

УДК 621.311.014

**ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ
И СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ
ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка*, М.В. Петровский*

Национальный технический университет “Харьковский
политехнический институт”, г. Харьков;

*Сумский государственный университет, г. Сумы

Выполнен анализ условий работы электрических сетей 6–35 кВ и применяемых в них средств ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Переходные процессы при замыканиях на землю достаточно сложны, их качественные и количественные характеристики зависят от большого числа факторов, степень влияния которых исследована недостаточно. Необходимы поиски средств ограничения перенапряжений или их использование в комплексе. Решение этих вопросов представляется возможным на пути разработки полных моделей элементов электрических сетей и средств ограничения токов и напряжений, отражающих все основные влияющие факторы, на основе новых методов и средств расчета электромагнитных переходных процессов.

УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 кВ

Показатели надежности систем электроснабжения в целом в значительной степени определяются уровнем надежности распределительных электрических сетей напряжением 6–35 кВ. По данным различных литературных источников [1, 2] аварийность в сетях напряжением 6–35 кВ, работающих в режиме с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью, в значительной степени связана с внутренними перенапряжениями.

Наиболее типичными внутренними перенапряжениями в сетях 6–35 кВ являются:

– коммутационные, возникающие в результате срабатывания коммутирующих аппаратов, вызванные технологическими переключениями;

– аварийные, возможные из-за переходных процессов при перекрытии изоляции в результате удара молнии (в воздушных линиях) либо при неустойчивом (перемежающемся) горении дуги в месте однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (преимущественно в кабельных линиях);

– резонансные в сетях с дугогасящими реакторами. Резонансные перенапряжения могут возникнуть в нейтрали и фазах сети с дугогасящим реактором вследствие резонанса в контуре, состоящем из его индуктивности и емкости сети на землю [3];

– многообразные феррорезонансные [4, 5].

Анализ материалов автоматической регистрации и опыта эксплуатации сетей 6–35 кВ позволяют сделать следующие выводы:

– перенапряжения от перемежающейся дуги вызывают повреждения ослабленной изоляции в других точках сети;

– отыскание и устранение мест с ослабленной изоляцией обычно довольно затруднительны, т.к. при этом необходимы многократные отключения одних и тех же элементов сети;

– значительную долю повреждений в сетях составляют повреждения опорных и проходных изоляторов и коммутационных аппаратов на подстанциях;

– удельная повреждаемость коммутационных аппаратов от внутренних перенапряжений довольно высокая и всего в 3 раза ниже, чем от грозовых перенапряжений.

Основными причинами замыканий на землю являются:

– в воздушных сетях: повреждение опор линий, перекрытие и повреждение изоляции на опорах, повреждение кабельных муфт при переходе воздушных линий в кабельные;

– в кабельных сетях: повреждение изоляции на подстанциях, повреждение концевых и соединительных муфт, повреждение при земляных работах в районе трассы кабеля, повреждения в кабелях.

Наиболее уязвимым элементом электрической сети при воздействии внутренних перенапряжений являются кабели, в частности места соединения их друг с другом и с остальными элементами сети. Поэтому значительная доля повреждений связана с перенапряжениями при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях (по данным [6] – 77 % общего числа повреждений).

Анализ показывает, что причинами повреждений кабельных линий в большинстве случаев являются: механические повреждения, заводской брак, дефекты монтажа муфт, нарушения технологии прокладки КЛ, экстремальные условия эксплуатации.

Однофазные замыкания возникают, как правило, в местах дефектов изоляции кабельных линий и оборудования подстанций из-за старения изоляции, невыполнения технологии изготовления изоляционных конструкций на заводах, норм и инструкций при монтаже и эксплуатации оборудования, а также механических повреждений, которые в момент их появления приводят лишь к частичному снижению электрической прочности изоляции [7].

Внутренние перенапряжения часто возникают при переходных процессах от перемежающейся дуги и опасны для изоляции электроустановок своей продолжительностью и шириной охвата сети, электрически связанной с местом повреждения.

Большое влияние на процесс старения изоляции оказывают технологические и эксплуатационные факторы. К технологическим факторам относят скрытые дефекты изготовления и монтажа; использование материалов, не удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям; изменение режимов термовакуумной обработки изоляции после изготовления; дефекты опрессовки. К эксплуатационным факторам, если исключить аварии, вызванные ошибками персонала, относятся, в первую очередь, перегрузки: токи короткого замыкания, коммутационные и грозовые перенапряжения. Перегрузки ведут к зарождению различного рода дефектов, которые затем развиваются в рабочем режиме.

Сложная органическая изоляция кабелей, соединительных и концевых кабельных муфт обладает свойством накапливать дефекты. Воздействие перенапряжений на такую изоляцию сопровождается снижением электрической прочности, которая не восстанавливается до первоначального состояния после прекращения воздействия перенапряжений. Последствием перенапряжений заключается в кумулятивном развитии слабых мест (дефектов), т.е. каждое воздействие их подготавливает пробой при последующих случайных перенапряжениях.

Следует отметить, что накопление дефектов и ослабление изоляции приводит к тому, что ослабленная изоляция может быть затем повреждена и умеренными перенапряжениями или другими воздействиями. Поэтому перенапряжения являются скрытой причиной большего числа аварийных отключений, чем это указывается в литературе.

Междуфазное короткое замыкание возникает, как правило, после многократных случайных воздействий. В сложном комплексе мест с ослабленной изоляцией нарушение в сети происходит тогда, когда хотя бы одно место с наиболее ослабленной изоляцией (с наибольшим дефектом) окончательно потеряет электрическую прочность [8, 9].

Для обеспечения достаточно высокой эксплуатационной надежности необходимо принимать меры по усилению изоляции и ограничению перенапряжений. Второй путь, как менее затратный, является более предпочтительным.

Наиболее частым видом внутренних перенапряжений в сетях 6–35 кВ являются перенапряжения, связанные с однофазными замыканиями на землю. Их доля от всех видов аварий составляет до 80 % [1].

За последние десять лет средний удельный показатель повреждаемости электрооборудования сетей по электрическим причинам возрос примерно на порядок и по данным опыта эксплуатации в настоящее время, с учетом пробитого при испытаниях, составляет более 100 повреждений на каждые 100 км сети в год. В подавляющем большинстве случаев (до 90 % общего числа нарушений нормальной работы сети) повреждение начинается с пробоя изоляции на землю, а затем больше половины из них (до 70 %) в сложившейся обстановке развиваются в междуфазные короткие замыкания или многоместные пробой изоляции с групповым выходом из строя электрооборудования [10].

Наибольшую опасность представляют дуговые перенапряжения, возникающие в сети при перемежающемся характере горения дуги в месте пробоя фазной изоляции на землю, так как дуга может повредить изоляцию и вызвать двух- или трехфазное короткое замыкание. По некоторым данным, около 60 % всех замыканий на землю в этих электрических сетях носят именно такой характер. Погасание и зажигание перемежающейся дуги вызывает сложные переходные процессы, интенсивность которых, как показывает опыт эксплуатации, зависит от таких факторов, как характеристика дуги, емкость, индуктивность, сопротивление цепи и др. [11].

В сетях с преобладанием кабельных линий отключения от перехода однофазного замыкания в междуфазное достигают 70 % общего количества отключений. Увеличение тока замыкания на землю приводит к росту вероятности перехода однофазных замыканий в межфазное непосредственно в точке горения дуги.

Из опыта эксплуатации кабельных сетей 6–10 кВ известны неоднократные случаи многоместных пробоев изоляции под рабочим напряжением. Известны случаи одновременного пробоя в 4–5 точках линий. Во-первых, наличие пробоев изоляции под рабочим напряжением указывает на недостаточно высокий уровень изоляции. Во-вторых, наличие многоместных пробоев свидетельствует о существовании перенапряжений.

Таким образом, несмотря на значительные запасы изоляции, аварийность сетей напряжением 6–35 кВ по причине внутренних перенапряжений достаточно высока. Поэтому разработка эффективных средств исследования перенапряжений в этих сетях и средств их снижения в настоящее время актуальна.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Общее назначение мер защиты от перенапряжений состоит в том, чтобы при минимальных дополнительных затратах получить максимальный экономический эффект от снижения ущерба, вызванного перенапряжениями. Эту задачу призваны выполнять мероприятия, обеспечивающие снижение уровня перенапряжений и, тем самым, вероятности пробоя или перекрытия изоляции.

Меры и средства защиты электрических сетей от перенапряжений разделяют на превентивные и коммутационные. Превентивные меры защиты оказывают постоянное влияние на сеть. Их назначение – предотвратить возникновение перенапряжений или способствовать ограничению их величины. В сетях 6–35 кВ к ним относят заземление нейтрали трансформаторов через дугогасящие реакторы, а также – резистивное (низкоомное и высокоомное) заземление.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений содержат в себе коммутирующие элементы, которые срабатывают, когда перенапряжение в точке их установки превысит некоторую критическую величину. В сетях 6–35 кВ к коммутационным средствам защиты относят защитные промежутки, разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений.

В настоящее время применяются следующие методы ограничения перенапряжений при замыканиях на землю в сетях 6–35 кВ:

- компенсация емкостного тока замыкания на землю;
- заземление нейтрали через резистивное сопротивление;
- установка разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений.

Компенсация емкостного тока применяется для уменьшения тока замыкания на землю до нормируемых значений и осуществляется включением в нейтральную точку трехфазной сети индуктивного сопротивления – дугогасящего реактора (ДГР) с регулируемым воздушным зазором магнитопровода или ступенчатым регулированием числа витков его обмотки. Нейтраль первичной обмотки одного из сетевых трансформаторов (трансформатора собственных нужд или специально установленного заземляющего трансформатора) со схемой соединения обмоток “звезда-треугольник” заземляется через ДГР.

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [12] и Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей [13] предусмотрены два варианта состояния нейтрали в сетях 6–35 кВ: изолированная или заземленная через дугогасящий реактор. При значениях емкостного тока замыкания на землю, больших, чем указано в [12], между нейтралью и заземляющим устройством подстанции должен быть включен реактор для компенсации емкостных токов однофазных замыканий.

Выбор режима работы нейтрали сетей 6–35 кВ в нашей стране сложился исторически. До настоящего времени изолированная нейтраль применяется в сетях при небольшом емкостном токе замыкания на землю. Изолированной нейтралью свойственны весьма серьезные недостатки: возможность возникновения в сети дуговых перемежающихся замыканий на землю, сопровождающихся значительными перенапряжениями на неповрежденных фазах; большая вероятность развития однофазных замыканий в более тяжелые повреждения и т.д.

В основном сети напряжением 6–35 кВ выполняются с компенсацией емкостных токов замыкания на землю с помощью ДГР.

Компенсация емкостных токов замыкания на землю призвана повысить надежность работы сети:

- уменьшить ток через место повреждения до минимальных значений,

обеспечить надежное дугогашение, предотвратить длительное воздействие заземляющей дуги;

- ограничить перенапряжения, возникающие при дуговых замыканиях на землю, до значений, безопасных для изоляции эксплуатируемого оборудования и линий;

- снизить скорости восстанавливающихся напряжений на поврежденной фазе, способствовать восстановлению диэлектрических свойств места повреждения в сети после каждого погасания перемежающейся заземляющей дуги.

Однако необходимо отметить, что при компенсации емкостных токов не применяется релейная защита от замыканий на землю. Компенсированные сети (в большинстве своем) имеют селективную сигнализацию замыкания на землю.

