

УДК 621.331.3

М.П. БАДЁР (МИИТ)

Кафедра Энергоснабжение электрических железных дорог, Московский государственный университет путей сообщения, ул. Образцова 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, 127994, тел.: (495) 684-22-87, эл. почта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗОНАНСНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

### Введение

Распределительные сети 6-35 кВ, в основном, работают с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор (ДГР) нейтралью [1]. При чем, индуктивное сопротивление реактора в процессе эксплуатации должно быть равно емкостному сопротивлению фазной изоляции сети. Настроенный таким образом контур, за счет явления резонанса, способен локализовать порядка 80-85 % дуговых замыканий на землю. Следует отметить, чем выше степень расстройки контура от резонанса, тем тяжелее последствия происшедших замыканий. Это обусловлено большей частью не значением реактивной составляющей остаточного тока в месте замыкания, а снижением времени нарастания напряжения на поврежденной фазе и повышению кратности перенапряжений в сети (до 2,5 Уф.н.) [2]. В настоящее время ситуация такова, что около 50 % сетей с компенсацией емкостных токов работают со значительной расстройкой от резонанса, из-за отсутствия надежных автоматических регуляторов.

### Постановка задачи

Изначально в сети имеются факторы, приводящие к перекосам фазных напряжений относительно земли. Руководящие документы допускают эксплуатацию сетей при смещениях нейтрали не более 0,15Уф [3]. Однако, в распределительных сетях нередки случаи, когда смещение нейтрали превышает допустимые значения. Особенно это касается электрических сетей 10-35 кВ с преобладанием воздушных линий, что часто является причиной возникновения однофазных замыканий на землю, коррозии оболочек кабелей линий электропередачи и т.д. Несомненно, в таких сетях необходимо проведение мероприятий по симметрированию фазных напряжений. Однако, часто причиной перекосов фазных напряжений является принудительное искусственное смещение, рекомендуемое производителями автоматических регуляторов дугогасящих реакторов [4]. Разработка и внедрение в электрических сетях автоматиче-

ских регуляторов ДГР, способных функционировать без искусственного смещения нейтрали, является весьма актуальной задачей.

По мере эксплуатации происходит износ изоляции сети и установленного электрооборудования. Особенно эти процессы заметны в распределительных сетях, которые отличаются большой разветвленностью и оборудованных защитой от однофазных замыканий на землю, действующей на сигнал. Такие сети, как правило, имеют большие емкостные токи замыкания, так как количество отходящих линий может достигать сотни и более. Однофазные замыкания, которые при этом возникают, приводят к перенапряжениям и переходят в более тяжелый вид аварии (двухфазные и двойные замыкания), что снижает общую надежность электроснабжения и понижает безопасность сети в целом. В таком случае, сети должны оснащаться устройствами непрерывного контроля изоляции сети, причем определение поврежденных линий в таких сетях представляет большую проблему, потому что нет одного известного критерия (алгоритма), который бы однозначно правильно работал в сетях с различным способом заземления нейтрали.

### Решение задачи

Разработка и внедрение в электрических сетях напряжением 6-35 кВ устройств контроля состояния отходящих линий, с эффективным алгоритмом определения повреждений независимо от способа заземления нейтрали и структуры эксплуатируемого электрооборудования тоже относится к приоритетным направлениям развития микропроцессорных систем защиты от однофазных замыканий на землю. Поэтому, повышение надежности электроснабжения рассмотренных систем возможно только комплексным решением задачи ликвидации последствий замыканий на землю и профилактическими мероприятиями по снижению вероятности их возникновения.

К этим мероприятиям необходимо отнести:  
- постоянный контроль изоляции и диагностику электрооборудования которое предна-

© Бадер М. П., 2012

значено для борьбы с однофазными замыканиями на землю (ДГР);

- симметрирование сети и отказ от искусственного смещения нейтрали, используемого для улучшения качественных показателей систем автоматической настройки ДГР, что позволяет существенно снизить вероятность возникновения однофазных замыканий на землю и продлевает срок службы электрооборудования;

- создание условий для быстрого отключения поврежденного участка за счет повышения активной составляющей тока в месте замыкания;

- снижение уровня перенапряжений при дуговых перемежающихся замыканиях. Известно, установка высокоомного резистора в нейтрали сети параллельно настроенной индуктивности, позволяет снизить кратность перенапряжений до безопасного уровня для электрооборудования;

- определение поврежденных фидеров, путем создания селективного устройства с возможностью контроля неограниченного количества отходящих линий в сети с любым способом заземления нейтрали, в том числе и заземленной через ДГР.

В сетях напряжением 6-35 кВ получило распространение множество методов по определению фазных проводимостей, по данным которых производится выбор алгоритма работы устройств компенсации емкостных токов. Наиболее точный метод металлического замыкания применяется крайне редко из-за трудоемкости реализации и опасного воздействия на электрооборудование. Косвенные способы значительно уступают в точности измерений и суть их применения сводится к оценке емкостного тока замыкания с целью выбора емкости ДГР. Не затрагивая проблемы постоянного мониторинга состояния изоляции, применение новых способов и устройств исследования ее свойств особенно актуально по причине эксплуатации в настоящее время в сетях 6-35 кВ большого количества неуправляемых ДГР со ступенчатым регулированием индуктивности.

Для настройки дугогасящих реакторов всех типов и их диагностики специально разработан переносный прибор «Бреслер 0107.065», нашедший широкое применение и признание эксплуатационного персонала [5].

Прибор «Бреслер 0107.065» предназначен для контроля параметров изоляции и диагностики контура нулевой последовательности в электрических сетях напряжением 6-35 кВ:

- определения сопротивления утечки и значений фазных емкостей сетей с изолированной нейтралью;

- определения степени расстройки компенсации в сетях 6-35 кВ с компенсацией емкостных токов с установленными дугогасящими реакторами любого типа;

- диагностики дугогасящих реакторов на наличие короткозамкнутых витков и состояния механической части – в реакторах плунжерного типа.

Принцип действия прибора основан на возможности определения параметров динамического звена, которым представляется контур нулевой последовательности сети, по его реакции на импульсный сигнал с заданными параметрами. Длительность вводимого в нейтраль сигнала определяется переходной характеристикой контура и различна для сетей с изолированной и компенсированной нейтралью.

Схема включения прибора «Бреслер 0107.065», для определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью приведена на рис. 1.

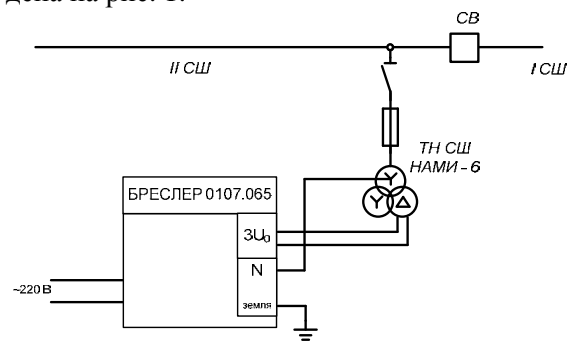


Рис. 1. Схема подключения прибора для определения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью

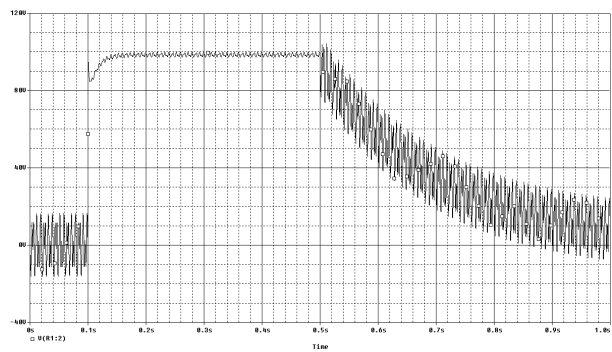


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на входе прибора в процессе определения параметров изоляции

Способ определения параметров изоляции рассчитан на применение в сетях, где отсутствуют нейтралеобразующие трансформаторы (ТН) с подключенными к ним устройствами заземления нейтрали, а также имеется не более одного измерительного трансформатора напряжения (ТН) типа НТМИ или НАМИ. При наличии двух и более ТН и ТН с устройствами за-

земления требуется разземление нулевых выводов первичной обмотки этих трансформаторов и подключение между нулевым проводом TV (TN) устройств блокировки от однофазных замыканий на землю.

Определение параметров производится в два этапа:

- сначала в нейтраль TV вводится постоянное напряжение от встроенного в прибор источника (через 0,1 с на осциллограмме) и измеряются значения напряжения на нулевом выводе TV (на клеммах «Нейтраль» и «Земля» прибора) и ток в этой цепи. По полученным значениям, по формуле находится сопротивление изоляции:

$$R_{ИЗ} = \frac{U_N}{I_N} - R_{TV}. \quad (1)$$

где  $R_{TV} = \frac{R_\Phi}{3}$ , а  $R_\Phi$  – активное сопротивление фазной обмотки TV.

- во втором этапе источник постоянного напряжения (0,5 с после включения) отключается, снимается переходная характеристика и определяется фазная емкость сети по формуле:

$$C_\Phi = \frac{\tau}{R_N} - C_0 = \frac{t_2 - t_1}{R_N \ln \frac{U_{N1}}{U_{N2}}} - C_0, \quad (2)$$

где  $U_1, U_2$ , значения напряжения в нейтрали в моменты  $t_1, t_2$ , а  $R_N$  – сопротивление, образованное параллельно включенными  $R_{ИЗ}$  и входным сопротивлением аналогового блока.  $R_0$  и  $C_0$  – входная емкость аналогового блока и устройства блокировки от однофазных замыканий на землю. В реальной сети из-за влияния индуктивности TV длительность подачи напряжения в нейтраль составляет 10 с.

Устройство блокировки от однофазных замыканий на землю встроено в прибор и представляет собой симисторный ключ, подключенный параллельно к клеммам «Нейтраль» и «Земля» прибора, срабатывающий при превышении двух параметров в режимах однофазных замыканий на землю: величины напряжения на клемме «Нейтраль» более 300 В и скорости нарастания этого напряжения более 10 В/мкс. Длительность определения параметров изоляции не превышает 30 секунд. Вычисленные данные выводятся на дисплей прибора.

Косвенные методы определения значений составляющих тока замыкания на землю в сетях с компенсированной нейтралью, в основ-

ном, ориентированы на использование для этих целей амплитудных и фазовых характеристик контура нулевой последовательности сети.

