

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИХ КАТУШЕК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 КВ

Дергилев М.П., Агафонова Н.Е.

Наиболее распространенными видами повреждений в электрических сетях всех классов напряжения являются однофазные замыкания на землю. По данным [1-3] в распределительных сетях 6-10 кВ они составляют не менее 80-90% от общего числа случаев нарушения нормальной работы сети. В подавляющем большинстве случаев такие замыкания сопровождаются горением частичных дуг в месте пробоя или в перекрытия изоляции и сложными переходными процессами с большой кратностью перенапряжений. Из анализа данных опыта эксплуатации различных по назначению электрических сетей (горные, металлургия, химия и коксохимия, а также сети собственных нужд ТЭС) следует, что при постоянно ухудшающемся техническом состоянии их в пределах 60-80% этих замыканий в настоящее время развиваются в многоместные пробои изоляции на поврежденной фазе или переходят в междуфазные короткие замыкания с вытекающими отсюда последствиями. Причем, при хорошем совпадении данных различных источников около 35% этих случаев объясняется термическим действием заземляющей дуги и порядка 65% — воздействием возникающих при этом дуговых перенапряжений. Отсюда очевидно, что основным направлением повышения надежности работы рассматриваемых сетей, является борьба с последствиями однофазных замыканий на землю. На основе обобщения опыта эксплуатации и проведения специальных исследований в данной работе ставилась задача оценить эффективность применяемых в настоящее время средств борьбы с воздействием заземляющих дуг и возникающими при этом перенапряжениями.

Самым распространенным в настоящее время методом предотвращения аварийных последствий от однофазных замыканий в рассматриваемых сетях является заземление нейтрали сетей через настроенные индуктивности (ДГК), которые, сохраняя преимущества сетей с изолированной нейтралью, призваны улучшить условия работы электрооборудования при однофазных замыканиях на землю. Такое улучшение предполагается за счет существенного снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги и уменьшения тока в месте замыкания на землю до уровня активной составляющей и высших гармоник, и как следствие, самопроизвольное погасание дуги, а следовательно сокращение объемов разрушений, связанных с термическим действием заземляющей дуги, а также снижение кратности перенапряжений до безопасной величины вследствие появления путей для истекания на землю статических зарядов с емкости элементов сети здоровых фаз. Однако в [4] на основе достаточно полного математического анализа некоторых количе-

ственных характеристик процессов в компенсированной сети в зависимости от степени расстройки катушки показано, что для достижения выше указанных результатов степень расстройки катушки не должна превышать пределов $\pm 1 \div 1,5\%$.

Из всего разнообразия направлений работы по совершенствованию системы компенсации емкостных токов на землю к практической реализации оказались приемлемыми и получили широкое распространение ДГК типа ЗРОМ со ступенчатым регулированием индуктивности катушки и плунжерные ДГК с плавным регулированием индуктивности. В первом случае регулирование осуществляется путем переключения ответвлений на рабочей обмотке ДГР. Шаг регулирования по току для таких аппаратов составляет не менее 10% от полного тока катушки. Переключение отпаек производится только вручную при полностью снятом напряжении. Следовательно, в современных условиях дефицита мощности и наличия графика аварийного отключения электроприемников при использовании таких, ступенчато регулируемых, дугогасящих аппаратов возникновение значительных расстроек компенсации является неизбежным.

Во втором случае регулирование ДГК осуществляется за счет плавного изменения величины воздушного зазора между подвижными частями магнитопровода (плунжерами). Такие катушки обладают линейной намагничивающей характеристикой во всех режимах работы сети. Эксплуатируются, как правило, в блоке с устройствами автоматической регулировки компенсации и обеспечивают скорость регулирования по току в пределах $0,25 \div 2 \text{ А/С}$.

В качестве регуляторов используют беспоисковые, изготовленные, как правило, кустарным способом устройства, основанные на принципе фазовой автоподстройки частоты контура нулевой последовательности и рабочего напряжения сети. Регуляторы не имеют системы контроля выхода объекта регулирования в область резонанса и не имеют обратной связи по степени настройки катушки. Если учесть, что точность настройки в значительной мере зависит от суммарной емкости всей сети, длительных и случайных изменений состояния изоляции электрооборудования, большого количества возможных параметрических возмущающих факторов и т. д., которые требуют периодического вмешательства обслуживающего персонала в систему регулирования, то становится очевидным, что в условиях эксплуатации контроль степени настройки катушки значительно затруднен, а высокая точность настройки мало вероятна.

Для оценки величины остаточного тока и возможной в условиях эксплуатации расстройки ДГК в электрических сетях с автокомпенсацией, нами были проведены в разных по параметрам и состоянию изоляции участках кабельной сети 6 кВ коксохимического и металлургического заводов. Указанные сети оборудованы плунжерными дугогасящими катушками типа РЗДПОМ (производства ЦРМЗ ПЭО «Донбассэнерго») и регуляторами к ним РАНК-Ф (разработка ДПИ). При проведении опытов измерялись полный и остаточный токи в сети 6 кВ в режиме глухого замыкания фазы на шинах питающей секции, а

также снималась резонансная кривая контура нулевой последовательности. В процессе проведения опытов в начале измерялся остаточный ток замыкания на землю, для чего, при полностью собранной схеме секции и естественном режиме настройки ДГК производилось замыкание фазы на шинах секции и измерялся остаточный ток, который для ранее указанных схем соответственно составил 16,8 А и 14,3 А, а затем в этой же схеме при отключенной катушке измерялся полный ток замыкания, который составил 67 А и 46 А. Длительный опыт эксплуатации указанных сетей с автокомпенсацией показал, что подавляющее большинство замыканий в этих сетях сопровождалось длительным горением заземляющих дуг и большая часть этих повреждений развивалась в многоместные пробой изоляции на поврежденной фазе или переходило в междофазные короткие замыкания. Это подтверждается и выводами, сделанными в [5], где показано, что в реальных сетях с алюминиевыми жилами дуга устойчиво может гореть и при значительно меньших токах, чем нормируется ПТЭ для сетей рассматриваемого класса напряжения. Резонансная кривая для тех же параметров исследуемых сетей снималась в виде зависимости тока замыкания на землю от тока в катушке. Регулирование катушкой в этих опытах производилось вручную, и при заданном токе в катушке измерялся ток в месте замыкания фазы на землю. Из анализа полученных зависимостей (рис. 1) следует, что в сети с нормальной изоляцией (срок эксплуатации до 15-17 лет, $\text{tg}\delta=0,027$). Кривая имеет более выраженный резонансный характер, в то время как для сети с ослабленной изоляцией (срок эксплуатации более 40 лет, $\text{tg}\delta=0,068$) она характеризуется большей пологостью и в области резонанса имеет место значительный разброс в величине тока замыкания на землю. Кроме этого, из анализа полученных зависимостей следует, что точность работы системы слежения регулятора, выполненной на принципе фазовой автоподстройки частоты, не совпадает с технологической точностью компенсации емкостного тока на землю в сети. На основе несложных расчетов, выполненных с использованием приведенных результатов исследования, установлено, что естественная степень расстройки ДГК в сети коксохимзавода составляет в пределах до 10%, а металлургического завода более 15%. Следовательно, актуальность проблемы настройки дугогасящей катушки в резонанс по мере ухудшения состояния изоляции сети существенно возрастает.

В связи с изложенным, практический интерес представляет оценка зависимости дуговых перенапряжений от степени настройки катушки. Из-за сложности проведения подобных опытов в реальных сетях (невозможность идентификации всех факторов, влияющих на величину перенапряжений при проведении опытов; сложность регистрации исследуемых процессов; неизбежность выхода из строя дорогостоящего оборудования при повторении большого числа опытов и т. д.) исследования проведены на физической модели кабельной сети. Эта модель по существу представляет собой некоторое специализирован-

ное аналоговое вычислительное устройство, позволяющее все необходимые параметры исследуемых процессов получить в реальном масштабе времени.

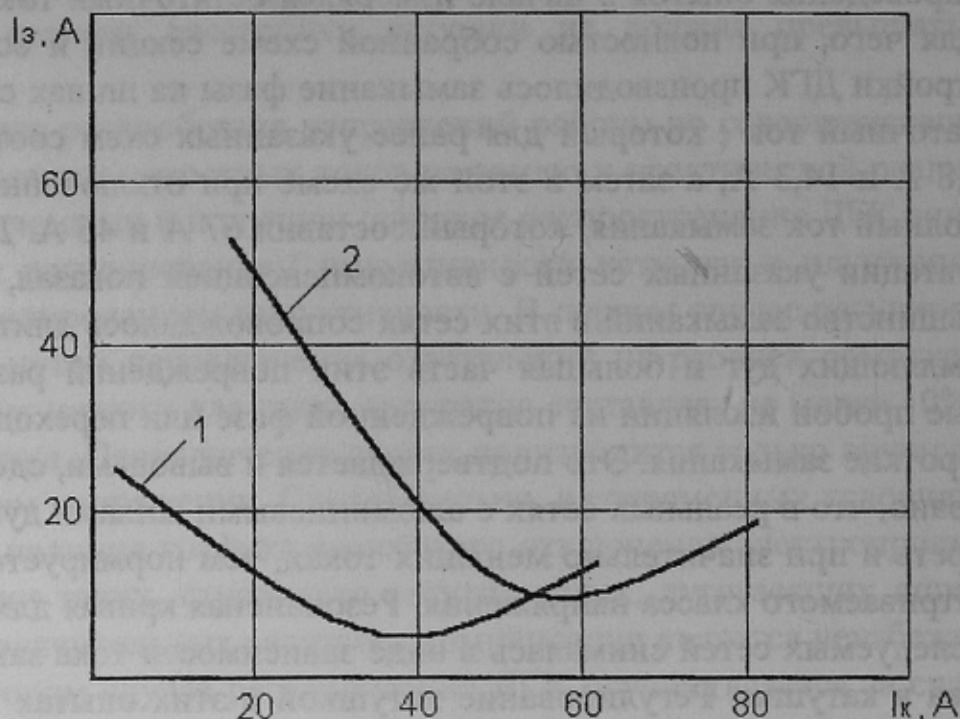


Рисунок 1 – Зависимость тока замыкания на шинах секции металлургического (1) и коксохимического (2) заводов от тока в катушке

Принципиальная схема модели состоит из необходимого сочетания присоединений, соответствующих реальной системе электроснабжения и обобщенной нагрузки, ступенчатое подключение которой позволяет смоделировать практически любую промышленную сеть по току замыкания на землю. Каждое присоединение моделирует кабельную линию с подключенным к ней электродвигателем мощностью от 3 до 15 кВт. При этом модель кабеля представляет собой многоконтурную колебательную систему из П-образных RLC-цепочек. Питание устройства осуществляется от трехфазного трехобмоточного разделительного трансформатора напряжением 0,4/0,4 кВ мощностью до 100 кВА, со схемой соединения обмоток, позволяющих воспроизводить условия работы реальной сети с различными видами заземления нейтрали. Модель снабжена также плавно регулируемой дугогасящей катушкой плунжерного типа. Воспроизведение всех возможных в реальной сети замыканий фазы на землю осуществляется с помощью специально управляемого тиристорного ключа, выполненного на базе тиристора Т9-200, включенного в диагональ выпрямительного моста из вентилей ВК-200. Применение такого устройства позволяет быстропротекающие не периодически повторяющиеся процессы при дуговых замыканиях фазы на землю представить в виде стоячих изображений на экранах электронно-лучевых осциллографов, что существенно сокращает время на

обработку информации и дает возможность за весьма короткое время произвести большой объем экспериментальных исследований по интересующему вопросу. Наиболее характерные осциллограммы могут быть зафиксированы на фотопленку с экрана осциллографа фотоаппаратом, например «Зенит-Е», с короткофокусной приставкой. Адекватность процессов в модели и реальность сети обеспечивается теорией подобия и моделирования электроэнергетических систем и неоднократно подтверждалось экспериментальными исследованиями подобных процессов в реальных сетях.

Из анализа полученных зависимостей (рис. 2) следует, что в части ограничения перенапряжений наибольший эффект от применения ДГК имеет место, если степень расстройки компенсации не превышает 1,5-2 %. В этом случае для различных по параметрам и состоянию изоляции электрических сетей кратность перенапряжений лежит в пределах $(2,4 \div 2,8)U_{\phi}$. Однако, при расстройке компенсации более 5% скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе и величина перенапряжений на элементах сети начинают быстро нарастать и при расстройке более 40% катушка практически перестает выполнять роль средства ограничения дуговых перенапряжений. При указанных выше возможных в системах электроснабжения естественных расстройках ДГК, кратность перенапряжений в сетях с автокомпенсацией следует ожидать в пределах $(3,0 \div 3,2) U_{\phi}$, что существенно выше норм испытательных напряжений электродвигателей ($U_{исп} = 2,74 U_{\phi}$). Если также принять во внимание тот факт, что на существующих в настоящее время в эксплуатации регуляторах имеется запрет на регулирование компенсации в режиме замыкания фазы на землю, то при проведении поисковых переключений в сети, плановом включении и отключении фидеров в этот период, работе устройств АВР и т. д., даже в сети с автокомпенсацией возможны большие расстройки катушки, а, следовательно, и перенапряжения опасные для изоляции оборудования.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что, несмотря на положительные стороны компенсации, ДГК нельзя считать универсальным средством защиты распределительных сетей от воздействия заземляющих дуг и перенапряжений. Острота проблемы постоянно возрастает по мере ухудшающегося технического состояния электрических сетей. Решение ее, как видно, может быть найдено либо в совершенствовании средств регулирования компенсации, либо в оптимизации режима заземления нейтрали в сочетании с другими схемными решениями, обеспечивающими быстрое гашение и исключая возможность повторных зажиганий дуги при замыкании фазы на землю.

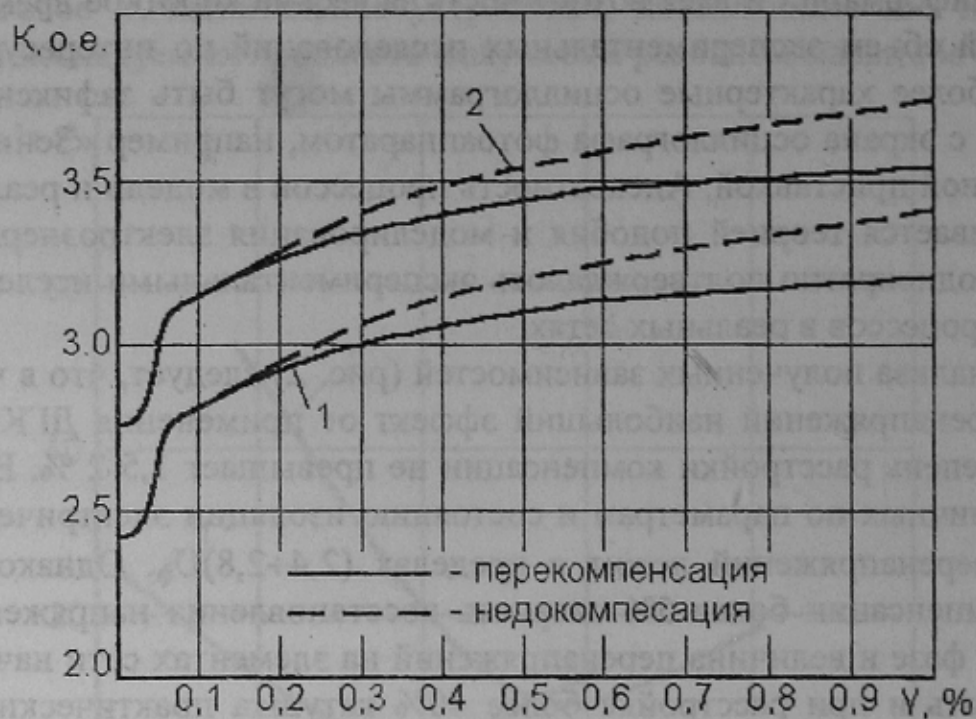


Рисунок 2 – Зависимость максимальной кратности перенапряжений на здоровых фазах в сети металлургического (1) и коксохимического (2) заводов от расстройки компенсации

Математическое моделирование систем электроснабжения и экспериментальные исследования на физической модели и реальной сети позволили нам найти достаточно простые и оригинальные решения рассматриваемой проблемы путем включения в нейтраль сети, параллельно ДГК линейных и нелинейных резисторов и автоматического шунтирования места повреждения с помощью специально разработанного устройства. Устройство включает в себя систему поиска поврежденной фазы и исполнительного органа, выполненного на базе высоковольтных вакуумных контакторов типа КВТ-10/400 Константиновского завода высоковольтной аппаратуры. Предлагаемое устройство позволяет за короткое время найти место повреждения в сети любой конфигурации. Оно может быть использовано как в сетях с изолированной нейтралью, так и с компенсацией емкостных токов на землю и имеет свои решения для случаев наличия и отсутствия в сети релейной защиты от замыканий на землю и действия выходных органов. Широкое внедрение предлагаемого метода позволит при относительно небольших затратах на его реализацию существенно улучшить условия работы электрооборудования в распределительных сетях и продлить срок службы энергообъектов с ослабленной изоляцией.

Выводы

1. На основе анализа опыта эксплуатации и результатов экспериментальных исследований можно утверждать, что не смотря на положительные стороны компенсации дугогасящая катушка не может считаться универсальным средством защиты электрооборудования от термического действия заземляющих дуг и перенапряжений. Острота проблемы возрастает по мере ухудшения технического состояния электрических сетей.

2. Решение проблемы может быть найдено в направлении либо в совершенствовании устройств регулирования компенсацией, либо оптимизации режима заземления нейтрали в сочетании с другими схемными комбинациями, обеспечивающими быстрое гашение дуги и, тем самым, предотвращающих переход однофазных замыканий на землю в многоместные пробой изоляции и междуфазные короткие замыкания как из-за термического действия дуги, так и из-за перенапряжений.

3. Предложенный в работе метод позволяет при относительно небольших затратах на его реализацию за короткое время найти место замыкания фазы на землю в сети любой конфигурации, значительно улучшить условия работы изоляции сети и продлить срок службы энергообъектов с ослабленной изоляцией.

Список литературы

1. Сивокобыленко В.Ф., Дергилев М. П., Иванов С.А. и др. Ограничение перенапряжений в системе собственных нужд электростанций. Энергетика и электрификация №4, 1996.
2. Лихачев Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике, М.: Энергия, 1968. – 464 с.
4. Петров О.А. Точность систем автоматической настройки компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях. Электрические станции 1989. С. 92-96.
5. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянов М.Н. и др. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях. Электрические станции №8, 1971. С. 64-66.