

где  $\Delta\rho = r(r-s)\left[(r+s)^2 \cos^2 \Omega_2 t + r^2 \sin^2 \Omega_2 t\right]^{-1/2}$ ,  $\alpha_\tau$  - торцевой угол зацепления.

Учет дополнительной деформации  $\delta(t)$  позволяет уточнить уравнение (7) и получить модель возбуждения колебаний при дефектном зубчатом венце

$$m\ddot{\alpha} + K(\omega)\dot{\alpha} + c(t)\alpha = -P_{cm} \frac{\Delta c(t)}{c_{\min}} - c(t)\delta(t), \quad (11)$$

Второе слагаемое правой части уравнения (11)

$$F_s(t) = \delta(t)c(t) \quad (12)$$

является описанием возмущающей силы, обусловленной дополнительной деформацией  $\delta(t)$  и переменной суммарной жесткостью зацепления  $c(t)$ . Спектр этой силы отличается от спектра возмущающей силы  $F_c(t)$  наличием оборотной частоты  $\Omega_2$  вращения зубчатого венца мельницы. Спектры объединяет присутствие частот, равных зубцовой частоте  $\omega$  и ее высшим гармоникам.

Приведенная математическая модель предназначена для разработки алгоритма диагностирования и определения диагностических параметров контроля качества изготовления и монтажа зубчатого венца привода барабанной мельницы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик.-М.: Госгортехиздат, 1963.- 616с.
2. Иорин Ю.И. Виброметрия.- М.: Машгиз, 1963.- 771с.
3. Анализ вынужденных параметрических колебаний косозубой передачи на ЭВМ / Э.Л. Айрапетов, В.И. Азархов, А.А. Жирнов и др. // Динамические процессы в механизмах в зубчатых передачах.- М., 1986.- С.111-126.

УДК 621.316.9

В.Г.Скосырев

#### АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ КАРЬЕРНЫХ СЕТЕЙ

Сформульовані основні вимоги до засобів захисту кар'єрних розподільчих мереж від несиметричних пошкоджень, зроблена їх класифікація, а також представлені результати досліджень їх роботоздатності з урахуванням особливості експлуатації кар'єрних мереж.

Надежная работа релейной защиты от замыканий на землю значительно улучшает условия электробезопасности. Однако ни одно из устройств не может гарантировать благополучного исхода при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям электрических сетей напряжением выше 1000 В. Поэтому основным назначением устройств защитного отключения является обеспечение вторичных критериев электробезопасности и недопущение дальнейшего развития аварии [2,6]. Исходя из этого, к основным требованиям,

предъявляемым к устройствам защиты от замыканий на землю следует отнести:

- 1) высокая чувствительность к переходным сопротивлениям в точке замыкания;
- 2) селективность (избирательность) действия;
- 3) быстродействие;
- 4) надежность (функциональная и аппаратная);
- 5) работоспособность при изменении входного сигнала в широком диапазоне;
- 6) универсальность (схемы и конструкции).

Все многообразие устройств защиты от замыканий на землю можно классифицировать по принципу действия следующим образом:

- реагирующие на токи нулевой последовательности;
- реагирующие на направление мощности нулевой последовательности;
- реагирующие на наложенные токи не промышленной частоты;
- реагирующие на уровень высших гармонических составляющих в токе нулевой последовательности;
- реагирующие на несимметрию фазных напряжений;
- комбинированные устройства защиты.

Необходимо отметить, что каждая группа имеет несколько разновидностей. Так простые токовые защиты могут реагировать на активную составляющую тока нулевой последовательности, на искусственно создаваемую составляющую тока замыкания, на первый полупериод тока замыкания и др. Защиты, реагирующие на направление мощности нулевой последовательности, могут работать либо в переходном, либо в установившемся режиме.

Защитные устройства, работающие на наложенном переменном токе с частотой ниже промышленной, имеют сравнительно большое время срабатывания, а работающие на переменном оперативном токе с частотой выше промышленной могут ложно работать в переходных режимах, которые сопровождаются появлением высших гармонических составляющих на неповрежденных линиях [7]. Кроме того, наложение на распределительную сеть переменного тока повышенной частоты при значительной емкостной проводимости изоляции, приводит к значительным утечкам оперативного тока. Защитные устройства, работающие на наложенном постоянном оперативном токе при их высокой чувствительности и быстродействии, не обладают селективностью действия и могут в карьерных сетях применяться лишь в качестве резервных.

Защиты, реагирующие на параметры переходного процесса, обладают недостаточной функциональной надежностью, так как рабочие сигналы таких устройств зависят от параметров распределительной сети и от момента (фазы) замыкания на землю [4].

Устройства защиты, реагирующие на несимметрию фазных напряжений, не обладают селективностью и склонны к ложной работе при частых коммутациях в распределительной сети.

Комбинированные устройства защиты имеют достаточно сложные схемы, что снижает их аппаратную надежность. Отмеченные недостатки сдерживают широкое применение таких устройств в карьерных распределительных сетях.

Наиболее широкое распространение в карьерных распределительных сетях получили устройства защиты, реагирующие на параметры (ток и мощность) нулевой последовательности в установившемся режиме замыкания на землю. Применение токовых защит ограничивается относительно низкой их чувствительностью, структурой и режимом работы непосредственно систем электропитания.

Первая причина связана с необходимостью выбора тока срабатывания из условия отстройки от собственного тока, защищаемого присоединения с учетом переходного процесса и практически исключает возможность применения таких защит в сетях с компенсированной нейтралью. Вторая причина, ограничивающая применение токовых защит, связана с динамикой изменения параметров нулевой последовательности и взаимным соотношением тока нулевой последовательности и собственного тока защищаемого присоединения, что резко ограничивает применение таких защит даже в сетях с изолированной нейтралью.

Электрические сети с резистором в нейтрали являются наиболее благоприятными с точки зрения применения простых токовых защит от замыканий на землю, так как в таких сетях практически отсутствуют переходные процессы при глухих замыканиях на землю [5].

Основным достоинством простых токовых защит, реагирующих на ток нулевой последовательности в установившемся режиме замыкания, следует считать то, что такие защиты в отличие от направленных устройств реагируют на двойные замыкания на землю. С помощью токовых защит возможно выполнить достаточно чувствительную защиту от двойных замыканий на землю независимо от режима работы нейтрали сети.

Одним из видов токовых защит от замыканий на землю, получивших распространение в сетях с компенсированной нейтралью, являются устройства, реагирующие на высшие гармонические составляющие тока нулевой последовательности. В общем случае ток в поврежденном присоединении равен сумме основной и высших гармоник собственных токов всех неповрежденных присоединений и гармоник тока дугогасящей катушки:

$$I_3^{(1...n)} = I_2^{(1...n)} + I_3^{(1...n)} + \dots + I_m^{(1...n)} + I_k^{(1...n)},$$

где  $m$  - число присоединений в сети;  $n$  - порядковый номер гармонической составляющей тока замыкания.

Уровень и состав гармоник в сетях изменяется в широких пределах. Гармонические составляющие в разных точках сети существенно различны в каждый момент времени и изменяются с течением времени в зависимости от включенного оборудования, графика нагрузки, напряжения и т.д. [1].

Гармонические составляющие установившегося остаточного тока замыкания на землю могут быть использованы для действия защиты при условии, что в сети имеется достаточно стабильный состав и уровень гармоник. Необходимая чувствительность защиты может быть обеспечена лишь при небольшом (несколько Ом) переходном сопротивлении в точке замыкания. Кроме того, для защиты, использующей естественные гармоники установившегося тока замыкания на землю, трудно согласовать селективность действия и чувствительность.

Применяемые в компенсированных сетях средства защиты, реагирующие на высшие гармонические составляющие тока замыкания на землю, можно разделить по принципу определения поврежденного присоединения на две группы:

- абсолютного замера, основанного на измерении абсолютного уровня гармоник;

- относительного замера, заключающегося в сравнении уровней гармоник присоединений и определении присоединения с наибольшим уровнем (при однофазных замыканиях на землю содержание высших гармоник в токе нулевой последовательности поврежденного присоединения практически всегда существенно выше, чем в токах неповрежденных присоединений).

Примером устройств, реагирующих на сумму высших гармонических составляющих, служат разработки ВНИИЭ для сетей с компенсированной нейтралью - УСЗ-2/2 (на принципе абсолютного замера); УСЗ-3 и УСЗ-3М (на принципе относительного замера).

Надежное функционирование рассматриваемых устройств защиты возможно только при достаточно высоком уровне и стабильности используемых для работы защиты естественных гармоник. Общим недостатком устройств, реагирующих на высшие гармонические составляющие в токе нулевой последовательности, является сложная зависимость состава и уровня естественных гармоник от числа линий, режима настройки компенсирующего устройства, от сопротивления в месте повреждения и от наличия помех. Отмеченные недостатки практически исключают возможность применения таких защит в распределительных сетях открытых горных работ.

Устройства направленной защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на параметры установившегося режима замыкания, работают на основе сравнения по фазе напряжения и токов нулевой последовательности (типа ЗЗП-1М, РЗН-3, ЗЗН-1) рекомендованы только для сетей с полностью изолированной нейтралью, так как в таких сетях углы между токами и напряжением нулевой последовательности практически не зависят от параметров изоляции сети и переходного сопротивления в точке повреждения при однофазных замыканиях.

В сетях с компенсированной нейтралью фазовые соотношения между векторами токов и напряжения нулевой последовательности не являются фикси-

рованными. Угол между векторами тока и напряжения нулевой последовательности в сети с компенсированной нейтралью определяется, в основном, режимом настройки компенсирующего устройства и значением переходного сопротивления в точке повреждения и может изменяться в пределах 180 эл.град. [3]. Указанное обстоятельство в общем случае исключает возможность применения названных направленных устройств защиты в сетях с компенсированной нейтралью.

Результаты выполненных в Национальной горной академии исследований амплитудных и фазовых характеристик тока и напряжения нулевой последовательности при сложных видах замыкания на землю (при двойных замыканиях на землю и при замыканиях со стороны электроприемника) [3] позволяют сделать вывод: в общем случае направленные устройства защиты оказываются неспособными при нетрадиционных замыканиях на землю как в сетях с изолированной так и с компенсированной нейтралью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. -М.: Энергия, 1974. -184 с.
2. Инструкция по безопасной эксплуатации электрооборудования и электросетей на карьерах. -М.: Недра, 1982. -80 с.
3. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. - 192 с.
4. Попов Т.Н., Пачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. -М.: Энергоатомиздат, 1986. - 248 с.
5. Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудасв В.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. -М.: Наука, 1985. -136 с.
6. Сирота И.М. Влияние режимов нейтрали в сетях 6-35 кВ на условия безопасности. //Режимы нейтрали в электрических системах. -К.: 1974. -С.84-104.
7. Сирота И.М. Напряжение нулевой последовательности частоты 100 Гц, возникающее при замыканиях на землю в компенсированных сетях. //Проблемы технической электродинамики. Вып. 43. -Наукова думка, -Киев. 1973. -С. 14-23.

УДК 622.794:622.349.4

Н.А. Головач

### ЗАВИСИМОСТИ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СИЛЫ ТРЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Розглядається залежність доторкових напружень потоку о тверді границі при русі рідини в каналі, який має прямокутний переріз, в залежності від режиму течії.

Величина уклона трения  $i_f$  связана с потерей напора  $\Delta H_{тр}$  на длине канала  $ds$  формулой:

$$\Delta H_{тр} = i_f ds. \quad (1)$$

Одновременно с этим потеря напора на длине канала  $ds$  за счет распределенных сил трения в предположении, что местные сопротивления в канале отсутствуют, равна [1]: