

УДК 621.311.014

Ю. Н. ВЕПРИК¹ (канд.техн.наук), С. Н. ЛЕБЕДКА²¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»² Сумский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 КВ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ НЕЙТРАЛИ

В статье приведены результаты математического моделирования однофазных замыканий на землю в кабельных сетях напряжением 6 кВ с различными режимами работы нейтрали. Приведены зависимости параметров сетей от величин активных и реактивных сопротивлений в нейтрали. Рекомендовано внедрение автоматических регуляторов на ДГР и корректировка действующих нормативных материалов по компенсации емкостного тока.

Моделирование, замыкания на землю, дугогасящий реактор, емкостной ток.

Введение. Согласно [1] за последние пятнадцать 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 повреждение начинается с пробоя изоляции на землю, а затем больше половины из них развиваются в междуфазные короткие замыкания или многоместные пробой изоляции с групповым выходом из строя электрооборудования.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–10 кВ составляют не менее 70 % общего числа повреждений и сопровождаются возникновением бросков емкостных токов и перенапряжений. Степень проявления этих эффектов зависит от ряда факторов – режима нейтрали, протяженности и загрузки сети, начальных условий коммутации, удаленности точек замыканий от источника питания и др. