

МИНИМИЗАЦИЯ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Ефективність компенсації ємнісних струмів однофазного замикання на землю відповідає резонансному, чи близькому до нього, режиму настроювання компенсуючого пристрою. У статті дано критичний аналіз найбільш розповсюджених методів автоматичного настроювання дугогасячих реакторів і можливості їхнього використання в динамічних розподільчих мережах.

Эффективность компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю отвечает резонансному, или близкому к нему, режиму настройки компенсирующего устройства. В статье представлен критический анализ наиболее распространенных методов автоматической настройки дугогасящих реакторов и возможности их использования в динамичных распределительных сетях.

The efficiency of compensation of capacitor currents of single-phase short circuit on ground corresponds to a resonant, or close to it, mode of adjustment of the compensating device. In the paper the critical analysis of the most widespread methods of automatic adjustment of arc extinguishing reactors and the opportunity of their use in dynamical distributive networks is given.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения показывает, что наиболее распространенным повреждением в распределительных сетях напряжением 6...10 кВ являются однофазные замыкания на землю. Степень негативных последствий при таких повреждениях зависит от значения аварийного тока, характера замыкания и режима работы нейтрали сети. При токах замыкания на землю более 30 (20) А, согласно «Правилам устройства электроустановок», должна осуществляться компенсация емкостной составляющей. Однако эффективность работы электрических сетей с компенсированной нейтралью определяется в основном степенью настройки дугогасящего реактора (компенсирующего устройства) в резонанс с емкостью сети относительно земли.

Изучив специфику и характер протекания аварийных процессов в трехфазных электрических сетях, можно сделать вывод, что наиболее распространенным повреждением является дуговое замыкание на землю [2 – 4]. Причем характер горения дуги напрямую зависит от величины тока замыкания. Ток в контуре замыкания зависит от параметров распределительной сети и мощности нагрузки, подключаемой к данному источнику. В общем случае величина тока замыкания зависит от сопротивления сети относительно земли и чем больше параллельно включенных элементов, тем меньше общее сопротивление. Исходя из данных условий, для уменьшения токов при замыкании на землю применяют ряд мер. К ним следует отнести дробление подстанций, применение глубокого

ввода, отдельное питание поверхности и подземных выработок горных предприятий. Однако эти технические решения дорогостоящи и должны предусматриваться или на уровне проектирования, или в случае капитального изменения системы электроснабжения и технического перевооружения оборудования. На сегодняшний день для большинства предприятий это трудноосуществимо по экономическим соображениям. Поэтому наиболее часто работы проводятся по оптимизации режима нейтрали для конкретного производства. Эффективным средством уменьшения аварийных токов однофазного замыкания на землю является частный случай изолированной нейтрали, т.е. применение компенсированной системы – нейтраль заземлена через дугогасящий реактор. При правильном использовании всех достоинств резонансного заземления можно добиться хороших результатов при незначительных капитальных затратах на перевооружение сети.

Цель статьи – изложить оценку методов автоматической настройки режима компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях напряжением 6...10 кВ.

Эффективность компенсации емкостных токов замыкания на землю и работы электрических сетей с компенсированной нейтралью в значительной степени зависит от режима настройки компенсирующего устройства (дугогасящего реактора). С учетом значений остаточных аварийных токов и уровней внутренних перенапряжений при дуговых замыканиях на

землю большинство исследователей отдаст предпочтение резонансной настройке индуктивности компенсирующего устройства с емкостью сети относительно земли, т.е.

$$x_L = x_C \quad \text{или} \quad \omega L_K = 1/(3\omega C), \quad (1)$$

где x_L , x_C – соответственно индуктивное сопротивление компенсирующего устройства и емкостное сопротивление всей электрически связанной сети относительно земли; L_K – индуктивность компенсирующего устройства; C – емкость одной фазы всей электрически связанной сети относительно земли.

При резонансной настройке компенсирующего устройства, а также при его расстройке в пределах 5 %, даже теоретически перенапряжения на неповрежденных фазах не могут превысить $2,75U_{\phi}$. Увеличение степени расстройки компенсации сверх 5 % приводит к быстрому нарастанию уровня перенапряжений, а при расстройке компенсирующего устройства на 20 % от резонансной эффективность компенсирующих устройств в части ограничения перенапряжений при замыканиях на землю практически не ощущается по сравнению с сетями с полностью изолированной нейтралью. Также при резонансной настройке компенсирующего устройства и при незначительных расстройках компенсации в электрических сетях запасы электрической прочности изоляции по отношению к воздействию перенапряжениям увеличиваются до 30 % [2, 3].

Условие (1) в установившемся режиме однофазного замыкания на землю обеспечивает равенство по величине емкостной I_C и индуктивной I_L составляющих токов замыкания на землю и, учитывая их направление, остаточный ток замыкания становится равным активной составляющей тока замыкания I_a (без учета гармонических составляющих тока замыкания). В случае несоблюдения условия (1) остаточный ток определяется как геометрическая сумма активной и реактивной составляющих. Реактивная составляющая в свою очередь зависит от степени расстройки (отклонения от резонансной настройки) компенсации:

$$v = (I_L - I_C) / I_L = 1 - 3\omega^2 CL_K = 1 - \kappa, \quad (2)$$

где $\kappa = I_C / I_L = 3\omega^2 CL$ – коэффициент (степень) настройки компенсирующего устройства в резонанс с емкостью сети.

Необходимо напомнить, что эффективность компенсации емкостных токов замыкания на

землю наблюдается при резонансном и близких к нему режимах настройки компенсирующих устройств. Учитывая возможное изменение параметров распределительных сетей (оперативные и аварийные переключения, наращивание ЛЭП и т.п.), необходимо ориентироваться на применение устройств автоматической настройки дугогасящих реакторов.

В настоящее время разработано достаточное количество автоматических регуляторов настройки дугогасящих устройств. Их можно классифицировать по принципам настройки, т.е. по величинам, на изменение которых они реагируют:

- настройка по модели сети;
- по проводимости контура нулевой последовательности;
- по фазовым характеристикам контура нулевой последовательности;
- по максимуму напряжения смещения нейтрали (напряжение на катушке).

Рассмотрим кратко указанные основные принципы автоматической настройки дугогасящих катушек.

1. *Настройка по модели сети* возможна как в нормальном режиме, так и в режиме однофазного замыкания на землю. Информация о конфигурации сети с помощью телемеханической связи передается от действующей схемы сети на электрическую модель сети. Ток модели сети сравнивается с током модели катушки. Недостатками описанной системы настройки компенсации являются: большая сложность задающей модели при сложной схеме сети, применения автоматической системы требует телемеханической связи со всеми (абсолютно) участками сети.

2. *Автоматическая настройка по реактивной проводимости контура нулевой последовательности* состоит в следующем: от вспомогательного источника питания в контролируруемую сеть подается ЭДС, которая прикладывается к контуру нулевой последовательности. Источник ЭДС включается параллельно или последовательно дугогасящей катушке. Настройка производится по нулю реактивной составляющей тока нулевой последовательности (по нулю реактивной проводимости). Возможно также применение вспомогательной ЭДС с двумя частотами $n_1\omega$ и $n_2\omega$, где ω – рабочая частота. В этом случае необходимо выполнение условия $n_1 n_2 = 1$.

Недостатки таких систем:

- резонансная настройка осуществляется сравнением индуктивности дугогасящего реак-

тора на промышленной частоте с ранее замеренной емкостной проводимостью на непромышленной частоте; для этого необходимо проводить опыт искусственного однофазного замыкания при наладке на реальной подстанции, в процессе которого подбирают соответствующие коэффициенты;

- существующие устройства лишь отслеживают соотношение текущего емкостного сопротивления сети и индуктивного сопротивления реактора при возникновении замыкания;

- достаточная сложность в схемотехнической реализации и наладке комплекса на подстанции.

Все указанные проблемы относятся к измерителю САНК, причем они не исключаются как при повышении, так и при понижении частоты относительно промышленной.

3. *Настройка по фазовым характеристикам контура нулевой последовательности* применима для кабельных сетей, где несимметрия емкостей отсутствует, напряжение смещения нейтрали не превышает доли процента. К одной из фаз сети (опорная фаза) подключается дополнительная емкость и создается некоторое постоянное напряжение несимметрии. Напряжение смещения нейтрали, обусловленное емкостной несимметрией и расстройкой компенсации, сравнивается с напряжением опорной фазы в фазочувствительном усилителе, сигнал рассогласования с выхода которого управляет контактором включения серводвигателя плунжерной катушки. Как можно показать из векторной диаграммы, измеряемый фазочувствительным усилителем угол будет равен 90° при резонансной настройке, $0 \dots 90^\circ$ при недокомпенсации и $90 \dots 180^\circ$ при перекомпенсации. Подстройка компенсации по заданной оптимальной настройке автоматически осуществляется в нормальном режиме сети, когда замыкания на землю нет.

Напряжение нейтрали в компенсированной сети в нормальном режиме работы сети определяется по следующему выражению:

$$\frac{U_n}{U_{нс}} = \frac{1}{\sqrt{(d_0 + p\kappa)^2 + (1 - \kappa)^2}} e^{j(\varphi_\kappa - \psi)}, \quad (3)$$

где κ – коэффициент настройки дугогасящей катушки, равный отношению индуктивной и емкостной составляющих тока однофазного замыкания на землю; d_0 – коэффициент демпфирования сети с изолированной нейтралью;

$$\varphi_\kappa = \arctg \frac{d_0 + p\kappa}{1 - \kappa}; p - \text{активные потери в дуго-}$$

гасящем реакторе в относительных единицах.

