

УДК 621.316.925:622.48.012

Ф.П. Шкрабец

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗАВАРИЙНОСТИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Викладено основні шляхи зниження пошкоджуваності в розподільних мережах систем електропостачання гірничих підприємств за рахунок придушення перехідних процесів при замиканнях на землю на основі оптимізації режиму нейтралі та забезпечення селективності дії релейного захисту. Також представлено принцип безперервного селективного контролю параметрів ізоляції у високовольтних мережах.

Изложены основные пути снижения повреждаемости в распределительных сетях систем электроснабжения горных предприятий за счет подавления переходных процессов при замыканиях на землю на основе оптимизации режима нейтрали и обеспечения селективности действия релейной защиты. Также представлен принцип непрерывного селективного контроля параметров изоляции в высоковольтных сетях.

The basic ways of decline of demaging are expounded in the distributive networks of the systems of electric supply of mountain enterprises due to suppression of transitional processes at shorting on earth on the basis of optimization of the mode of neutral and providing of selectivity of action of relay defence. Principle of continuous selective control of parameters of isolation is also presented in the networks of high-voltages.

Электрические сети и оборудование систем электроснабжения шахт и карьеров эксплуатируются в весьма специфических условиях, которые в значительной степени определяют уровень надежности электроснабжения и электробезопасности. Улучшение условий электробезопасности, повышение надежности электроснабжения горных предприятий зависит от успешного решения ряда вопросов, среди которых важное место занимают вопросы оптимизации режимов работы нейтрали распределительных сетей по критериям надежности и электробезопасности систем электроснабжения, создание методов и технических средств, обеспечивающих предупреждение, поиск повреждений и восстановление электроснабжения потребителей.

Анализ эксплуатационных данных об аварийности распределительных сетей горных предприятий показывает, что на долю замыканий на землю приходится до 65...90% всех повреждений [1-3]. Основная масса повреждений в распределительных сетях связана с нарушением изоляции фаз сети относительно земли, т.е. появлением несимметричных повреждений, которые можно разделить на три основных вида:

- 1) замыкания одной фазы распределительной сети на землю;
- 2) двойные замыкания на землю (замыкания на землю в разных точках распределительной сети);
- 3) замыкания на землю со стороны электроприемника.

По характеру повреждений следует различать металлические (глухие) замыкания на землю, дуговые (через перемежающуюся дугу) и через переходные сопротивления в точках повреждения.

Основными причинами возникновения замыканий на землю в электрических сетях являются:

- воздействие перенапряжений на изоляцию элементов электрической сети;
- постепенное изменение диэлектрической прочности (старение) изоляции;
- воздействие внешних объектов и дефекты монтажа электрических сетей и оборудования;
- внезапные изменения расстояния между токоведущими и заземленными частями электрического оборудования.

Большинство повреждений в электрических распределительных сетях приводит к снижению уровня электробезопасности и надежности систем электроснабжения. В свою очередь, снижение надежности электроснабжения приводит к появлению ущерба от перерывов электроснабжения. В общем случае указанный ущерб определяется длительностью простоя добычных и транспортных машин и соответственно недоотпуском продукции. Неоправданные простои оборудования, добычных и вспомогательных механизмов наблюдаются при неправильном действии устройств первой и второй ступени защиты от замыканий на землю за счет значительного времени поиска отсутствующих повреждений (при ложном срабатывании защитных устройств). Кроме того, замыкания на землю часто являются причиной возникновения многоместных или многофазных повреждений, в результате чего увеличивается количество простаиваемых машин и механизмов.

Как уже отмечалось, надежность электроснабжения потребителей в значительной степени зависит от качества функционирования средств защиты от замыканий на землю в распределительных сетях. При этом следует отметить, что при прочих равных условиях качество функционирования названных защит зависит от структуры построения (количества ступеней распределения) и режима работы нейтрали распределительной сети.

Режим работы нейтрали (полностью изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, с резистором в нейтрали) электрических сетей напряжением выше 1000 В существенно влияет не только на работоспособность устройств защиты от замыканий на землю, но и на уровень внутренних перенапряжений, сопровождающих такие аварийные режимы, т.е. на повреждаемость электрических сетей и оборудования [3, 4].

Распределительные сети напряжением 6-10 кВ с полностью изолированной нейтралью получили преимущественное распространение в большинстве стран. Однако такой режим нейтрали сети не всегда является оптимальным с точки зрения таких критериев, как надежность, электробезопасность и экономичность. Для реальных параметров распределительных сетей с полностью изолированной нейтралью максимальное значение перенапряжений (напряжения между здоровыми фазами и землей) при замыканиях на землю находится на уровне 4,5-фазного напряжения, а теоретический максимум напряжения смещения нейтрали составляет трехкратное фазное напряжение. Однофазные замыкания на землю сопровождаются переходными процессами, возникающими в момент появления замыкания и в момент отключения поврежденного участка (процесс восстановления напряжения в сети), которые обеспечивают значительную часть ложных срабатываний устройств защиты от замыканий на землю в указанных сетях [1, 3].

Системы электроснабжения с полностью изолированной нейтралью по сравнению с сетями с другими режимами нейтрали не требуют дополнительных капитальных затрат. Однако эксплуатационные расходы в сетях с полностью изолированной нейтралью за счет большей повреждаемости, а также за счет ущерба от перерывов электроснабжения значительно больше, чем в сетях, работающих с другими режимами нейтрали.

Эффективность компенсации емкостных токов и эффективность работы электрических сетей с компенсированной нейтралью в значительной степени зависит от режима настройки компенсирующего устройства. Большинство исследователей при этом отдают предпочтение резонансной настройке индуктивности компенсирующего устройства с емкостью сети относительно земли, то есть:

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L_k = \frac{1}{3\omega C} \text{ м,} \quad (1)$$

где X_L и 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.

В случае несоблюдения условия (1) остаточный ток определяется как геометрическая сумма активной I_a и реактивной (емкостной I_C и индуктивной I_L) составляющих. Реактивная составляющая в свою очередь зависит от степени расстройки (отклонения от резонансной настройки) компенсации:

$$\nu = \frac{I_L - I_C}{I_L} = 1 - 3\omega^2 CL_k = 1 - K, \quad (2)$$

где $K = \frac{I_C}{I_L} = \frac{I_C}{3\omega^2 CL_k}$ – коэффициент (степень) настройки компенсирующего устройства.

Если оценивать надежность электроснабжения электроприемников повреждаемостью элементов сети и качеством работы релейной защиты, то необходимо отметить, что в основном применение компенсированных сетей, где требуется действие защиты на отключение, сдерживается вторым условием. Что касается повреждаемости элементов распределительных сетей, то следует указать на непосредственную связь этого показателя с режимом настройки компенсирующего устройства, так как именно настройкой компенсирующего устройства определяется уровень перенапряжений в сети при однофазных замыканиях на землю.

На рис. 1 показаны кривые зависимости максимальной кратности перенапряжений от степени расстройки компенсации. Значение коэффициента γ , учитывающего снижающие перенапряжения факторы, в общем случае зависит от частоты колебаний свободных составляющих тока замыкания, длины линий распределительной сети, расположения места повреждения относительно источника, сопротивления в цепи замыкания; для реальных параметров распределительных сетей указанный коэффициент находится на уровне 0,8...0,9 [3].

Из рис. 1 видно, что при резонансной настройке компенсирующего устройства, а также при его расстройке в пределах 5%, даже теоретически перенапряжения на неповрежденных фазах не могут превысить 2,75 фазного напряжения. Снижение уровня перенапряжений обусловлено созданием удобного пути для стоков статических зарядов по фазам за счет включения в нейтраль сети дугогасящего реактора. Увеличение степени расстройки компенсации от 5 до 30...40% приводит к быстрому нарастанию уровня перенапряжений. Необходимо отметить, что при расстройке компенсирующего устройства на 20...25% от резонансной, эффективность компенсирующих устройств в части ограничения перенапряжений при замыканиях на землю практически не ощущается по сравнению с сетями с полностью изолированной нейтралью. Перенапряжение в нейтрали сети примерно в 1,5...2 раза меньше кратности перенапряжений на неповрежденных фазах, что также способствует снижению повреждаемости элементов системы электроснабжения с резонансным режимом компенсации.

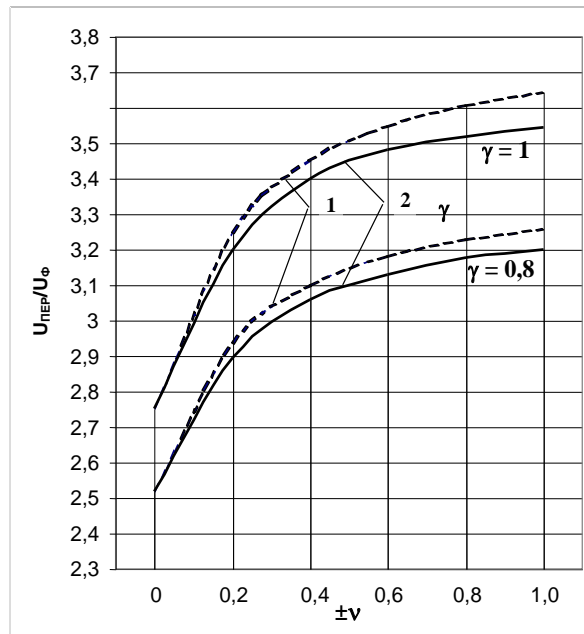


Рис. 1. Зависимости максимальной кратности перенапряжений от степени расстройки компенсирующего устройства в режиме: 1 – перекомпенсации; 2 – недокомпенсации

С экономической точки зрения распределительные сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю требуют дополнительных капитальных затрат на дугогасящие реакторы и устройства для их подключения. Что касается эксплуатационных расходов, то они значительно меньше, чем в сетях с полностью изолированной нейтралью за счет меньшей повреждаемости элементов системы. При резонансной настройке компенсирующего устройства и при незначительных расстройках компенсации в электрических сетях запасы электрической прочности изоляции по отношению к воздействующим перенапряжениям увеличиваются до 30% [1]. Так как эффективность компенсации емкостных токов замыкания на землю наблюдается при резонансном и близких к нему режимах настройки компенсирующих устройств и учитывая возможное изменение параметров распределительных сетей (оперативные и аварийные переключения,

наращивание ЛЭП и т.п.), необходимо ориентироваться на применение устройств автоматической настройки режима дугогасящих реакторов.

Электрические сети с резистором в нейтрали обладают, по сравнению с сетями с полностью изолированной или компенсированной нейтралью, более высокой надежностью за счет улучшения качества работы устройств защиты от однофазных замыканий на землю, исключения феррорезонансных процессов и уменьшения повреждаемости элементов системы электроснабжения (снижение перенапряжений при замыканиях на землю). Последнее обусловлено значительным снижением уровня внутренних перенапряжений, сопровождающих однофазные замыкания на землю [5, 6].

На рис. 2 показана зависимость максимальной кратности внутренних перенапряжений в сети с резистором в нейтрали от соотношения ($K_a=I_a/I_c$) активной и емкостной составляющих тока однофазного замыкания на землю. По мере роста активной составляющей тока замыкания по отношению к емкостной составляющей кратность перенапряжений уменьшается до значения 2,4, при равенстве активного и емкостного тока замыкания. Из рисунка видно, что дальнейшее увеличение активной составляющей практически не приводит к существенному уменьшению кратности перенапряжений, и можно констатировать, что эффективность рассматриваемого режима нейтрали распределительных сетей существенно проявляется при значении накладываемого активного тока замыкания на землю на уровне не менее 40% от емкостного, то есть

$$I_a = (0,4 \div 1,0) I_c . \tag{3}$$

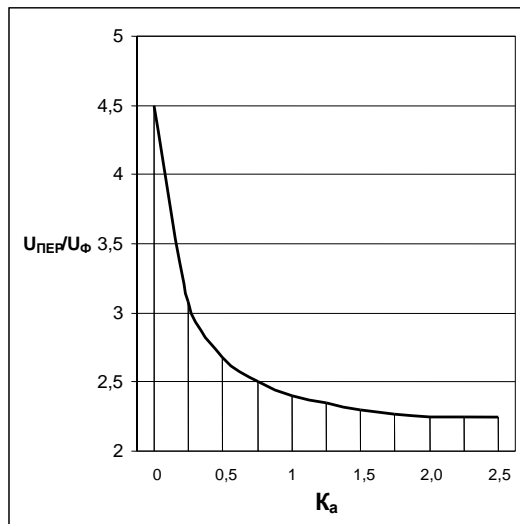


Рис. 2. Зависимость максимальной кратности перенапряжений в сети с резистором в нейтрали от отношения активной и емкостной составляющих тока замыкания

