

В роботі представлені результати досліджень електромагнітних перехідних процесів та ефективності застосовуваних засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при однофазних замиканнях на землю в електричних мережах 6-10 кВ з різними режимами нейтралі

Ключові слова: електромагнітні перехідні процеси, однофазне замикання на землю

В работе представлены результаты исследований электромагнитных переходных процессов и эффективности применяемых средств ограничения емкостных токов и перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-10 кВ с различными режимами нейтрали

Ключевые слова: электромагнитные переходные процессы, однофазное замыкание на землю

The paper presents the results of studies of electromagnetic transients in power networks 6-10 kV with different modes of neutral and means of limiting the effectiveness of capacitive currents and surge in single-phase ground faults

Key words: electromagnetic transients, single phase to ground fault

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ С ОПН

Ю. Н. Веприк

Доктор технических наук, профессор
Кафедра "Передача электрической энергии"
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002
Контактный тел.: (057) 707-62-46

С. Н. Леbedка

Ассистент
Кафедра электроэнергетики
Сумский государственный университет
ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, 40007
Контактный тел.: (0542) 33-12-67
E-mail: lebedka_serg@ukr.net

Постановка проблемы

В условиях эксплуатации электрические сети подвержены целому ряду возмущающих воздействий, в числе которых значительную долю составляют внешние и внутренние перенапряжения. Перенапряжения, воздействующие на изоляцию, могут превышать допустимые значения и быть причиной повреждений оборудования. Для повышения надежности работы изоляции сетей, ослабленной по разным причинам (старение и др.) в процессе многолетней эксплуатации, предусматривается использование дополнительных средств ограничения перенапряжений (установка ОПН, демпфирующих РС – цепочек, резисторов в нейтрали и др.). Положительный эффект от применения ОПН может быть получен только при выполнении целого ряда условий: защитные характеристики ОПН должны быть скоординированы с уровнем изоляции защищаемого объекта (трансформатора, двигателя, кабеля, КРУ); допустимые напряжения частотой 50 Гц для ОПН по величине и длительности должны соответствовать возможным повышениям напряжения в сети; пропускная способность ОПН должна соответствовать всем возможным в сети токовым воздействиям с учетом их длительности.

Перенапряжения могут возникать как в стационарных режимах (неблагоприятные сочетания ЭДС генераторов, параметров сети, изменения нагрузки, действие АРВ, несимметрия, резонанс и др.), так и в переходных процессах (симметричные и несимметричные коммутации, грозовые разряды, АПВ, ОАПВ

и др.). Поэтому диапазон изменения количественных характеристик перенапряжений (длительность, кратность, повторяемость и др.) достаточно широк. В этих условиях оптимальный выбор параметров и мест установки ОПН могут быть сделаны только с помощью расчетов перенапряжений и токовых воздействий на ОПН с учетом конкретных условий эксплуатации и при наличии возможно более полных и точных математических моделей электрических сетей.

Анализ публикаций

Опыт эксплуатации распределительных электрических сетей 6-10 кВ, работающих с разными режимами нейтрали, показывает, что причиной выхода из строя электрооборудования во многих случаях являются перенапряжения [33], и основным средством защиты от них в настоящее время становятся ОПН. С переходом к рыночным отношениям в Украине появились ОПН различных производителей, и это, с одной стороны, факт положительный, но, с другой стороны предлагаемые образцы характеризуются широким набором параметров, что дополнительно усложняет их выбор. А при неправильном выборе при воздействиях многократно повторяющихся импульсов тока ОПН также выходят из строя и сами могут явиться причиной снижения надежности электроснабжения.

Для выбора ОПН нужно в качестве исходных данных иметь такие величины, как максимальное напряжение переходных процессов при коммутациях в сети,

токи однофазных замыканий на землю, количество, амплитуда и длительность импульсов тока, коммутируемых в условиях реальной эксплуатации.

Для оценки максимальных напряжений переходного процесса при коммутациях [1,2] пользуются выражениями следующего вида:

$$U_{\max} = K_{\text{уд}} \cdot U_{\text{уст}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{уст}} \cdot U_{\Phi} = K_{\Pi} \cdot U_{\Phi}, \quad (1)$$

где $K_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент (отношение максимального напряжения переходного процесса к вынужденной составляющей), $K_{\text{уст}}$ – отношение вынужденной составляющей перенапряжения (установившегося режима) к рабочему напряжению. Коэффициентом

$$K_{\Pi} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{уст}} \quad (2)$$

определяется кратность коммутационных (внутренних) перенапряжений.

Энергию W , которая выделяется в ОПН при коммутационных перенапряжениях, рекомендуется приближенно определить по формуле

$$W = 0.5 \left[(3U_{\max})^2 - 2U_{\text{ном}}^2 \right], \quad (3)$$

или

$$W = I_0 K_{\max}^2 U_{\text{НР}}^2 / (3\sqrt{3}\omega U_{\text{Н}}), \quad (4)$$

где C – емкость сети, U_0 – амплитуда наибольшего рабочего фазного напряжения, $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ОПН, 3 – расчетная кратность коммутационных напряжений, I_0 – полный ток однофазного замыкания на землю при номинальном напряжении сети $U_{\text{Н}}$ без устройств компенсации нейтрали, K_{\max} – максимальная кратность внутренних перенапряжений (при отсутствии специальных исследований следует принимать $K_{\max}=5$), $\omega=314$ – угловая частота. При подстановке в (4) I_0 в амперах, $U_{\text{Н}}$, $U_{\text{НР}}$ в кВ (действ) значение W получается в кДж.

Для оценки срока службы ресурс, израсходованный ОПН, определяется количеством коммутируемых импульсов тока

$$T_{\text{изр}} = \sum_{k=1}^r n_k (I_k \tau_k^m)^{\gamma}, \quad (5)$$

где n_k , I_k , τ_k – амплитуда и длительность импульсов тока, коммутируемых в условиях реальной эксплуатации.

Величины максимальных напряжений переходного процесса при коммутациях в (1), (3) и ударного коэффициента в (2) зависят от ряда факторов: частоты и декремента затухания свободных колебаний, начальных и граничных условий, характеристик выключателей, выполняющих коммутации.

Ток замыкания на землю в (4) из-за отсутствия точных данных определяется по удельным усредненным значениям удельных величин А/км тока замыкания на землю в кабельных и воздушных линиях.

Что же касается n_k , I_k , τ_k в (5), то каких-либо данных о них в настоящее время нет и при их отсутствии в публикациях по ОПН как средствах защиты от комму-

тационных перенапряжений речь идет лишь об оценке срока их службы [33], о "существовании различных точек зрения" и о необходимости "выработки единой общей концепции" [34].

Выражения вида (1) – (5) при применении к реальным схемам можно рассматривать как оценочные, так как они получены на основе аналитических решений, для простых типовых схем (как правило, однофазных) и для конкретных видов коммутаций (включение, отключение фазы линии, отключение КЗ, отключение ненагруженного трансформатора и т. д.). При переходе к реальным системам к перечисленным факторам добавляется еще ряд факторов, не учитываемых в (1) – (5) и усложняющих задачу: более сложные схемы, наличие трех фаз, связанных взаимным влиянием, несимметрия как параметров элементов, так и параметров режима фаз.

Набор типовых подзадач не отражает взаимное влияние отдельных составляющих, не позволяет охватить всего разнообразия задач.

При переходе к частным, типовым подзадачам за счет пренебрежения этим взаимовлиянием, во-первых, вносится погрешность, при расчетах по усредненным статистическим данным не воспроизводится реальная картина переходного процесса, а, во-вторых, что более существенно отметить, решение частных подзадач по отдельности, изолированно в ряде случаев усложняется (из-за разрыва связей с другими составляющими и необходимости иметь данные о них из других подзадач) или оказывается вообще невозможным с требуемой точностью.

То, что уже в настоящее время имеется ряд вопросов, на которые практика проектирования и эксплуатации еще не имеет ответа, можно рассматривать как следствие такого подхода.

Цель, задачи исследования

В то же время при современном уровне развития средств вычислительной техники широкомасштабные исследования для получения нужных количественных характеристик электромагнитных переходных процессов и перенапряжений в электрических сетях могут быть реализованы с применением методов математического моделирования и компьютеров. Для проведения таких исследований необходимо иметь полные и точные модели, учитывающие все основные, важные для рассматриваемой задачи, свойства и характеристики сетей – их реальные схемы и режимы, способы заземления нейтрали, конфигурацию и состав оборудования, емкостные и индуктивные параметры элементов сети, нелинейные характеристики защитных аппаратов и другие факторы.

Базовая модель [2], основанная на представлении элементов сети трехфазными многополюсниками и уравнениями в фазных координатах, позволяет учитывать реальную конфигурацию сети, параметры элементов сети (активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности и емкости фаз) и параметры ее режима (токи, напряжения, мощности фаз), способ заземления нейтрали и воспроизводить электромагнитные переходные процессы при симметричных и несимметричных повреждениях в

электрических сетях произвольной конфигурации. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов с воспроизведением сопровождающих их перенапряжений в электрической сети с ее применением позволяет получить количественные характеристики переходных процессов, необходимые для выбора ОПН.

Основной текст

Разработанная модель предназначена для моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях, включая и сети 6-10 кВ, уравнениями в фазных координатах. Она позволяет на основе метода фазных координат выполнять расчеты переходных процессов при симметричных и несимметричных коммутациях в электрических сетях произвольной конфигурации и с несимметричными элементами с представлением результатов расчета как в графической (в виде кривых изменения токов и напряжений), так и в численной (в виде массивов) форме, как в точке повреждения, так и в любых других элементах электрической сети (токи в ветвях схемы), напряжения, емкостные и индуктивные токи в узлах.

В распределительных электрических сетях 6-10 кВ емкостные токи и перенапряжения при однофазных замыканиях на землю, количественные характеристики и характер электромагнитных переходных процессов зависят от схемы и режима сети, параметров и суммарной длины линий, от способа заземления нейтрали, от параметров индуктивных (ДГР) или резистивных (R) элементов в нейтрали трансформаторов. Для определения количественных характеристик переходных процессов, влияющих на выбор ОПН в распределительных кабельных электрических сетях, выполнены расчеты электромагнитных процессов с применением разработанных программных средств в схемах, различающихся суммарной длиной кабельных линий (от 20 до 80 км).

Моделирование переходных процессов выполнено путем численного интегрирования систем дифференциальных уравнений неявными методами, составление дифференциальных уравнений реализовано узловым методом, поэтому порядок решаемых систем дифференциальных уравнений равен утроенному количеству трехфазных узлов сети, в процессе численного интегрирования определяются мгновенные значения напряжений и токов (в виде цифрограмм) во всех узлах и ветвях сети, шаг интегрирования $h = 0,05-0,1$ мс. В расчетах варьировались: режим нейтрали (изолированная, заземленная), способ заземления (через реактор, через резистор, смешанное), величины сопротивлений реактора и резистора, сопротивление в точке замыкания, место точки замыкания и ее удаленность от шин источника питания – для исследования влияния этих факторов на токи ОЗЗ, уровни перенапряжений.

Некоторые из полученных цифрограмм для иллюстрации представлены ниже. При отсутствии экспериментальных данных, осциллограмм [1], математическое моделирование является практически единственной реальной возможностью восполнить этот пробел.

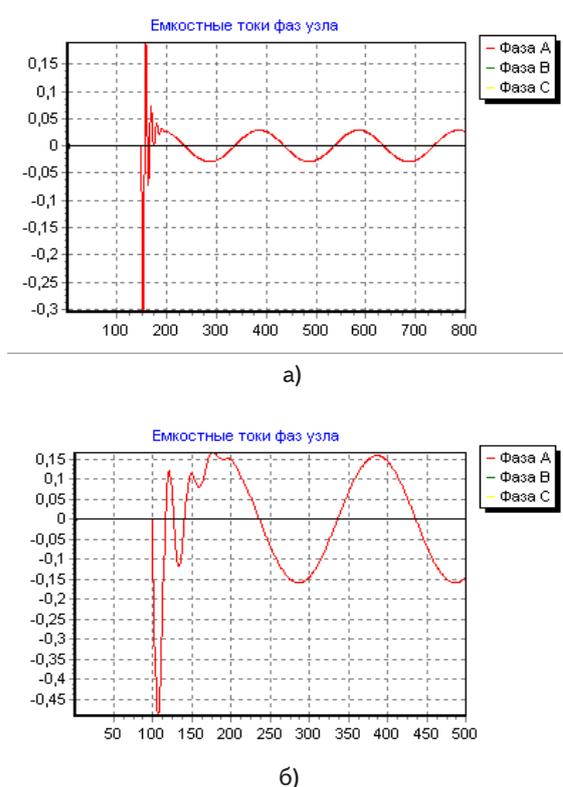


Рис. 1. Токи ОЗЗ в схемах № 1 (а), и № 2 (б)

По оси абсцисс на цифрограммах откладывается номер шага интегрирования h , по оси ординат – токи (кА) и напряжения (кВ). Поврежденной принята фаза А.

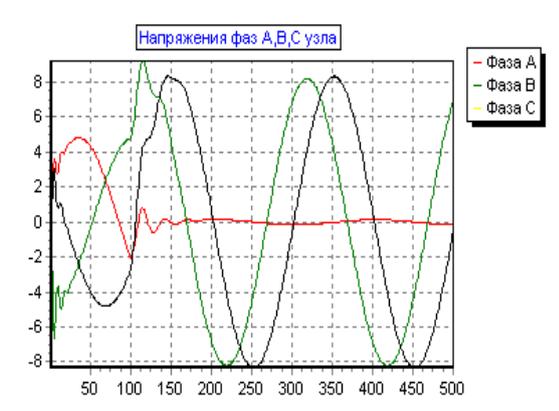
Токи замыканий на землю в установившихся режимах ОЗЗ зависят от протяженности сети и достигают значений: для некомпенсированной сети № 1 (протяженностью 23,1 км) – 25 А, для сети № 2 (длиной 81,5 км) – 160 А. Протяженность сети и начальная фаза замыканий на землю существенно влияют и на величину начальных импульсов тока в момент замыкания: в зависимости от фазы напряжения в момент возникновения однофазного замыкания начальные импульсы тока с увеличением протяженности сети изменяются от 200А до 1100А.

Перенапряжения в сети (рис. 2) при возникновении замыкания при вариациях степени удаленности точек замыкания, начальных моментов коммутаций, и с увеличением суммарной длины кабельных линий (от 23,1 км до 81,5 км) достигают величины порядка 9–11 кВ (до $2,5 U_{\phi}$).

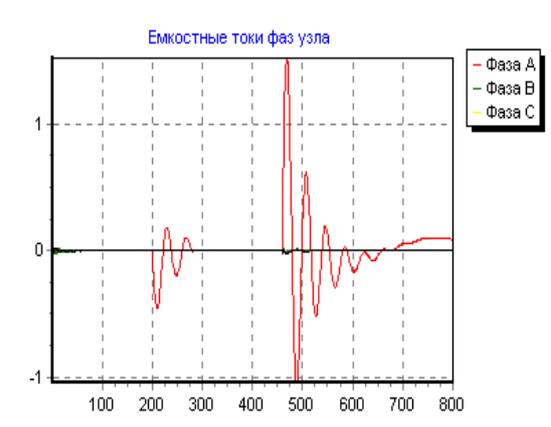
К дополнительному утяжелению условий работы изоляции приводит возникновение перемежающихся дуг, так как при этом в сети с R-, L-, C-элементами на фазное напряжение промышленной частоты накладываются кроме напряжения смещения нейтрали кратковременные составляющие свободных колебаний с частотами выше 50 Гц (рис. 3). При моделировании перемежающихся ОЗЗ в расчетах варьировались сопротивление дуги от 0,01 Ом до 10 Ом, начальная фаза замыканий, сопротивление изоляции, количество по-

вторных зажиганий, промежутки между повторными зажиганиями и длительности замыканий

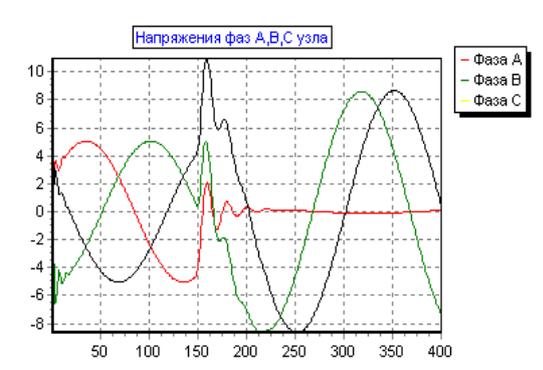
в проводящем состоянии в соответствии с данными об остающихся напряжениях принято равным 10 Ом.



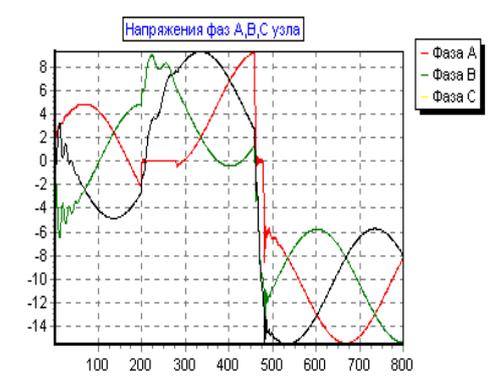
a)



a)



б)



б)

Рис. 2. Перенапряжения на шинах ПС при ОЗЗ в схеме № 1(а) и № 2 (б)

Рис. 3. Повторное гашение дуги. Токи (а) и напряжения фаз (б) в узле ОЗЗ

При повторных зажиганиях дуги перенапряжения с каждым новым замыканием сначала увеличиваются, затем, после 3-4 зажиганий (рис. 3.б) стабилизируются. Импульс тока при изменении удаленности от источника питания изменяется от 1,1 кА до 3,2 кА, напряжение фаз после гашения дуги – от 12,1 кВ до 16 кВ (до 4,6 U_{ϕ}).

