в, г составляем схемы замещения рис. 2, а, б, в, г, объясняющие возникновение неотключаемого ОЗ в сети. Согласно схеме замещения подставляем исходные данные в выражение (1):

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 0.5 \cdot \lambda_3 \lambda_2^2 \theta_2^2 + 0.5 \cdot \lambda_3 \lambda_1^2 \theta_2^2 = 0.5 \cdot \lambda_3 \theta_2^2 (\lambda_2^2 + \lambda_1^2) = \\
 &= 0.5 \cdot 0.0059 \cdot 6^2 \cdot [(0.5 \cdot 10^{-4})^2 + (0.2 \cdot 10^{-3})^2] = 4.51 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1} = 3.95 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}; \\
 H_2 &= 0.5 \cdot \lambda_3 \lambda_2^2 \theta_2^2 + 0.25 \cdot \lambda_3 \lambda_1^2 \lambda_4 \theta_1^2 \theta_4^2 = 0.5 \cdot \lambda_3 \theta_1^2 \cdot (\lambda_2^2 + 0.5 \cdot \lambda_1^2 \lambda_4^2 \theta_4^2) = 0.5 \cdot 0.0059 \cdot 6^2 \times \\
 &\times [(0.5 \cdot 10^{-4})^2 + 0.25 \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 2190^2] = 3.67 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1} = 3.22 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}; \\
 H_3 &= 0.5 \cdot \lambda_3 \lambda_2^2 \theta_2^2 + 0.25 \cdot \lambda_3 \lambda_1^2 \lambda_5 \theta_1^2 \theta_5^2 = 0.5 \cdot \lambda_3 \theta_1^2 \cdot (\lambda_2^2 + 0.5 \cdot \lambda_1^2 \lambda_5^2 \theta_5^2) = 0.5 \cdot 0.0059 \cdot 6^2 \times \\
 &\times [(0.5 \cdot 10^{-4})^2 + 0.5 \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 168^2] = 2.68 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1} = 2.35 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}; \\
 H_4 &= 0.5 \cdot \lambda_3 \lambda_2^2 \theta_2^2 + 0.125 \cdot \lambda_3 \lambda_1^2 \lambda_5^2 \lambda_4 \theta_1^2 \theta_5^2 \theta_4^2 = 0.5 \cdot \lambda_3 \theta_1^2 \cdot (\lambda_2^2 + 0.5 \cdot \lambda_1^2 \lambda_4^2 \theta_4^2) = \\
 &= 0.5 \cdot 0.0059 \cdot 6^2 [(0.5 \cdot 10^{-4})^2 + 0.125 \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 168^2 \cdot 2190^2] = \\
 &= 2.66 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1} = 2.33 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Расчеты показали, что если, в случае появления ОЗ в защищаемой сети, сигнал на отключение автоматического выключателя подстанции дублировать на:

- отключение высоковольтного КРУ (рис. 1, б), то надежность отключения поврежденного участка сети увеличивается в $K_1 = \frac{H_1}{H_2} = \frac{5.1 \cdot 10^{-5}}{2.97 \cdot 10^{-6}} = 12.3$ раза;

- отключение автоматического фидерного выключателя (рис. 1, в), то надежность возрастает в $K_2 = \frac{H_1}{H_3} = \frac{5.1 \cdot 10^{-5}}{3.47 \cdot 10^{-6}} = 16.8$ раза;

- в случае подачи дополнительного сигнала на отключение и на выключатель КРУ и на фидерный выключатель (рис. 1, д), кратность повышения надежности отключения составит $K_3 = \frac{H_1}{H_4} = \frac{5.1 \cdot 10^{-5}}{3.02 \cdot 10^{-6}} = 17.0$ раза, что не на много превышает предыдущий вариант.

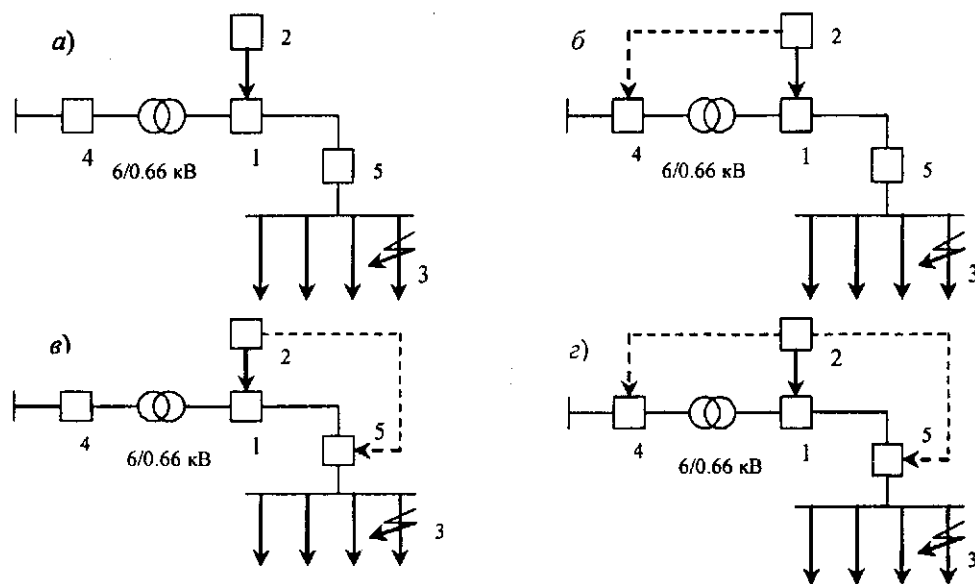


Рис. 1 - Варианты повышения надежности системы защитного отключения:
 1 — автоматический выключатель в участковой подстанции; 2 — блок защиты от утечек тока на землю (УЗО); 3 - повреждение изоляции кабеля; 4 - высоковольтное КРУ-6 кВ; 5 - автоматический фидерный выключатель.

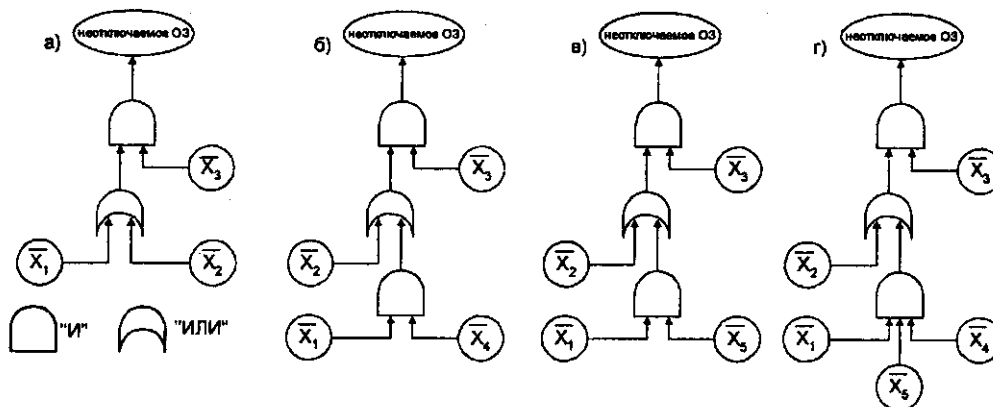


Рис. 2 – Деревья возникновения неотключаемых ОЗ в сети:
 $\overline{X_1}$ - отказ в срабатывании системы отключения автоматического выключателя в подстанции; $\overline{X_2}$ - отказ в срабатывании блока защиты от утечек тока на землю; $\overline{X_3}$ - ОЗ в одном из кабелей защищаемой сети; $\overline{X_4}$ - отказ в срабатывании системы отключения высоковольтного КРУ-6 кВ; $\overline{X_5}$ - отказ в срабатывании системы отключения автоматического фидерного выключателя.

Вывод

Очевидно, что одним из технических решений, направленных на повышение надежности системы отключения участковой шахтной сети может служить любой из вариантов, выше изложенных.

Перечень ссылок

1. Ковалев А.П. Моделирование шахтной участковой сети при двухфазном замыкании на заземляющий контур / А.П. Ковалев, В.П. Черноус, Е.В. Черноус // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: "Електротехніка й енергетика". - вип. 41. - Донецьк: ДонДТУ, 2002. - С. 234-238.
2. Фабрикант В.П. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты / В.П. Фабрикант // Электричество. - 1963. - №9. - С. 36-40.
3. О расчете надежности систем электроснабжения газовых промыслов / И.В. Белоусенко, М.С. Ершов, А.Л. Ковалев и др. // Электричество.-2004.-№3. - С. 23-28.
4. Ковалев А.П. О вероятности поражения человека электрическим током в сетях до 1000 В с изолированной нейтралью при замыкании двух фаз на землю / А.М. Ковалев, О.А. Шевченко, Е.А. Журавель // Электричество. - 2003. - №1. - С. 23-27.

Статья поступила 21.02.2005