

ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И СИСТЕМА ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

Владимир Владимирович Картавец
Дмитрий Николаевич Афоничев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

В связи с усложнением структуры сельских электрических сетей 10–35 кВ и модернизацией аппаратной базы на основе современных коммутационных и защитных устройств особую актуальность приобретает задача анализа внутренних перенапряжений в сети в различных режимах ее работы. Результаты анализа имеют большое значение при решении задач выбора системы ограничения перенапряжений, обоснования уровней изоляции оборудования, отстройки устройств релейной защиты. В работе проведена классификация и анализ режимов, при которых могут быть созданы условия образования перенапряжения в линиях электропередачи и оборудовании подстанций. Предлагаются возможные меры ограничения перенапряжений. Особое внимание уделено феррорезонансным перенапряжениям, связанным с наличием в сети трансформаторов напряжения как элемента, обладающего нелинейной индуктивностью, а также шинных мостов, линий электропередачи и других элементов, обладающих емкостью. Проанализирована физическая картина развития феррорезонансных явлений. Отмечено, что возможны два механизма возбуждения феррорезонансных колебаний: самовозбуждение колебаний токов и напряжений в электрической сети, содержащей параллельные ветви с нелинейной индуктивностью трансформатора и емкостью оборудования, а также механизм как результат переходного процесса, связанного с какой-либо коммутацией, например возникновения и исчезновения замыкания линии на землю. Рассмотрены методы изучения феррорезонансных процессов с помощью современных программных средств, сделаны предварительные выводы об условиях образования феррорезонансных цепей и предложены способы ограничения феррорезонансных перенапряжений. В качестве основного элемента защиты предложен нелинейный ограничитель перенапряжений. Описаны три варианта использования ограничителей: включение на шины трансформаторной подстанции вместо разрядников; заземление нейтрали электрической сети через ограничитель и установка ограничителя в разомкнутый треугольник вторичной обмотки трансформатора напряжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрическая сеть, перенапряжения, коммутация, трансформатор напряжения, феррорезонанс.

LIMITING SYSTEM FOR INTERNAL OVERVOLTAGES IN RURAL ELECTRICAL NETWORKS

Vladimir V. Kartavtsev
Dmitriy N. Afonichev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Constant complication of the structure of rural electrical networks of 10-35 kV and further modernization of electrical equipment with modern switching and protective devices set the priority for profound analysis of internal overvoltages in the network at various modes of operation. The results of such analysis can be of great importance in solving the problems of choosing a system for limiting overvoltages, justifying the levels of equipment insulation, and grading of relay protection devices. The authors present the classification and analysis of modes under which conditions overvoltage in electric transmission lines and substation equipment can be generated; propose possible measures limiting the overvoltages, paying special attention to ferroresonance overvoltages generated due to the presence of voltage transformers in the network as an element of nonlinear inductance, as well as due to the presence of busbar bridges, electric transmission lines and other elements possessing capacity; analyze physical pattern of ferroresonance phenomena development; describe two possible mechanisms of ferroresonance oscillations excitation: (i) self-excitation of oscillations of currents and voltages in an electric transmission line containing parallel branches with a nonlinear inductance of a transformer and capacity, (ii) mechanism of ferroresonance oscillations excitation as a result of a transient process associated with any type of switching, for example, generation and breaking of line ground fault; consider methods for studying ferroresonance processes using modern software; draw preliminary conclusion on the conditions of

ferroresonance chains generation; propose methods for limiting ferroresonance overvoltages, i.e. propose to use nonlinear overvoltage suppressor as the main protection element; discuss three options of limiters usage: (i) switching on a transformer substation busbar instead of arresters, (ii) neutral grounding of the electric line by the limiter, (iii) installation of the limiter in the open delta of voltage transformer secondary winding.

KEYWORDS: electric line, overvoltages, switching, voltage transformer, ferroresonance.

Электрические сети представляют собой наиболее повреждаемый элемент электроэнергетической системы [1, 3, 8, 9,]. Причиной повышенной аварийности электрических сетей являются атмосферные и внутренние перенапряжения.

Ранее считалось, что для электрических сетей 6–35 кВ основное значение имели атмосферные перенапряжения. В настоящее время особую актуальность приобретают внутренние перенапряжения в связи с оснащением электрического оборудования устройствами, выполненными на современной элементной базе, которые имеют пониженный запас электрической прочности изоляции.

Для сетей номинального напряжения 220 кВ и выше также возрастает роль внутренних перенапряжений, поскольку увеличивается их кратность по отношению к номинальному напряжению и приближается к аналогичному показателю для атмосферных перенапряжений. Поэтому для обоснованного выбора уровней изоляции в электрических сетях любого класса напряжения необходимо иметь достоверную информацию о внутренних перенапряжениях [10].

Можно выделить несколько типов внутренних перенапряжений.

Перенапряжения первого типа возникают при проведении либо плановых коммутаций по сборке или разборке штатных электрических схем, либо при возникновении замыкания одной или нескольких фаз сети на землю с проведением последующих аварийных коммутаций, направленных на предотвращение или ликвидацию короткого замыкания. Этот тип перенапряжений называют коммутационными перенапряжениями.

Второй тип перенапряжений носит название дуговых, поскольку возникает при дуговых замыканиях в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью.

К третьему типу относятся феррорезонансные перенапряжения, сопровождающие специфические режимы, связанные с наличием в электрических сетях нелинейных силовых и измерительных трансформаторов.

Коммутационные перенапряжения носят кратковременный характер, в то время как дуговые и феррорезонансные имеют большую продолжительность по времени.

Система защиты от коммутационных перенапряжений построена на использовании как аппаратных средств, так и противоаварийной автоматики. Под аппаратными средствами понимаются вентильные разрядники, ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), предвключаемые и шунтирующие активные сопротивления, которыми оснащаются выключатели. К средствам противоаварийной автоматики и релейной защиты относится автоматическое повторное включение (АПВ), дополненное в отличие от традиционного АПВ автоматикой, реализующей оптимальную последовательность порядка включения фаз линии электропередачи после ликвидации аварии в сети.

Для распределительных электрических сетей 6–35 кВ, а также питающих сетей напряжением 110–220 кВ используются преимущественно вентильные разрядники, установленные на подходах к подстанциям и у силовых трансформаторов.

В сетях высокого напряжения совместное использование разрядников и предвключаемых сопротивлений позволило удовлетворительно решить задачу ограничения коммутационных перенапряжений [5, 7]. Внедрение ОПН с улучшенными характеристиками по сравнению с разрядниками позволяет значительно повысить эффективность уже имеющихся систем ограничения перенапряжений, т. е. увеличить надежность системы электроснабжения потребителей, повысить ресурс предвключаемых и шунтирующих сопротивлений выключателя.

Дополнительное снижение уровней перенапряжений в электрических сетях достигается за счет модернизации автоматики ликвидации коротких замыканий. Как известно, АПВ предполагает отключение релейной защитой аварийной линии электропередачи, выдержку в таком состоянии схемы в течение времени, достаточном для самоликвидации дуги переменного тока, возникающей между поврежденной фазой или фазами и землей, и последующее включение линии. Сигнал на включение фаз линии подается одновременно на все выключатели. При этом возникают существенные кратности перенапряжения, представляющие опасность для линейной и подстанционной изоляции и приводящие к быстрому расходованию ресурса разрядников и ОПН. Модернизация АПВ предполагает формирование определенного порядка чередования включения фаз, при котором возникают перенапряжения с минимальной кратностью.

Наиболее простым для технической реализации представляется «программированное включение» электропередачи при двухстороннем ее питании от систем различной мощности. К минимальным перенапряжениям приведет включение линии в первую очередь со стороны системы большей мощности, т. е. характеризующейся меньшей величиной эквивалентного реактивного сопротивления. Сигнал на подключение второго конца линии выдается с задержкой времени, достаточной для затухания переходного процесса, вызванного первой коммутацией [5, 7, 9].

Дальнейшее совершенствование «программированного включения» электропередачи заключается во введении задержки включения каждой фазы по отношению к включению предыдущей фазы на время, достаточное для затухания переходного процесса. Каждое включение фазы происходит в практически установившемся режиме, что существенно снижает уровни коммутационных перенапряжений. Отметим, что «программированное включение» применимо и к плановой коммутации включения линии электропередачи.

Дополнительные возможности ограничения перенапряжений открываются и при однофазном автоматическом повторном включении (ОАПВ). ОАПВ позволяет расширить возможности управления коммутацией в области выбора момента включения выключателя, отвечающего минимуму биений напряжения в бестоковой паузе на его контактах [5].