Основной причиной ложных срабатываний защит (сигнализаций) от замыканий на землю в сетях с полностью изолированной и компенсированной нейтралью следует считать возникновение в сети после отключения поврежденного присоединения (или после самоликвидации повреждения) колебательного процесса с частотой близкой к частоте 50 Гц. Можно предположить, что разрыв тока замыкания самоустраняющегося повреждения, а также принудительное отключение повреждения с большой долей вероятности происходит при переходе значения тока замыкания на землю через нуль. В этом случае процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе будет происходить от нулевого значения (для случая металлического замыкания фазы на землю) до фазного за какой-то промежуток времени, продолжительность которого и является одной из важнейших характеристик

переходного процесса. Аналогично от фазного значения до нуля будет изменяться значение напряжения смещения нейтрали (нулевой последовательности).

После отключения поврежденного присоединения в сети устраняется принудительный аварийный режим, а индуктивность L_p и емкость C_Σ образуют колебательный контур с начальными значениями токов и напряжения соответствующими аналогичным значениям, предшествующим непосредственно отключению повреждения. Угловая частота начинающихся свободных колебаний будет равна:

$$\omega'_{ce} = 1 / \sqrt{L_p C_\Sigma} = 1 / \sqrt{3 L_p C} , \quad (4)$$

где L_p – результирующая индуктивность относительно земли (дугогасящих реакторов или измерительных трансформаторов напряжения).

Учитывая, что в системе имеются активные сопротивления, в которых теряется предварительно запасенная в емкости и индуктивности энергия, колебательный переходный процесс носит затухающий характер. Коэффициент успокоения колебаний в рассматриваемой системе является величиной обратной добротности колебательного контура и определяется параметрами изоляции сети относительно земли. Эти же параметры влияют на значение постоянной времени затухания колебаний.

В общем виде процесс изменения во времени напряжения смещения нейтрали в системе после отключения или самоустранения повреждения может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 U_0(t)}{dt^2} + \left(\frac{3 R_H + R}{3 \omega C R_H R} \cdot \frac{d U_0(t)}{dt} \right) - \frac{1}{3C L_p} U_0(t) = 0, \quad (5)$$

решение, которого и анализ результатов, выполненный с учетом реальных параметров распределительных сетей с различными видами заземления нейтрали, позволяют утверждать следующее:

1. В сетях с полностью изолированной нейтралью характер переходного процесса (частота собственных колебаний и продолжительность процесса) определяется в основном суммарной емкостью сети относительно земли и количеством одновременно включенных измерительных трансформаторов напряжения. Для реальных параметров распределительных сетей длительность переходного процесса находится в пределах от 2 до 10 периодов промышленной частоты, а частота свободных колебаний имеет значение, как правило, меньше промышленной частоты, причем частота свободных колебаний непосредственно в процессе их затухания изменяется за счет нелинейного характера реактивного сопротивления измерительных трансформаторов напряжения (рис. 3, а).

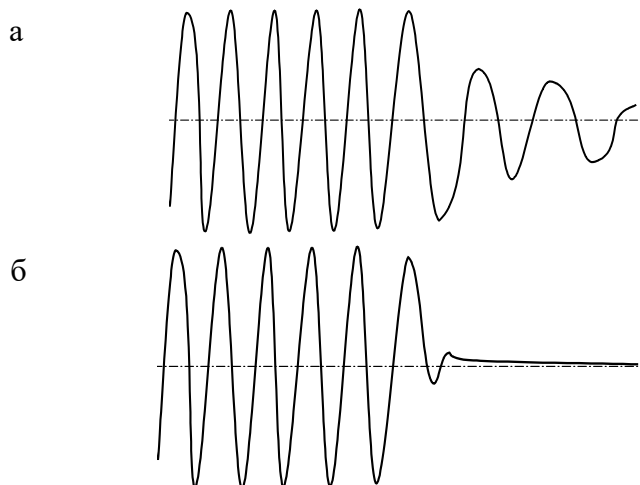


Рис. 3. Осциллограммы затухания напряжения смещения нейтрали после отключения повреждения в сети с изолированной нейтралью (а) и с резистором в нейтрали (б)

2. В сетях с компенсированной нейтралью затухание напряжения на нейтрали определяется в основном параметрами изоляции распределительной сети относительно земли и не зависит от режима настройки компенсирующего устройства. Частота свободных колебаний и постоянная времени их затухания в компенсированных сетях значительно превышают аналогичные характеристики в сетях с полностью изолированной нейтралью. Характер переходного процесса при прочих равных условиях зависит от режима настройки компенсирующего устройства.