Эффективность компенсации емкостных токов существенно зависит от точности настройки ДГР. Расстройка компенсации по абсолютной величине более 1–1,5 % приводит к существенному ухудшению основных показателей переходных процессов в сети, т.е. приводит к снижению эффективности действия систем компенсации емкостных токов замыканий на землю [14]. Стабильная резонансная настройка может быть обеспечена только при применении реакторов специальных конструкций с автоматическими регуляторами, позволяющими быстро и плавно изменять их сопротивление и тем самым осуществлять автоматическую резонансную настройку реакторов во всех возможных режимах сети [15, 16].

Кроме того, при компенсации емкостного тока в протяженных кабельных сетях остаточный ток замыкания на землю составляет десятки ампер. В [6, 17] указывается, что в кабельных сетях с алюминиевыми кабелями устойчивые дуговые замыкания могут существовать даже при компенсации емкостных токов. В таких сетях возникает опасность развития многофазного замыкания и многоместной аварии. Режим компенсации является приемлемым решением для воздушных сетей, но для кабельных сетей он чреват следующими опасностями:

- наличием большого остаточного тока замыкания на землю;
- переходом длительного однофазного замыкания в многофазное;
- возникновением резонансных явлений.

Ограничение тока однофазного замыкания до безопасного значения возможно только при условии, если в токе замыкания нет активной и высших гармонических составляющих. С другой стороны, в ряде публикаций справедливо указывается на заметный рост уровня высших гармоник в фазных напряжениях и в токе однофазного замыкания [18], что типично для промышленных, городских сетей.

Хотя и разрабатываются устройства для компенсации активной составляющей емкостного тока замыкания на землю, а также его высших гармонических составляющих, целесообразность их применения в конкретных случаях требует обоснования технико-экономическими расчетами [19].

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что даже единичный кратковременный самоустранившийся пробой твердого диэлектрика в подавляющем большинстве случаев является необратимым повреждением. Такие повреждения могут сопровождаться горением прерывистой дуги, которая за определенный промежуток времени переходит в стабильную горящую дугу или металлическое замыкание. Оценивая эффективность применения компенсации для борьбы с “клевками”, следует иметь в виду, что процесс развития однократного пробоя твердой изоляции в полное замыкание может продолжаться длительное время, чему способствует сама компенсация емкостного тока однофазного замыкания [7].

Поэтому, говоря о целесообразности установки компенсирующих реакторов, следует заметить, что даже в тех случаях, когда положительный эффект компенсации налицо, т.е. имеет место предотвращение развития дуговых замыканий, в изоляции электрооборудования происходит накопление слабых мест. Как правило, в первые годы работы электроустановок с компенсацией емкостного тока наблюдается снижение количества и кратностей перенапряжений, а затем начинает проявляться наличие слабых мест в изоляции.

В практике эксплуатации эффективность применения компенсации емкостных токов вызывает сомнения по следующим причинам:

1. В электрических сетях не обеспечена полная (по установленной мощности ДГР) компенсация емкостных токов, что связано с общей экономической ситуацией в стране. Преимущества компенсированных сетей в полной мере проявляются лишь при достаточно точной резонансной настройке ДГР. В то же время в сетях преобладают реакторы, непригодные для автоматизации. Технические данные ступенчато регулируемых реакторов в принципе не позволяют обеспечивать точную автоматическую настройку ДГР. Имеющиеся же в наличии плавно регулируемые ДГР, как правило, не оснащены авторегуляторами. Даже при наличии автоматических регуляторов опыт показывает, что:

- эксплуатируется много регуляторов, разработанных в 60–80-е годы прошлого столетия;
- в большинстве эксплуатируемых регуляторов были заложены недоработанные схмотехнические решения;
- элементная база большинства регуляторов на сегодня морально и физически устарела, и они стали практически ремонтнепригодны;
- около 70% старых автоматических регуляторов сломаны или выведены из строя по причине неверной работы [20].

Т.е. ни о какой автоматической компенсации в такой ситуации не может быть речи, а реализованное техническое решение попросту не отвечает поставленной цели. В результате широко практикуемой эксплуатации ненастроенных ДГР возникают сомнения в их эффективности [21].

2. Компенсация одной лишь емкостной составляющей даже в условиях идеальной настройки, хотя и существенно замедляет процесс старения изоляции, повышает вероятность самоустранения замыканий и тем самым снижает вероятность развития аварии, тем не менее, в случаях неустранимости замыкания без ремонта не ликвидирует полностью дуговой процесс и не устраняет опасностей от длительного протекания тока в режиме однофазного замыкания на землю.

3. В компенсированных сетях снижается эффективность селективных защит, действие которых основано на использовании сигналов промышленной частоты.

В последние годы все чаще обращается внимание на ряд серьезных недостатков компенсации емкостных токов как метода улучшения показателей надежности и электробезопасности эксплуатации распределительной сети.

Для устранения указанных причин, для поиска комплексного подхода, предусматривающего сбалансированное решение вопросов надежности электроснабжения в сетях 6–35 кВ, селективной сигнализации, электробезопасности, поиска участков с повреждением, необходимы детальные исследования, проведение которых требует разработки соответствующих математических моделей [22–25].

В настоящее время активно дискутируются вопросы выбора режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6–35 кВ.

Для уменьшения значений дуговых перенапряжений и числа

замыканий на землю в сетях 6–35 кВ проводятся теоретические и экспериментальные исследования по включению в нейтраль сети высокоомного или низкоомного резистора, сохранив тем самым возможность работы сети без автоматического отключения однофазных повреждений [26–28].

Путем применения высокоомного резистора, включенного параллельно ДГР, делаются попытки достигнуть снижения перенапряжений в сети при расстройке реактора. Высокоомный резистор весьма благоприятно влияет на снижение времени воздействия повышенных напряжений на изоляцию неповрежденных фаз даже в случае резонансной настройки ДГР, что является несомненным достоинством такой схемы заземления нейтрали. В [29], например, отмечается, что перевод существующих городских распределительных сетей 6–10 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью в режим работы с нейтралью, заземленной через токоограничивающее сопротивление, позволяет продлить срок службы кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией на 25 %.

Система с высокоомным заземлением нейтрали обычно использует резистор, создающий по условию эффективного ограничения дугowych перенапряжений активный ток, равный емкостному порядка 1–10 А.

Считается, что эта система имеет следующие преимущества:

- сохраняет основное преимущество сети с изолированной нейтралью – позволяет не отключать мгновенно замыкание на землю, поврежденная цепь может оставаться в работе до устранения замыкания;

- обеспечивает снижение амплитуды, длительности и частоты воздействия дугowych (примерно до уровней $2,5U_{\phi}$) и феррорезонансных перенапряжений на изоляцию оборудования сети, возникающих в процессе дугowego замыкания на землю, что позволяет предотвратить развитие аварий [30];

- создает ток в месте повреждения, удовлетворяющий по чувствительности требованиям релейной защиты, что дает возможность создания простой и надежной селективной защиты от замыканий на землю [31].

Имеются данные, согласно которым при значениях активного тока порядка $(0,5–1)I_c$ вероятная кратность перенапряжений на неповрежденных фазах снижается до 2,1. С другой стороны, еще в 1918 г. В. Петерсен упоминал о заземлении нейтрали сети через резистор и даже дал формулу для выбора сопротивления, ограничивающего перенапряжения: $R_n = (1–2,5)/3\omega C$. Этому условию соответствует $I_A = (0,4–1)I_C$ [19].

Заземление нейтрали через низкоомный резистор призвано снизить вероятность возникновения в сети перенапряжений и двойных замыканий на землю, использовать простые токовые защиты от замыканий на землю [32, 33].

Основной недостаток резистивного заземления нейтрали заключается в том, что каждый однократный пробой будет приводить к неоправданному отключению присоединения с повреждением. Кроме того, в настоящее время включение резистора в нейтраль сети в нашей стране нормативно не регламентировано, что препятствует распространению такого режима нейтрали и затрудняет исследования его как средства ограничения перенапряжений. Для обеспечения возможности внедрения режима заземления нейтрали через активное сопротивление предлагается внести изменения в соответствующие статьи действующих сегодня в Украине ПУЭ, касающиеся режимов работы нейтрали сетей 6–35 кВ [34].

Однако для окончательного решения необходима проверка эффективности заземления нейтрали через резистор для всего многообразия сетей 6–35 кВ, отличающихся назначением, конструкцией, величиной емкостных токов, характерными местами повреждений и т.д.

Здесь нужны достаточно масштабные исследования, практически единственным возможным и реальным способом проведения которых является моделирование режимов работы электрических сетей с применением современной вычислительной техники.

До середины 80-х годов для защиты изоляции оборудования подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений широко применялись вентильные разрядники с нелинейным последовательно включенным резистором на основе электротехнического карбида кремния.

Принципиальный переворот в области ограничения перенапряжений в сетях произошел в результате разработки ОПН – высоконелинейных варисторов на основе окиси цинка.

Использование оксидно-цинковых варисторов позволило разработать защитные аппараты без искровых промежутков: при рабочем напряжении токи через варисторы измеряются миллиамперами, а при перенапряжениях достигают сотен и тысяч ампер. Защитное действие заключается в том, что при воздействии на них перенапряжений проводимость ОПН резко увеличивается и волна тока отводится в землю. При дуговом замыкании на землю ОПН уменьшает высокочастотные токи дуги и энергию, выделяемую в ней, что влияет на длительность перемежающейся дуги и на количество циклов токовых воздействий на ОПН [35].

ОПН обладают следующими преимуществами по сравнению с вентильными разрядниками:

- глубокий уровень ограничений всех видов импульсных перенапряжений;
- отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжений;
- способность к перегрузке и рассеиванию больших энергий;
- непрерывное подключение к защищаемой сети;
- простота конструкции, компактность, надежность и безопасность в эксплуатации.

В последнее время для изготовления корпусов ОПН стали использоваться полимерные материалы, например стеклопластик, – для цилиндров с силиконовыми ребристыми покрытиями. Проводятся исследования по созданию отечественной технологии получения высоковольтных металлооксидных варисторов на основе окиси цинка [36].

Разрабатываются и внедряются в эксплуатацию схемы защиты от перенапряжений с использованием ОПН и резисторного заземления нейтрали. Они применяются в кабельных сетях собственных нужд ряда электростанций. Опыт их использования показал, что при замыканиях на землю не зафиксированы повреждения электродвигателей от коммутационных перенапряжений и снизилось количество переходов однофазных замыканий в многофазные [37, 38].

Однако результаты мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях говорят о том, что разрядники и ОПН с уровнем ограничения (3,2–3,4) $U_{фм}$ не работают при таких перенапряжениях, а их энергетические характеристики не могут определяться этим видом перенапряжений [39].

В характеристиках от производителей (например, [40]) указывается количество стандартных импульсов, выдерживаемых ОПН. На оборудование реальных сетей, однако, воздействуют импульсы весьма разнообразной формы и длительности. При воздействии многократных импульсов тока ОПН выходят из строя и сами являются причиной снижения надежности.

В связи с этим, чтобы исследовать формы и длительности импульсов тока, воздействующих на ОПН при замыканиях на землю, и определить реальный ресурс работы ограничителей перенапряжений, также необходимо иметь полные математические модели электрических сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ условий работы электрических сетей 6-35 кВ и применяемых в них средств ограничения перенапряжений свидетельствует о том, что:

- переходные процессы при замыканиях на землю в сетях 6-35 кВ достаточно сложны, их качественные и количественные характеристики зависят от большого числа влияющих факторов – индуктивных и емкостных параметров сети и их соотношения, применяемых средств ограничения токов и напряжений, конфигурации и протяженности сети, характеристик дуги, ОПН, коммутационных элементов;

- степень влияния всех этих факторов исследована недостаточно, и существующие средства (эксперимент, средства регистрации, упрощенные модели) не позволяют это сделать.

Поэтому вопросами, требующими решения, являются следующие:

- определить область применения существующих в настоящее время в нашей стране способов и средств ограничения токов и перенапряжений;

- выяснить, эффективно ли и в каких сочетаниях, при каких условиях работы сетей комплексное использование различных мер;

- оценить возможность применения усовершенствованных или принципиально новых способов и устройств, если эффективность применяемых и комплексных средств недостаточна.

Решение этих вопросов представляется возможным на пути разработки полных моделей элементов электрических сетей и средств ограничения токов и напряжений, отражающих все основные влияющие факторы, на основе новых методов и средств расчета электромагнитных переходных процессов при однофазных замыканиях на землю.

Основными задачами дальнейших исследований являются следующие:

- разработать полные математические модели элементов сети и электрической сети 6–35 кВ в целом, позволяющие воспроизводить электромагнитные переходные процессы, протекающие в сетях при однофазных замыканиях на землю с учетом всех основных влияющих факторов;

- выполнить исследования эффективности комплекса методов и средств ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6–35 кВ;

- сформулировать рекомендации по повышению эффективности применяемых в эксплуатации средств защиты от перенапряжений сетей 6–35 кВ и предложить возможные методы и средства защиты, направленные на повышение надежности работы сетей при однофазных замыканиях на землю.

SUMMARY

OVERVOLTAGE IN ELECTRIC NETWORKS 6-35 KV AND MODERN MEANS OF THEIR RESTRICTION AT SHORT CIRCUITS ON THE GROUND

Ju.N. Veprik, S.N. Lebedka, M.V. Petrovsky**

National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov

**Sumy State University, Sumy*

The analysis of operating conditions of electric networks 6-35 kV and means of restriction used in them overvoltages is executed at single-phase short circuits on the ground. Transients at short circuits on the ground are complex enough, their qualitative and quantitative characteristics depend on the big number of factors which degree of influence is investigated insufficiently. Searches of means of restriction overvoltages or their use in a complex are

necessary. The decision of these questions is obviously possible for a way of development of full models of elements of electric networks and means of restriction of currents and the voltage reflecting all basic influencing factors, on the basis of new methods and means of calculation of electromagnetic transients.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 152 с.
2. Зархи И.М., Мешков В.Н., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35кВ. – Л.: Наука, 1986. – 128 с.
3. Алексеев В.Г., Зихерман М.Х. Феррорезонанс в сетях 6–10 кВ // Электрические станции. – 1979. – № 1. – С. 63–65.
4. Лисицин Н.В. Аварийные режимы в сетях с изолированной нейтралью и способ контроля изоляции // Электрические станции. – 1996. – № 1. – С. 42–48.
5. Зихерман М.Х., Левковский А.И. Резонансные процессы в сетях 35 кВ с трансформаторами напряжения // Электрические станции. – 1996. – № 5. – С. 54–56.
6. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М., Костенко В.И., Солдатов В.Ф. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
7. Назаров В.В. Защита электрических сетей от однофазных замыканий. – К.: Либідь, 1992. – 124 с.
8. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
9. Гиндуллин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
10. Мусиенко А.Г., Сивокобыленко В.Ф., Дергилев М.П. Пути повышения надежности работы городских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ // Электрические сети и системы. – 2003. – № 3. – С. 18–26.
11. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
12. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
13. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
14. Петров О.А., Левковский А.И. О допустимой расстройке компенсации в электрических сетях 6–35 кВ // Электрические станции. – 1992. – № 1. – С. 71–75.
15. Брянцев А.М., Лурье А.И., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Базылев Б.И. Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6–35 кВ // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 59–68.
16. Брянцев А.М., Долгополов А.Г. Системы управления и защиты для дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием // Электрические станции. – 2000. – № 2. – С. 41–47.
17. Дударев Л.Е., Зубков В.В. Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ // Электричество. – 1979. – № 2. – С. 8–12.
18. Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания одной фазы на землю // Промышленная энергетика. – 1986. – № 1. – С. 39–40.
19. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с.
20. Миронов И.А. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – №5(47).
21. Фельдман М.Л. Нужна ли компенсация емкостных токов? // Энергетик. – 2001. – № 8. – С. 25.
22. Обабков В.К., Целуевский Ю.Н. Альтернативное резисторному заземлению нейтрали средство борьбы с замыканиями в коротких сетях 6–35 кВ // Электротехника – 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: Сб. докл. VIII симпозиума, Моск. обл., 24–26 мая 2005 г. – М.: ВЕИ, 2005. – Доклад 1.13.
23. Ефимов Ю.К., Обабков В.К., Целуевский Ю.Н., Шишкина О.Г. Система автоматического подавления дуговых замыканий в сетях собственных нужд энергоблоков 500 МВт // Электрические станции. – 1992. – № 5. – С. 71–75.
24. Обабков В.К. Принцип построения измерителей расстройки компенсации емкостных токов в сетях 6–35 кВ // Электрические станции. – 1992. – № 10. – С. 76–78.
25. Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Григорьев В.С., Коберник Е.Д., Максимов В.Н., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Электрические станции. – 1998. – № 7. – С. 26–30.
26. Назаров В.В. О режимах нейтрали сетей 6–35 кВ // Промышленная энергетика. – 1993. – № 6. – С. 33–36.
27. Корепанов А.А. Обоснование эффективности резистивного заземления нейтрали сетей 6(10) кВ: Автореф. дисс.... канд. техн. наук: 05.14.02 / С.Пб. гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 1998. – 17 с.

28. Виштибеев А.В. О необходимости перевода электрических сетей 6–35 кВ на режим резистивного заземления нейтрали // Проблемы энергетики. – 2002. – № 3.
29. Короткевич М.А., Жив Л.Д. Влияние режима нейтрали на срок службы кабельных линий 6–10 кВ // Изв. вузов. Энергетика. – 1997. – № 11-12. – С. 30–33.
30. Дергилев М.П., Обабков В.К. Неснижаемые кратности перенапряжений с сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали // Электротехника – 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: Сб. докл. VIII симпозиума, Моск. обл., 24–26 мая 2005 г. – М.: ВЕИ, 2005. – Доклад 1.14.
31. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1998. – № 12. – С. 8–22.
32. Шабад М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 11–13.
33. Лисицин Н.В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–24.
34. Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В., Нагорный П.Д., Демченко Н.А., Жереб А.А. О необходимости изменений режимов нейтрали в сетях 3–35 кВ // Энергетика и электрификация. – 2001. – № 4. – С. 27–29.
35. Богатенков И.М., Карabanов А.В., Созинов А.В., Халилов Ф.Х. Разработка и опытная эксплуатация ограничителей перенапряжений для защиты сетей 6 кВ собственных нужд электростанций // Электрические станции. – 1988. – № 10. – С. 82–86.
36. Ганефельд Р.В., Яковлев В.С., Стрелкова Г.Г. Высоковольтные ограничители перенапряжений на основе металлооксидных варисторов // Энергетика и электрификация. – 2003. – № 5. – С. 31–34.
37. Подъячев В.Н., Плессер М.А., Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И. Глубокое ограничение перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд ТЭС // Энергетик. – 1999. – № 2. – С. 20–21.
38. Софинский А.В., Кучеренко В.И., Хуртов И.И., Багаев Д.В., Ильиных М.В., Сарин Л.И. Резистивное заземление нейтрали в сети собственных нужд Энгельсской ТЭЦ-3 Саратовэнерго // Электрические станции. – 2003. – № 2. – С. 51–55.
39. Качесов В.Е., Ларионов В.Н., Овсянников А.Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях // Электрические станции. – 2002. – № 8. – С. 38–45.
40. www.tavrida.ru/products.

Веприк Ю.Н., кандидат техн. наук,
профессор;

Лебедка С.Н., ассистент;

Петровский М.В., кандидат физ.-мат. наук,
ст. преподаватель

Поступила в редакцию 21 ноября 2008 г.