Таким образом, современные системы ограничения перенапряжений, основанные на совместном использовании как аппаратных средств, так и средств противоаварийной автоматики, позволяют эффективно ограничить коммутационные перенапряжения до допустимых уровней.

Феррорезонансные явления представляются наиболее опасными для сельских электрических сетей 6–35 кВ, поскольку они сопряжены, как правило, с высокими значениями токов, длительно существующих в этих режимах и разрушающих электрическую изоляцию аппаратов в результате термического воздействия.

Меры ограничения коммутационных перенапряжений, принятые в сетях этого класса напряжений, не могут предотвратить феррорезонанс, поэтому необходимы специальные меры борьбы с ним. В настоящее время вся защита от подобных перенапряжений сводится к перечню схемных мероприятий, позволяющих исключить возможность появления в процессе оперативного переключения электрических схем, предрасположенных к развитию феррорезонансных явлений. Но подобное мероприятие не может исключить ошибки персонала или аварийные ситуации, приводящие к опасным схемам.

Более надежным средством подавления феррорезонанса является оснащение трансформаторов напряжения активными сопротивлениями, включенными во вторичные обмотки. Величина активного сопротивления лежит в пределах от 25 до 6,25 Ом.

Но необходимость выполнения переключений во время процесса на вторичной обмотке для изменения величины этого сопротивления является существенным недостатком данного способа.

Установка дополнительного сопротивления в первичную обмотку трансформатора напряжения номиналом от 2000 до 8000 Ом представляется слишком дорогостоящим мероприятием.

В связи с отсутствием в настоящее время надежных средств ограничения феррорезонансных перенапряжений проблема их разработки приобретает несомненную актуальность.

Физическая картина развития феррорезонансных явлений в сетях с электромагнитным трансформатором напряжения достаточно подробно изложена в научной литературе [5, 9, 10]. Основные ее положения сводятся к следующему.

Возможны два механизма возбуждения феррорезонансных колебаний.

К первому типу относится случай самовозбуждения колебаний токов и напряжений в электрической сети, содержащей параллельно или последовательно включенные между собой емкость шин или линии [2] и нелинейную индуктивность трансформатора. Эти элементы образуют колебательный контур, настроенный на некоторый ряд частот, поскольку индуктивность изменяется по величине в зависимости от напряжения и тока. Процесс возникновения колебаний некоторой частоты можно объяснить с помощью сведения нелинейной индуктивности к линейному элементу с переменными параметрами. Величина индуктивности изменяется с частотой в два раза большей, чем частота приложенного напряжения. Следовательно, при возникновении колебаний напряжения даже небольшой амплитуды с частотой $n\omega$ и изменении параметров с частотой $2n\omega$ в электрической сети могут сложиться условия для длительного существования $n\omega$ -гармонической составляющей тока и напряжения.

Качественно условия существования n -ой гармоники выглядят следующим образом:

- осуществлено глубокое насыщение трансформатора;
- настройка в резонанс линейной части схемы на частоту меньше $n\omega$, для чего входное сопротивление схемы должно иметь емкостной характер;
- схема должна иметь малые потери.

Ко второму типу механизма развития феррорезонансных колебаний относится появление его как результат переходного процесса, связанного с какой-либо коммутацией, например, возникновение и исчезновение замыкания фазы линии на землю. При коммутации в сети перенапряжения достигают существенных величин, что приводит к дополнительному насыщению магнитной системы трансформатора и, следовательно, возникновению предпосылок к настройке колебательного контура на одну из частот изменения индуктивности трансформатора. При выполнении условий существования n -ой гармоники в электрической цепи могут возникать и длительно существовать высшие четные и нечетные гармоники, а также некоторые субгармоники.

Были проведены исследования феррорезонансных явлений применительно к обоим типам их развития в сельских электрических сетях 10–35 кВ [6]. Аналитический расчет переходного процесса в трехфазных нелинейных схемах является весьма сложной задачей, поэтому вычислительные эксперименты проводились с использованием программного комплекса «Micro-CAP-3» (Spectrum Software, Великобритания).

Рассмотрим режим возникновения замыкания на землю с последующим его исчезновением в сети 10 кВ. Схема замещения электрической сети приведена на рисунке. Сопротивление R_2 (2840 Ом) и LN моделируют нелинейный трансформатор напряжения, характеристика намагничивания которого приведена в литературе [4]. Емкость

оборудования подстанции и отходящих линий электропередачи учтена в схеме параметром C , величина которого изменялась в широких пределах: от 100 пФ (емкость между витками первичной обмотки трансформатора) до 10 мкФ. Величина сопротивления R составляет порядка 1 Ом.

Предполагается возникновение и ликвидация замыкания на землю в одной из фаз. Переменными параметрами являются время погасания дуги T_d и емкость C .

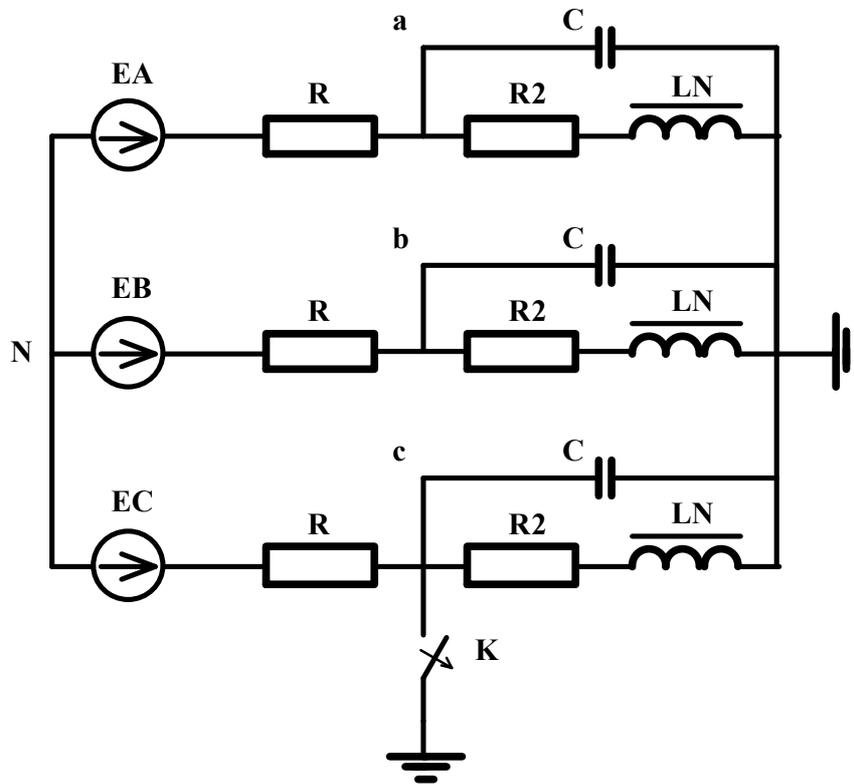


Схема замещения электрической сети для моделирования феррорезонансных явлений

Установлено, что условие развития феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью предполагает наличие на одну фазу трансформатора напряжения емкости подстанционного оборудования до 80 нФ [6].

На основании проведенных исследований условий возникновения феррорезонанса и оценки величин перенапряжений и токов, сопровождающих это явление, можно предложить несколько вариантов системы защиты электротехнического оборудования. Установленные на фазах линии вентильные разрядники не могут быть использованы для этих целей, поскольку затруднена координация их характеристик с уровнями феррорезонансных напряжений.

В качестве основного элемента защитной системы может быть предложен нелинейный ограничитель перенапряжений со стандартными параметрами ОПН-10.

Расчеты перенапряжений были проведены применительно к схеме с одним трансформатором напряжения и емкостью $C = 50$ нФ.

Первый вариант системы ограничения перенапряжения основан на замене вентильных разрядников на ОПН, установленных на шинах подстанции. Подобная система позволяет за весьма непродолжительный промежуток времени (5–6 периодов промышленной частоты) полностью подавить перенапряжения на нейтрали силового транс-

форматора и свободную составляющую фазных напряжений. Таким образом, ОПН, установленные на шинах подстанции, позволяют эффективно защитить трансформаторы напряжения и остальное оборудование сети от феррорезонансных перенапряжений.