3. Переходный процесс в сетях с резистором в нейтрали в значительной степени зависит от значения указанного резистора. В случае установки резистора, сопротивление которого выбирается из условия создания активной составляющей тока однофазного замыкания на землю величиной 50% от емкостного тока, за счет резкого увеличения коэффициента успокоения (затухания) переходный процесс практически заканчивается за полпериода промышленной частоты. На рис. 3 представлены для сравнения осциллограммы изменения напряжения смещения нейтрали в распределительной сети карьера после отключения металлического однофазного замыкания на землю в сети без (а) и с резистором в нейтрали (б) (активной составляющей тока замыкания на уровне 0,6 емкостного тока).

По условиям обеспечения электробезопасности электрических сетей при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям ни один из возможных режимов нейтрали нельзя признать благоприятным. Независимо от режима нейтрали с учетом реальных параметров изоляции относительно земли распределительных сетей и времени действия устройств защиты, а также времени действия применяемой в таких сетях коммутационной аппаратуры, значения тока через тело человека будут значительно превышать безопасные уровни. Степень же косвенной опасности электрической сети (например, от действия напряжения прикосновения) в значительной степени зависит от режима нейтрали. Для установившегося режима однофазного замыкания в этом случае предпочтение следует отдать электрическим сетям с компенсированной нейтралью при резонансной (или близкой к резонансной) настройке компенсирующего устройства. Если учитывать переходные процессы, сопровождающие металлические и дуговые однофазные замыкания на землю, то наиболее благоприятным следует считать электрическую сеть с резистором в нейтрали.

В карьерных сетях напряжением 6-10 кВ при применении дугогасящих реакторов, которые в большинстве случаев не оборудованы устройствами автоматической настройки режима компенсации, рекомендуется использовать комбинированный режим работы нейтрали [7]. Суть этого режима заземления нейтрали состоит в том, что кроме создания индуктивной составляющей тока однофазного замыкания на землю, предлагается также одновременно накладывать на ток замыкания и активную составляющую. Значение накладываемой на сеть активной составляющей тока замыкания на землю должно быть на уровне 30-50% от емкостной составляющей, что обеспечивает эксплуатационные показатели, соответствующие сетям с резистором в нейтрали даже при расстройках дугогасящего реактора до 50% (рис. 4).

Достаточно распространенная двухступенчатая система электроснабжения потребителей горных предприятий характеризуется тем, что (в соответствии с требованиями ПУЭ и отраслевых инструкций) защиты от замыканий на землю линии питающей *РП* и линий отходящих от *РП* не могут быть согласованы по условиям селективности действия, так как те и другие должны выполняться без выдержки времени.

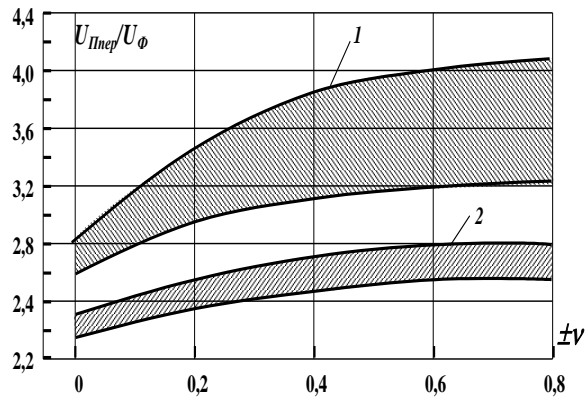


Рис. 4. Зависимость кратности перенапряжений от степени расстройки реактора при компенсированном (1) и комбинированном (2) режиме заземления нейтрали

Для исправления указанного недостатка предлагается следующая схема (рис. 5):

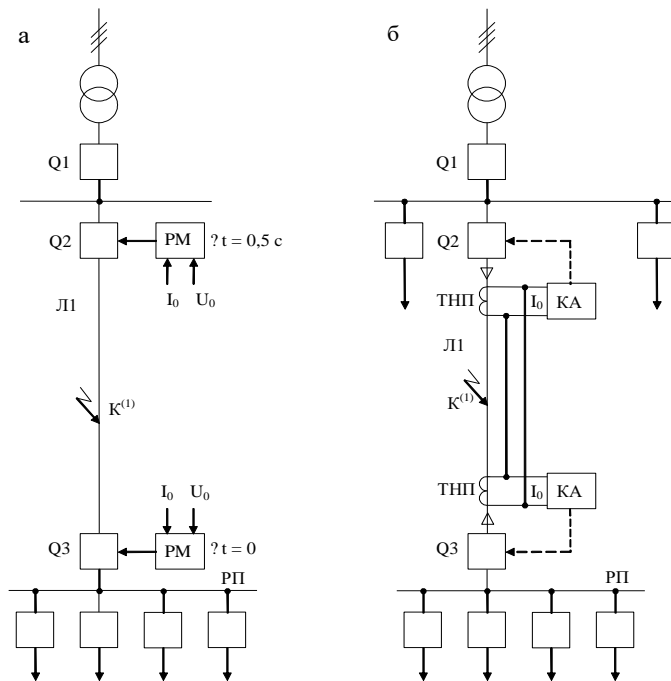


Рис. 5. Обеспечение селективности действия защит от замыканий на землю при двухступенчатой системе распределения

1. Если от трансформаторной подстанции к РП отходит одна линия (рис. 5,а), то для обеспечения селективности действия защит следует установить в начале и в конце линии ЛЛ1 направленные устройства защиты от замыканий на землю. Защита, установленная на вводе в КРП, должна реагировать на замыкания на линии и действовать на выключатель Q3 без выдержки времени, что позволит защите, установленную в начале линии ЛЛ1, выполнить с выдержкой времени 0,4- 0,5 с. Штатная вторая ступень защиты от замыканий на землю (реагирующая на напряжение нулевой последовательности) будет действовать на отключение выключателя Q1 с выдержкой времени 0,7 с.

2. Если у трансформаторной подстанции отходящих линий две и более (рис. 5,б), то для обеспечения селективности действия защит от замыканий на землю в системе электроснабжения карьера или шахты на линиях питающих РП следует установить продольную дифференциальную защиту, реагирующую на ток нулевой последовательности.

В процессе эксплуатации систем электроснабжения по ряду причин и в первую очередь с целью прогнозирования уровня электробезопасности и надежности электрических сетей и установок необходимо знать состояние их изоляции. Надежность и безопасность работы систем электроснабжения во многом зависит от значений активного и реактивного сопротивлений изоляции электрической сети относительно земли. В сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю на указанные характеристики систем электроснабжения существенное влияние оказывает режим настройки компенсирующего устройства. Для получения более достоверной информации о состоянии изоляции фаз сети относительно земли и косвенной оценки эксплуатационных характеристик систем электроснабжения необходимо производить измерения параметров изоляции и режима настройки дугогасящих реакторов под рабочим напряжением.

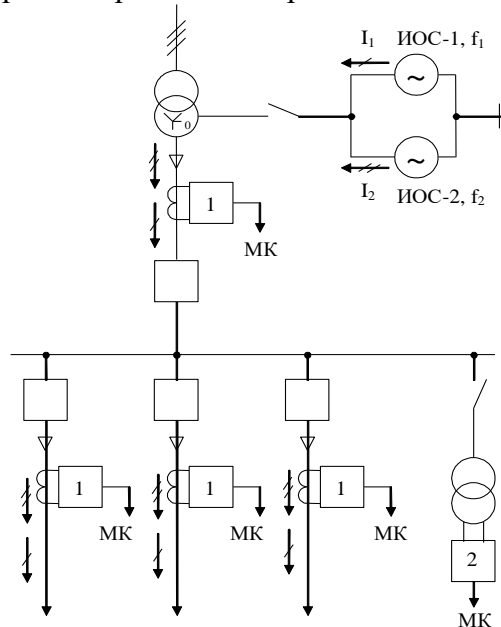


Рис. 6. Схема, поясняющая метод непрерывного контроля параметров изоляции распределительной сети: 1 – устройство выделения и обработки оперативных токов; 2 – устройство выделения и обработки оперативных напряжений

Непрерывный и автоматический контроль значений, составляющих изоляции электрической сети (активного и емкостного сопротивлений изоляции фаз сети относительно земли, индуктивности компенсирующего устройства) позволит прогнозировать появление опасных состояний системы и, при имеющейся технической возможности, вводить опережающие управляющие команды, позволяющие минимизировать возможный ущерб.

Для указанных целей мы предлагаем использовать метод непрерывного измерения значений составляющих сопротивления изоляции сети относительно земли под рабочим напряжением, основанный на использовании наложенных на сеть оперативных токов не промышленной частоты. Суть предложенного метода непрерывного и оперативного контроля параметров изоляции относительно земли электрической сети и ее элементов состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных синусоидальных сигнала (источники ИОС-1 и ИОС-2), частоты которых не равны между собой и отличаются от промышленной. На контролируемых участках (линии или присоединении), а также в месте подключения оперативного источника устанавливаются устройства, назначением которых является снятие параметров оперативных сигналов и их соответствующая обработка с целью определения в указанных точках значений оперативных токов и напряжений (рис. 6, см. выше). Зафиксированные (с заданной скважностью сканирования) параметры оперативных сигналов в цифровом виде подаются на входы

микроконтроллера $МК$, где используются для вычисления и передачи по заданному адресу обновляемых значений параметров изоляции.

Значения активного сопротивления изоляции R , индуктивности компенсирующего устройства L_p и суммарной емкости C относительно земли трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (присоединения) рассчитываются на основании измеряемых параметров оперативных сигналов по выражениям:

$$R = U_1 U_2 \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 I_1^2 \omega_2^2 - U_1^2 I_2^2 \omega_1^2}}; \quad L_\delta = \frac{U_1 U_2}{\omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{U_1^2 I_2^2 - U_2^2 I_1^2}}; \quad C = \frac{1}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_1^2 - U_1^2 I_2^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}}, \quad (6)$$

где U , I , ω – значения соответственно напряжения, тока и угловой частоты накладываемых оперативных синусоидальных сигналов частотой f_1 и f_2 .

Таким образом, применение микроконтроллеров или микро-ЭВМ позволяет предложенный метод использовать:

- для оперативной оценки значений активного сопротивления изоляции как всей сети в целом, так и каждого из присоединений распределительной сети;
- для оперативной оценки уровня емкости относительно земли как всей сети в целом, так и каждого из присоединений распределительной сети;
- для оперативного измерения значения индуктивности дугогасящего реактора (компенсирующего устройства);
- для автоматической настройки компенсирующего устройства в резонанс с емкостью распределительной сети;
- для выполнения избирательной защиты от утечек, защиты от замыканий на землю или сигнализации в системах электроснабжения независимо от конфигурации и режима работы нейтрали сети.

Выводы

1. Режим работы нейтрали высоковольтных распределительных сетей горных предприятий существенно влияет на уровень внутренних перенапряжений, на повреждаемость электрических сетей и оборудования.
2. Более высокой надежностью обладают электрические сети с резистором в нейтрали за счет улучшения качества работы устройств защиты от однофазных замыканий на землю, исключения феррорезонансных процессов и уменьшения повреждаемости элементов системы электроснабжения.
3. Предложены варианты, обеспечивающие исключение неоправданных срабатываний защит от замыканий на землю и соответствие их параметров нормативным документам в системах электроснабжения при двухступенчатой схеме распределения.
4. Для прогнозирования уровня электробезопасности и надежности электрических сетей и установок разработан метод непрерывного и селективного контроля изоляции фаз сети относительно земли, основанный на использовании би-частотных оперативных сигналов.

Список литературы

1. Лихачев Ф.В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1972. – 151 с.
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
3. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. – М.: Недра, 1976. – 175 с.
4. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с.

Надбання наукових шкіл

5. Микрюков В.И. Устранение ложных отключений линий защитами от замыканий на землю в распределительных сетях разрезом и карьером // Промышленная энергетика. – 1981. – № 9. – С. 41-43.
6. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, Г.Г. Гольштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
7. Шкрабец Ф.П., Баласмех Ф.К., Скосырев В.Г. Комбинированный режим работы нейтрали распределительных сетей напряжением 6-35 кВ // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 65. – С. 46-51.