Из выражения (3) видно, что при постоянном аргументе и коэффициенте демпфирования, угол φ_κ однозначно определяется коэффициентом настройки κ . Постоянное наличие напряжения смещения нейтрали создается подключением к одной из фаз сети дополнительной емкости.

4. *Настройка по максимуму напряжения смещения нейтрали* основана на использовании экстремальных регуляторов. В основу регулирования положен тот факт, что при данной конфигурации сети и коэффициенте демпфирования зависимость напряжения нейтрали от индуктивности дугогасящей катушки имеет вид резонансной кривой. При этом, как бы ни изменялось напряжение смещения нейтрали, его максимальное значение соответствует моменту резонансной настройки в данном режиме.

Схема автоматической компенсации сети является экстремальной системой с управлением по производной $\frac{dU_n}{dL_\kappa}$. Настройка произво-

дится путем автоколебательного поиска и работой элемента логического действия. За критерий точной настройки принят момент максимального смещения нейтрали, который характеризуется первой производной равной нулю $\frac{dU_n}{dL_\kappa} = 0$. На эту точку регулятор на-

страивает систему компенсации в любом режиме.

Автоматическое устройство предназначено для настройки катушки в нормальном режиме сети. В случае однофазного замыкания на землю оно отключается. При этом настройка дугогасящей катушки остается неизменной и соответствует резонансной настройке компенсации до аварии.

Оценим рассмотренные нами принципы с точки зрения применения их для динамичных систем электроснабжения (например, для карьерных распределительных сетей). Настройка по модели сети является косвенным методом настройки и обладает такими преимуществами, как повышенная помехоустойчивость, возможность настройки катушки в режиме замыкания на землю. При моделировании емкость каждой отдельной линии принимается практически постоянной, что верно для стационарных линий и не может быть распространено на карьерные

распределительные сети, которые практически постоянно изменяются (наращивание, отключение и включение некоторых потребителей и т.д.). Естественно, что моделирование таких линий представляет определенные трудности. Системы автоматической настройки по реактивной проводимости контура нулевой последовательности, как и экстремальных систем, обладают таким недостатком, как настройка дугогасящего аппарата только в резонанс. При применении фазосдвигающего трансформатора устраняется указанный недостаток только частично, т.е. возможно отклонение от резонансной настройки на определенный процент. Для устройства поддержания тока замыкания на землю заданной величины при учете изменения емкости сети практически от *max* до нуля потребуются значительные и регулируемые отклонения от резонансной настройки компенсации. Также недостатком систем данного типа является сложность и громоздкость регулирующих устройств из-за наличия вспомогательного постоянно действующего источника.

Для целей автоматической настройки компенсирующего устройства в резонанс с емкостью распределительной сети предлагается использовать новый метод непрерывного контроля значений емкости и индуктивности сети относительно земли под рабочим напряжением, основанный на использовании наложенных на сеть оперативных токов промышленной частоты. Суть предложенного метода непрерывного и оперативного контроля указанных параметров состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных сигнала, частоты которых не равны между собой и отличаются от промышленной. При этом искомые значения определяются выражениями

$$C = \frac{1}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_1^2 - U_1^2 I_2^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}},$$

$$L_k = \frac{U_1 U_2}{\omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{U_1^2 I_2^2 - U_2^2 I_1^2}}, \quad (4)$$

где I_1, U_1, ω_1 – ток, напряжение и частота первого оперативного источника; I_2, U_2, ω_2 –

ток, напряжение и частота второго оперативно-го источника.

Предложенный метод расчета емкости и индуктивности сети может быть использован для построения системы автоматической настройки любого заданного (не только резонансного) режима компенсации емкостной составляющей тока замыкания на землю. Параметром регулирования в системе управления является ток подмагничивания реактора, который увеличивает или уменьшает индуктивное сопротивление реактора.

Выводы

1. Известные методы автоматической настройки индуктивности дугогасящих реакторов по отношению к емкости сети характеризуются недостаточной чувствительностью, не учитывают динамику электрической сети и возможную несимметрию изоляции сети относительно земли.

2. Наиболее перспективным для карьерных распределительных сетей следует считать метод настройки дугогасящих устройств по результатам непрерывного контроля значений емкости и индуктивности сети относительно земли под рабочим напряжением за счет наложения на сеть двух оперативных сигналов промышленной частоты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах [Текст] / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 568 с.
2. Лихачев, Ф. В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф. В. Лихачев. – М.: Энергия, 1972. – 152 с.
3. Пивняк, Г. Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров [Текст] : Справ. пособие / Г. Г. Пивняк, Ф. П. Шкрабец. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
4. Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических сетей [Текст] / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. – К.: Наук. думка, 1985. – 264 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2009.