Второй вариант системы защиты предполагает заземление нейтрали электрической сети через ОПН стандартной конструкции. Как следует из результатов расчета, напряжение на нейтрали сети несколько снижается по сравнению с напряжением в сети без ОПН, а на фазах – приближается к симметричному режиму. Однако действие ОПН нельзя признать удовлетворительным, т. е. такая система защиты не обладает достаточной эффективностью и требует дальнейшего совершенствования путем использования в нейтрали ОПН с глубоким уровнем ограничения перенапряжений. В этом случае необходимо решать вопрос о возможности работы ОПН в режиме металлического замыкания в сети на землю. Известно, что в этом режиме напряжение смещения нейтрали сети достигает фазного, от которого и должен быть отстроен ОПН с глубоким уровнем ограничения перенапряжений. Если не принимать мер по экстренному отключению поврежденной линии, то ОПН быстро израсходует свой ресурс и выйдет из строя.

Третий вариант системы ограничения перенапряжений предполагает установку ОПН в разомкнутый треугольник вторичной обмотки трансформатора напряжения. По эффективности эта мера подобна варианту с ОПН на шинах подстанции, но имеет ряд преимуществ:

- позволяет снизить количество ОПН с трех на каждой секции шин, имеющих трансформатор напряжения, до одного аппарата, установленного в треугольник трансформатора напряжения;

- позволяет получить существенную экономию за счет более дешевого ОПН, выполненного на низкий класс напряжения.

В нормальном режиме работы сети ОПН имеет высокое сопротивление, разрывающее вторичную обмотку трансформатора напряжения. В случае возникновения феррорезонансных перенапряжений ОПН за счет своей нелинейной характеристики уменьшает сопротивление, что приводит к ограничению перенапряжений и срыву явления феррорезонанса.

При всех положительных чертах данного способа ограничения перенапряжений следует иметь в виду, что в этом случае, как и при ОПН в нейтрали сети, необходимо координировать параметры нелинейного ограничителя с работой релейной защиты при ликвидации однофазного замыкания на землю, т.е. обеспечить возможность отстройки ОПН от длительного режима замыкания в сети.

Выводы

1. В электрических сетях 10–35 кВ проходящее замыкание фазы на землю может привести к развитию феррорезонансных перенапряжений при величине емкости линии и оборудования на один комплект трансформатора напряжения порядка до 80 нФ и соответствующих условиях погасания дуги переменного тока.

2. Для ограничения феррорезонансных перенапряжений можно предложить один из следующих способов:

- включение ОПН стандартных параметров на шины подстанции вместо разрядников;

- включение ОПН, выполненного на уровень ограничения несколько более низкий, чем фазное напряжение, в нейтраль силового трансформатора;

- включение ОПН во вторичную обмотку трансформатора напряжения.

Окончательный выбор одной из систем защиты может быть проведен после дополнительного исследования условий эксплуатации ОПН в этих схемах и сравнительного технико-экономического анализа вариантов.

Библиографический список

1. Афоничев Д.Н. Особенности автоматизации проектирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, И.А. Кекух // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3 (50). – С. 152–158.
2. Вольнов К.Д. Результаты измерения входной емкости электрооборудования 6-750 кВ / К.Д. Вольнов, А.В. Созинов, Ф.Х. Халилов // Электрические станции. 1982. – № 9. – С. 60–61.
3. Герасименко А.А. Передача и распределение электроэнергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 715 с.
4. Дударев Л.Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции. – 1991. – № 1. – С. 35–36.
5. Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт. – Новосибирск : НГТУ, 2004. – 319 с.
6. Картавец В.В. Разработка системы ограничений феррорезонансных перенапряжений в электрических сетях / В.В. Картавец, В.Б. Фурсов, Е.С. Цеджинов // Электромеханические устройства и системы : межвузовский сб. науч. тр. – Воронеж : ВГТУ, 1996. – С. 98–103.
7. Координация изоляции и перенапряжений в электрических высоковольтных сетях / В.И. Гуль, В.И. Нижевский, И.В. Хоменко, С.Ю. Шевченко, В.А. Чевычелов. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 270 с.
8. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – Москва : БИБИКОМ: ТРАНСЛОГ, 2015. – 657 с.
9. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 191 с.
10. Тиходеев Н.Н. Изоляция электрических сетей / Н.Н. Тиходеев, С.С. Шур. – Ленинград : Энергия, Ленинградское отделение, 1979. – 302 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Владимирович Картавец – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 08.02.2019

Дата принятия к печати 26.02.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir V. Kartavtsev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Dmitriy N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Received February 08, 2019

Accepted February 26, 2019