Для оценки условий работы ОПН и возможности их применения для ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях выполнены расчетные исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях с ОПН. Моделирование ограничителей перенапряжений на данном этапе выполнено упрощенно. Принято, что в зависимости от мгновенных значений напряжения в точке сети, к которой подключен ОПН, он может находиться в одном из двух состояний – проводящем или непроводящем. Такое моделирование представляется оправданным, так как в высокоомной зоне вольтамперной характеристики ток через ОПН составляет доли миллиампера, а в проводящем состоянии может достигать сотен и тысяч ампер. Сопротивление ОПН

Характер и параметры переходных процессов в соответствии с полученными результатами расчетов иллюстрируют цифrogramмы, представленные на рис 4.

При ограничении перенапряжений величиной 10 кВ импульсы тока через ОПН составляют 1.5 – 3.2 кА при длительности 1.0 – 1.25 мс.

По данным, представляемым производителями ОПН, пропускная способность ограничителей достаточна, чтобы выдерживать импульсы тока на волне 1.2/2.5 мс с амплитудой 300 А и импульсы тока на волне 8/20 мкс с амплитудой 5.0 кА. Импульсы, которыми характеризуется пропускная способность ОПН (испытательные импульсы), имеют определенные количественные характеристики – форму, амплитуду и длительность. Импульсы тока при срабатывании ОПН, устанавливаемых в кабельных сетях для защиты от перенапряжений, получаемые в результате расчетных исследований (расчетные импульсы), имеют другие амплитуды, длительности и форму (рис. 4). Поэтому пропускную способность ОПН следует уточнять с учетом реальных условий их работы в электрических сетях.

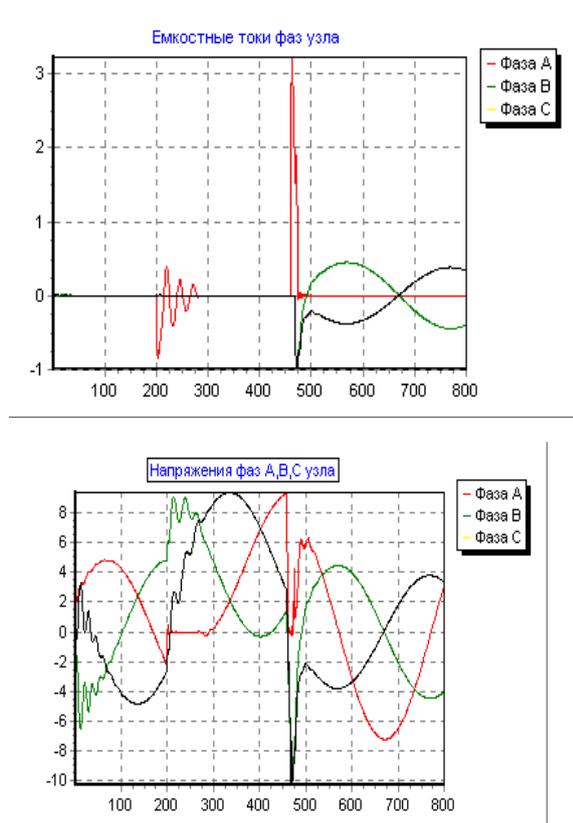


Рис. 4. Переходные процессы с ОПН (сеть № 2)

Выводы

Приведенные результаты расчетов электромагнитных переходных процессов при рассмотренных вариантах коммутаций показывают, что:

- разработанная модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах, основанная на использовании дискретных узловых уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования, позволяет определять количественные характеристики электромагнитных переходных процессов и перенапряжений (кратности, длительности перенапряжений и импульсов тока),
- результаты моделирования отражают реальные условия эксплуатации электрических сетей и могут служить основанием для выбора и проверки эффективности применения средств ограничения перенапряжений.

Литература

1. Миронов И.А. Проблемы выбора режимов заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ / И.А. Миронов // Электро. – 2006. – № 5. – С. 32-36.
2. Веприк Ю.Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией. / Ю.Н. Веприк // Восточно- Европейский журнал передовых технологий. 2010, №2, с.37-42.
3. Виштибеев А.В. О необходимости перевода электрических сетей 6–35 кВ на режим резистивного заземления нейтрали / А.В. Виштибеев // Проблемы энергетики. – 2002. – № 3.
4. Дергилев М.П. Неснижаемые кратности перенапряжений с сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали / М.П. Дергилев, В.К. Обабков // Электротехника – 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: VIII симпозиум, Моск. обл., 24–26 мая 2005 г.: сб. докл. – М.: ВЕИ, 2005. – Доклад 1.14.
5. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество. – 1998. – № 12. – С. 8–22.