Способ вычисления емкостной составляющей тока замыкания, применяемый в приборе «Бреслер 0107.065», основан на определении тока ДГР, соответствующего резонансной настройке, по его известной величине (в положении максимального тока для плунжерного реактора, а также любого положения анцапфы ДГР ступенчатого регулирования) и отклонения расстройки компенсации от резонансной настройки. На рис. 3 – 5 приведены схемы включения прибора как с использованием измерительного трансформатора (рис. 3), так и сигнальной обмотки ДГР для снятия осциллограммы переходного процесса при введении в нейтраль тестового сигнала (рис. 4). На рис. 4 показан пример включения прибора при определении значений составляющих токов замыкания при питании его от вторичной обмотки ТСН 220 В, соединенной в треугольник. При этом требуется разземление нижнего по схеме заземленного вывода сигнальной обмотки и подключения его к одному из проводов питания прибора «Бреслер 0107.065». Тестовый сигнал с заданными параметрами подается в нейтраль сети посредством сигнальной обмотки ДГР.

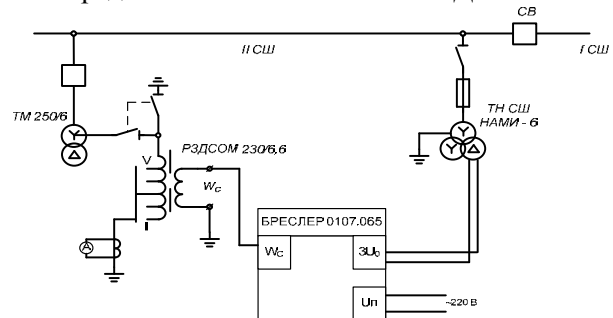


Рис. 3. Схема включения прибора в сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю

Искомая величина емкостного тока вычисляется из выражения

$$I_C = \frac{I_L}{1 - \mathcal{G}},$$

где  $I_L$  и  $\mathcal{G}$  – паспортное значение тока ДГР и, измеренная прибором, расстройка компенсации. С учетом влияния присоединительного трансформатора (ТДГР), действительное значение емкостного тока замыкания имеет меньшее значение и определяется формулой

$$I_{C0} = I_C \frac{X_L}{X_L + X_T/3},$$

где  $X_L = \frac{U_{НОМ}}{I_{СТ}}$  и  $X_T = \frac{U_K \% U^2_{НОМ}}{100 S_{ТНОМ}}$ .

В приведенных выражениях  $U_{НОМ}$ ,  $I_{СТ}$ ,  $S_{ТНОМ}$  – номинальное напряжение сети, паспортное значение тока ступени (крайнего верхнего положения плунжера) ДГР и номинальная мощность присоединительного трансформатора ТДГР.

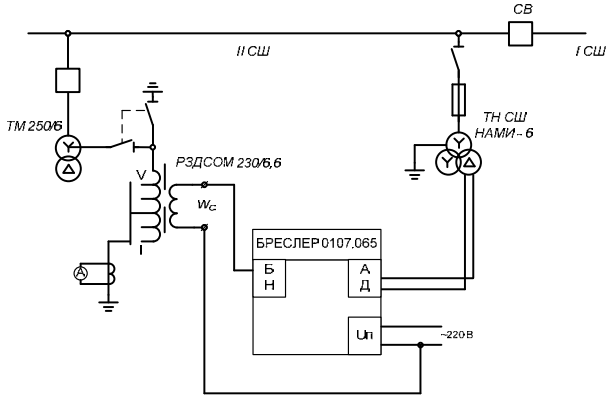


Рис. 4. Схема включения прибора в сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю при соединении обмотки низкого напряжения 220 В ТСН в треугольник

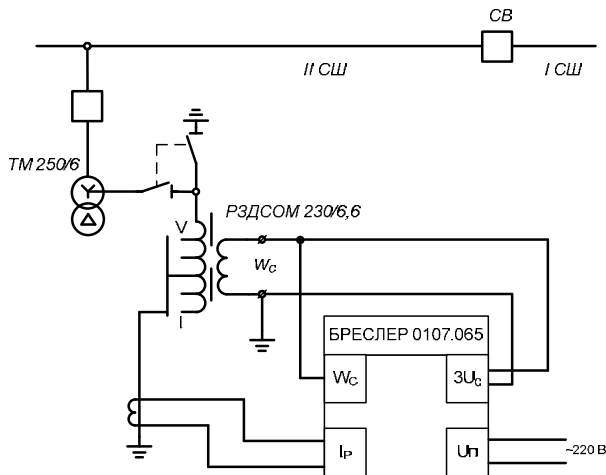


Рис. 5. Схема включения прибора в сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю при отсутствии измерительного трансформатора напряжения

Порядок проведения измерений составляющих тока замыкания на землю в сетях с компенсацией емкостного тока следующий:

- ДГР выводится в режим максимального тока (верхнее положение плунжера либо на ступень максимального тока) и записывается это значение;
- прибор «Бреслер 0107.065» подключается к сети согласно рис. 3 или рис. 4 и переводится на режим измерения расстройки;

- производится определение расстройки компенсации и записывается его значение (можно записать и величину добротности);

- записывается величина  $X_T$  присоединительного трансформатора;

- ДГР плунжерного типа выводится на режим близкий к резонансному и записывается значение добротности контура на промышленной частоте;

- подставив полученные значения максимального тока ДГР  $I_L$ , расстройки компенсации  $\mathcal{G}$ ,  $X_T$  ТДГР, в приведенные формулы получим емкостный ток сети  $I_{C0}$ ;

- фиксируется величина напряжения нейтрали (или  $3U_0$ ).

Определить параметры изоляции ( $R_{ИЗ}$  и  $C_{ИЗ}$ ) можно переключением ДГР к дополнительной приставке, включающей элементы – эквивалент ТДГР и фазных проводимостей  $R_{ФАЗ}$  и  $C_{ФАЗ}$ , представляющих собой магазин сопротивлений и конденсаторов (рис. 6). Для определения  $R_{ИЗ}$  и  $C_{ИЗ}$  необходимо находящийся в эксплуатации ДГР переключить к дополнительному измерительному модулю и, задаваясь  $R_{ФАЗ}$  и  $C_{ФАЗ}$ , получить те же значения расстройки компенсации и добротности сети, предшествующей выводу ДГР из работы.

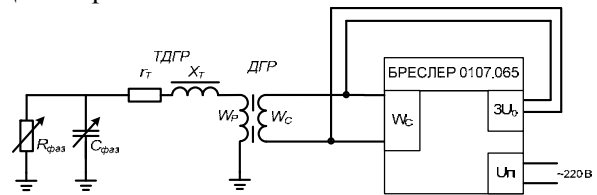


Рис. 6. Схема определения параметров изоляции сети

Для характеристики резонанса в контуре нулевой последовательности параметром, который отслеживает степень расстройки, является реактивное сопротивление или реактивная проводимость сети, а поскольку компенсации подлжит емкостная проводимость  $B_C$ , то расстройку компенсации относительно этой проводимости определяют как  $\nu = \frac{B_C - B_L}{B_C}$ . Физически расстройка характеризует нескомпенсированную долю емкостного тока сети. При недокомпенсации (емкостной ток превышает индуктивный)  $\nu > 0$ , при перекомпенсации (индуктивный ток превышает емкостной)  $\nu < 0$ , при резонансе  $\nu = 0$ .

Непосредственное измерение проводимостей или емкостного тока затруднительно, поэтому факт настройки на резонанс контура нулевой по-

следовательности определяют косвенными методами. Наиболее известные из этих методов – экстремальный и фазовый [6]. Первый – основан на прохождении кривой напряжения на нейтрали сети через максимум при резонансе. Второй - на изменении знака угла этого напряжения относительно базового вектора.

**Способы контроля ДГР**

Величиной, контролируемой при любом способе настройки ДГР, является напряжение на нейтрали сети. Измеряется это напряжение с помощью измерительного трансформатора напряжения на выводах обмотки, соединенной по схеме разомкнутый треугольник. Сложность обработки этого напряжения заключается в его малой (в идеале нулевой) величине в нормальном режиме работы сети. Для воздушных сетей напряжение на нейтрали главным образом определяется несимметрией фаз линии относительно земли. В кабельных линиях несимметрия фаз мала и измеряемая величина напряжения имеет величину десятки мВ, причем определяется оно, главным образом, шумами (помехами), наводимыми в контуре нулевой последовательности. Данные шумы представляют собой высокочастотные составляющие, порожденные работой оборудования, в основном это третья гармоника и гармоники кратные основной частоте.

Известно, что экстремальный способ настройки ДГР имеет существенные недостатки. Принято считать, что в сети всегда имеется естественная несимметрия, которая определяется небалансом фазных проводимостей изоляции. Поскольку активное сопротивление изоляции существенно больше ее емкостных составляющих, коэффициент, характеризующий естественную несимметрию, записывается как

$$K_{НС} = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C}$$

Напряжение естественной несимметрии  $U_{НС}$  и напряжение на нейтрали компенсированной сети определяются из выражений

$$U_{НС} = U_{\phi} K_{НС}, U_N = U_{НС} \frac{1}{\nu + jd},$$

где  $d$  - затухание контура или коэффициент успокоения сети, величина обратная добротности контура  $Q$ .

Последняя формула показывает, что напряжение на нейтрали реальной сети, имеет максимальное значение при расстройке компенсации  $\nu = 0$  – т.е. в точке резонансной настройки,

и стремится к нулю при увеличении  $\nu$  независимо от ее знака.

Все шумы в напряжении нулевой последовательности, с частотой кратной основной гармонике, при резонансе в контуре нулевой последовательности также достигают своего максимума. В итоге суммарное напряжение, измеряемое на нейтрали, особенно для воздушных и воздушно-кабельных линий, достигает нескольких вольт.

В сетях с хорошим качеством изоляции добротность контура нулевой последовательности находится в пределах 15...30. Поэтому зависимость  $U_N = f(\omega L_K)$  или  $U_N = f(\nu)$  имеет ярко выраженный экстремум – рис.7. Данный факт легко использовать для настройки контура нулевой последовательности в резонанс.

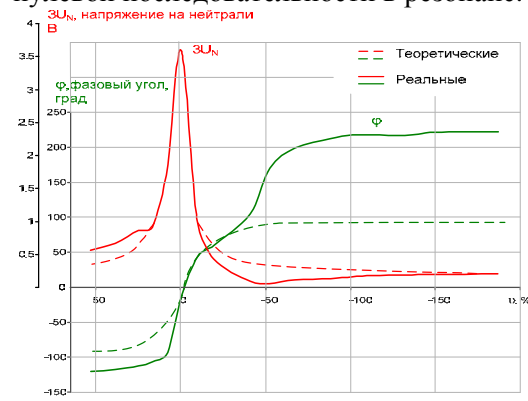


Рис. 7. Амплитудная и фазовая характеристики, снятые автоматическим регулятором ДГР «Бреслер-0117.60»

Однако, несмотря на простоту реализации, экстремальный принцип не получил широкого распространения для построения регуляторов ДГР. Объясняется это рядом причин:

- напряжение на нейтрали изменяется не только при изменении параметров сети, но и при изменении нагрузки, что вынуждает включать привод регулятора и проверять нахождение в точке резонанса;
- невозможно при изменении  $U_N$  заранее определить в какую сторону необходимо изменять индуктивность ДГР;
- при больших значениях расстройки компенсации, автоматический регулятор не может вывести ДГР в резонансный режим, так как кривая изменения напряжения (см. рис.7) имеет пологий участок;
- из-за малого уровня естественной несимметрии невозможна работа в кабельных сетях.

Следует также отметить, что плунжерные ДГР не рассчитаны на частое включение привода. Поэтому обязательным требованием к их автоматике управления является включение

привода только при выходе расстройки за заданные пределы и выполнение настройки за одно включение.

Наиболее распространенным является *фазовый способ* определения расстройки компенсации сети. Способ основан на контроле угла вектора напряжения на нейтрали сети относительно базового вектора, угол которого не зависит от режима сети. Обычно в качестве базового – принимается вектор линейного напряжения.

Метод применяется исключительно в сетях с искусственной несимметрией сети. Такая ситуация объясняется тем, что суммарная величина естественной несимметрии и шумов постоянно меняет свой угол в зависимости от режима работы сети и ее конфигурации. Поэтому метод применяется преимущественно в кабельных сетях.

Напряжение искусственной несимметрии может быть создано любым доступным способом: подключением к фазе сети высоковольтного конденсатора; асимметрированием фазных обмоток нейтралеобразующего трансформатора ТН ДГР; введением в нейтраль сети сигнала от внешнего источника. В любом случае это весьма затратное, малонадежное и нежелательное мероприятие.

Методу присущ целый ряд недостатков:

- необходимость смещения нейтрали, от величины которого зависит точность;
- работоспособность лишь при небольших значениях расстройки компенсации, так как далее кривая  $\varphi = f(v)$  становится пологой (рис.8);
- зависимость напряжения  $3U_N$  от добротности  $Q$  контура нулевой последовательности;
- практическая неработоспособность метода в низкодобротных сетях из-за слабой зависимости фазы напряжения  $3U_N$  от степени расстройки компенсации (рис.8).

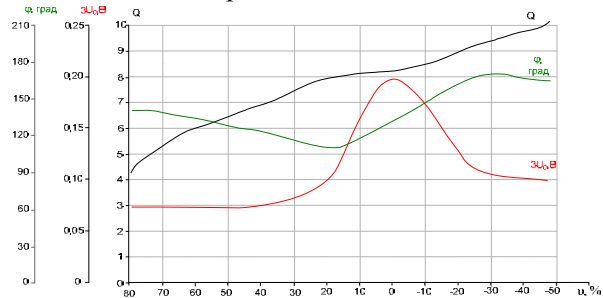


Рис. 8. Реальные амплитудная и фазовая характеристики, снятые автоматическим регулятором ДГР «Бреслер-0117.60», для низкодобротного контура

Способ настройки ДГР по частоте собственных колебаний контура нулевой последовательности лишен этих недостатков.

Любые возмущения в контуре нулевой последовательности, связанные с перераспреде-

лением энергии между индуктивностью и емкостью контура, приводят к возникновению в контуре свободных колебаний. Величиной изменения энергии в процессе колебаний определяются величины свободных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности. В то же время, известно [7], что частота и время затухания свободных колебаний, возникающих в контуре, определяются только параметрами контура и не зависят от величины и характера возмущающего воздействия. Этот факт можно использовать для определения параметров контура нулевой последовательности, а, следовательно, и для настройки ДГР.

Естественными возмущениями являются: подключение (отключение) фидера; загорание (погасание) дуги при однофазных замыканиях на землю; изменение емкости сети при однофазных замыканиях на землю и др. Однако, для постоянного контроля параметров контура нулевой последовательности, колебания должны создаваться устройством контроля, а естественные возмущения несут случайный характер.

На рис.9 приведена осциллограмма  $U_N$ , снятая при работе автоматическим регулятором ДГР «Бреслер-0107.065». Осциллограмма разбита на три участка: 1 – до момента инъекции тока; 2 – в момент инъекции тока; 3 – после прекращения действия накладываемого импульса тока.

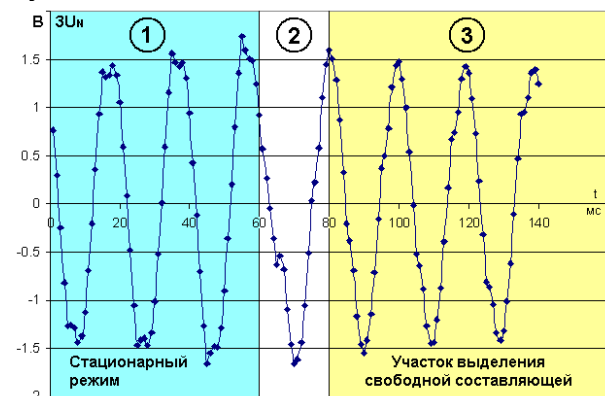


Рис. 9. Рабочая осциллограмма автоматического регулятора «Бреслер-0107.060»

Визуально трудно найти различия кривой  $U_N$  на этих участках, т.е. инжестируемый ток не велик и не приводит к заметному изменению напряжения на нейтрали сети. Тем не менее, микропроцессорный терминал позволяет совместить осциллограммы 1-го и 3-го участков и найти разностный сигнал – рис.14, который и является напряжением свободных колебаний –  $U_{N,св}$ .

Имея кривую свободных колебаний, можно перейти к основной задаче автоматического

регулятора ДГР – определения и поддержания заданной расстройки контура нулевой последовательности. Влияние частоты на величину расстройки можно определить выражением:

$$\nu = \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_c^2}\right) \times 100\% .$$

Из решения дифференциального уравнения можно получить выражение для свободной составляющей напряжения на нейтрали сети в виде

$$u_{н,св} = U_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_{св} t + \theta),$$

где величины  $U_0$  и  $\theta$  определяются состоянием схемы в момент прекращения инъекции тока (начало участка 3 на рис.9), а частота  $\omega_{св}$  и коэффициент затухания  $\alpha$  свободных колебаний определяются корнями характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm j\omega_{св} .$$

Следовательно

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} , \text{ где } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

- резонансная частота идеального (без потерь) резонансного контура.

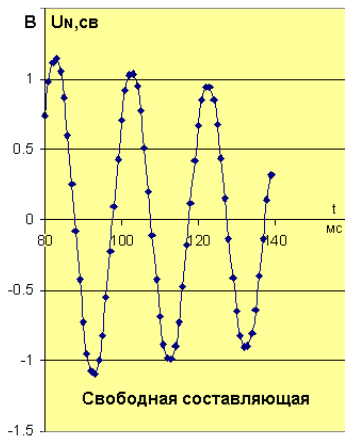


Рис. 10. Выделенная свободная составляющая  
Можно выразит  $\alpha$  через добротность контура  $Q$  или коэффициент успокоения сети  $d$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} = \frac{\omega_0}{2Q} = \omega_0 \frac{d}{2} .$$

Соответственно выражение для  $\omega_{св}$  примет вид

$$\omega_{св} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} ,$$

из которого видно, что, например, при добротности  $Q=10$   $\omega_{св} = 0,9975\omega_0$ , т.е. отличие составляет 0,25%.

Таким образом, несмотря на то, что  $\omega_{св} < \omega_0$ , и только при отсутствии потерь в контуре ( $\alpha=0$ )  $\omega_{св} = \omega_0$ , даже в контурах средней добротности, можно, без значительных ошибок, использовать для вычисления расстройки по выражению значение  $\omega_{св}$  вместо  $\omega_0$ .

Однако, в последнее время, все большее распространение получает комбинированный способ заземления нейтрали – с установкой заземляющего резистора параллельно ДГР. Добротность таких сетей составляет порядка 2...10. Кроме того, современные микропроцессоры имеют достаточный вычислительный ресурс. Поэтому нет необходимости прибегать к упрощенным способам вычисления расстройки контура нулевой последовательности сети, тем более что величина затухания контура  $\alpha$  легко определяется как

$$\alpha = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2}}{T_{св}} ,$$

где напряжения  $U_1$  и  $U_2$  берутся из кривой рис. 10 через интервал времени равный  $T_{св}$ .

Зная величины  $\alpha$  и  $\omega_{св}$  сети микропроцессорное устройство способно решать разнообразные задачи:

- управления ДГР с целью поддержания заданного уровня расстройки;
- определения емкостного тока (или емкости) сети;
- контроля изоляции секции шин под рабочим напряжением и др.

### Выводы

Таким образом, задача снижения аварийности электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью от однофазных замыканий на землю представляется комплексной, предусматривающей принятия мероприятий по снижению вероятности возникновения замыканий, снижению ущерба от последствий аварии и определению поврежденного оборудования. Для решения этой проблемы разработаны методы диагностики и контроля параметров изоляции и дугогасящего реактора, его настройки. Предложен метод управления настройкой компенсации, основанный на сравнении частоты собственных колебаний контура нулевой последовательности электрической сети с частотой тока промышленной сети, который лишен недостатков, присущих фазовым и экстремальным регуляторам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд.– М., 2002. – 330 с.
2. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью.– М., Энергия, 1974. – 96 с.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – 15-е изд. – М.: СПО ОРГРЭС, 1996, переизд. 2003.
4. Точность автоподстройки частоты свободных колебаний в симметричных сетях с компенсированной нейтралью / *Электричество* № 12, 1996 г. – С. 8-16.
5. Автоматика управления дугогасящими реакторами «Бреслер-0107.060» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bresler.ru/>
6. Обабкова В. К. Совершенствование и унификация измерителя расстройки резонанса в сетях с компенсацией емкостных токов // Труды IV Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98, Том 8. – С. 86-89.
7. Шуин В.А. Защита от замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6-10 кВ / В. А. Шуин, А.В. Гусенков. – НТФ «Энергопрогресс». – 104 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

**Ключевые слова:** замыкание однофазное, нейтраль изолированная, нейтраль компенсированная, дугогасящий реактор, автоматический регулятор, автоподстройка.

Статью рекомендовано к печати д.т.н., профессором *Н. В. Панасенком*

Разработка и внедрение в электрических сетях напряжением 6-35 кВ устройств контроля состояния отходящих линий, с эффективным алгоритмом определения повреждений независимо от способа заземления нейтрали и структуры эксплуатируемого электрооборудования тоже относится к приоритетным направлениям развития микропроцессорных систем защиты от однофазных замыканий на землю. Поэтому, повышение надежности электропитания рассмотренных систем возможно только комплексным решением задачи ликвидации последствий замыканий на землю и профилактическими мероприятиями по снижению вероятности их возникновения.

В сетях напряжением 6-35 кВ получило распространение множество методов по определению фазных проводимостей, по данным которых производится выбор алгоритма работы устройств компенсации емкостных токов. Наиболее точный метод металлического замыкания применяется крайне редко из-за трудоемкости реализации и опасного воздействия на электрооборудование. Косвенные способы значительно уступают в точности измерений и суть их применения сводится к оценке емкостного тока замыкания с целью выбора емкости ДГР.

Для настройки дугогасящих реакторов всех типов и их диагностики специально разработан переносный прибор «Бреслер 0107.065», нашедший широкое применение и признание эксплуатационного персонала. Величиной, контролируемой при любом способе настройки ДГР, является напряжение на нейтрали сети. Измеряется это напряжение с помощью измерительного трансформатора напряжения на выводах обмотки, соединенной по схеме разомкнутый треугольник. Сложность обработки этого напряжения заключается в его малой (в идеале нулевой) величине в нормальном режиме работы сети. Для воздушных сетей напряжение на нейтрали главным образом определяется несимметрией фаз линии относительно земли. В кабельных линиях несимметрия фаз мала и измеряемая величина напряжения имеет величину десятки мВ, причем определяется оно, главным образом, шумами (помехами), наводимыми в контуре нулевой последовательности.

В настоящее время применяются следующие способы настройки ДГР: экстремальный, фазовый, по частоте собственных колебаний контура нулевой последовательности.

Таким образом, задача снижения аварийности электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью от однофазных замыканий на землю представляется комплексной, предусматривающей принятия мероприятий по снижению вероятности возникновения замыканий, снижению ущерба от последствий аварии и определению поврежденного оборудования. Для решения этой проблемы разработаны методы диагностики и контроля параметров изоляции и дугогасящего реактора, его настройки. Предложен метод управления настройкой компенсации, основанный на сравнении частоты собственных колебаний контура нулевой последовательности электрической сети с частотой тока промышленной сети, который лишен недостатков, присущих фазовым и экстремальным регуляторам.

© Бадер М. П., 2012

REFERENCES

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Regulations for Electrical Installation]. Moscow, 2002. 330 p.
2. Chernikov A.A. *Kompensatsiya emkostnykh tokov v setyah s nezezemlennoy neytral'yu* [Compensation of capacitive currents in ungrounded networks]. Moscow, Energiya publ., 1974. 96 p.
3. *Pravila tihnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey Rossiyskoy Federatsii* [Technical operation of power plants and networks of the Russian Federation]. Moscow, SPO ORGRES publ., 2003.
4. *Tochnost' avtopodstroyki chastoty svobodnykh kolebaniy v simmetrichnykh setyah s kompensirovannoy neytral'yu* [The accuracy of automatic frequency of free oscillations in symmetric networks with compensated neutral]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1996, no. 12, pp. 8-16.
5. *Avtomatika upravleniya dugogasyashchimi reaktorami «Bresler-0107.060»* [Control system arc suppression coils «Bresler-0107.060»]. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.bresler.ru/>
6. Obabkova V. K. *Sovershenstvovanie i unifikatsiya izmeritelya rasstroyki rezonansa v setyah s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Improvement and standardization of measuring resonance shift in networks with compensation of capacitive currents]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferencii APEP-98* [Proceeding of IV International Conference APEP-98], vol.8, pp. 86-89.
7. Shuin V. A. *Zashchita ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyah napryazheniem 6-10 kV* [Earth fault protection in networks 6-10 kV], *Energoprogress publ.*, 104 p.



## УДК 621.331.3

М. П. БАДЬОР (МІТ)

Кафедра Енергопостачання електричних залізниць, Московський державний університет шляхів сполучення, вул. Образцова 9, буд. 9, Москва, Російська Федерація, 127994, тел.: (495) 684-22-87, ел. пошта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## КОМПЛЕКСНЕ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ ТА РЕЗОНАНСНО-ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛІЮ

Розробка та впровадження в електричних мережах напругою 6-35 кВ пристроїв контролю стану відхідних ліній з ефективним алгоритмом визначення пошкоджень незалежно від способу заземлення нейтралі та структури експлуатованого електрообладнання теж належить до пріоритетних напрямів розвитку мікропроцесорних систем захисту від однофазних замикань на землю. Тому, підвищення надійності електропостачання розглянутих систем можливо тільки комплексним вирішенням завдання ліквідації наслідків замикань на землю та профілактичними заходами по зниженню ймовірності їх виникнення.

У мережах напругою 6-35 кВ набули поширення безліч методів по визначенню фазних провідностей, за даними яких проводиться вибір алгоритму роботи пристроїв компенсації ємнісних струмів. Найбільш точний метод металевого замикання застосовується вкрай рідко через трудомісткість реалізації і небезпечного впливу на електрообладнання. Непрямі способи значно поступають у точності вимірювань і суть їх застосування зводиться до оцінки ємнісного струму замикання з метою вибору ємності ДГР.

Для налаштування дугогасних реакторів всіх типів і їх діагностики спеціально розроблений переносний прилад «Бреслер 0107.065», який знайшов широке застосування і визнання експлуатаційного персоналу. Контрольованою величиною при будь-якому способі налаштування ДГР є напруга на нейтралі мережі. Вимірюється ця напруга за допомогою вимірювального трансформатора напруги на виводах обмотки, з'єднаної за схемою розімкненого трикутника. Складність обробки цієї напруги полягає у його малій (в ідеалі нульовій) величині у нормальному режимі роботи мережі. Для повітряних мереж напруга на нейтралі головним чином визначається несиметрією фаз лінії відносно землі. У кабельних лініях несиметрія фаз мала і величина напруги вимірюється десятками мВ, причому визначається вона, головним чином, перешкодами, які наводяться в контурі нульової послідовності.

В даний час застосовуються такі способи налаштування ДГР: екстремальний, фазовий, по частоті власних коливань контуру нульової послідовності.

Таким чином, задача зниження аварійності електричних мереж з ізолюваною і компенсованою нейтраліями від однофазних замикань на землю є комплексною та передбачає прийняття заходів щодо зниження ймовірності виникнення замикань, зниження збитків від наслідків аварії та визначення пошкодженого обладнання. Для вирішення цієї проблеми розроблені методи діагностики і контролю параметрів ізоляції і дугогасного реактора, його налаштування. Запропоновано метод управління налаштуванням компенсації, заснований на порівнянні частоти власних коливань контуру нульової послідовності електричної мережі з частотою струму промислової мережі, який позбавлений недоліків, властивих фазовим і екстремальним регуляторам.

**Ключові слова:** замикання однофазне, нейтраль ізолювана, нейтраль компенсована, дугогасний реактор, автоматичний регулятор, автоналаштування.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н, професором *М. В. Панасенком*

## UDC 621.331.3

M. P. BADER (MIIT)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Transport Communications, 9 Obratsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, tel.: (495) 684-22-87, e-mail: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## COMPLEX SOLUTION-PHASE EARTH FAULT IN NETWORKS WITH ISOLATED AND RESONANTLY NEUTRAL EARTHED

Design and implementation of electrical networks 6-35 kV voltage control devices of outgoing lines with efficient algorithms for determining damages, regardless of how structure and neutral grounding electrical Exploited also belongs to the priority areas of microprocessor systems protection from single phase to earth faults. Therefore, improving the reliability of power systems considered only possible solution to the complex task of disaster earth fault and preventive measures to reduce the probability of their occurrence.

In voltage 6-35 kV networks have proliferated many methods to determine the phase conductivities, according to which the selection algorithm of devices compensation capacitive currents. The most accurate method for metallic circuit used very rarely because of the complexity and dangerous effects on electrical equipment. Indirect methods significantly inferior in accuracy and reduces the essence of their application to the evaluation of capacitive current circuit for selecting containers DGR.

To configure extinguishing all types of reactors and their diagnosis is specially designed portable device «Bresler 0107.065», which is widely used and recognition operations personnel. Controlled variables in any method of setting the GDR is the voltage on the neutral network. This voltage is measured by measuring the voltage across the terminals of the transformer windings, connected by an open triangle scheme. Difficulty handling this tension lies in its low (ideally zero) value in the normal mode of the network. For air networks to neutral voltage is mainly determined by the asymmetry of the phase line relative to the ground. In cable lines asymmetry phases and the voltage was measured in tens mV, and she is determined mainly by obstacles that are in the circuit zero sequence.

The following ways to configure the GDR: extreme, phase, frequency of natural oscillations circuit zero sequence.

Thus, the task of reducing accidents electrical networks with isolated neutral and compensated from single-phase earth fault is complex and involves taking measures to reduce the likelihood of faults, reducing losses from accident and identify the damaged equipment. To solve this problem, the methods of diagnosis and control parameters of isolation and extinguishing reactor, its settings. The method of setting compensation management, based on a comparison of the frequency of natural oscillations of zero sequence circuit electrical network frequency current industrial network, without drawbacks inherent phase and extreme regulators.

**Keywords:** single fault, insulated neutral, compensated neutral, blanking arc reactor, automatic regulator, self-tuning.

Prof. *M. V. Panasenko*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.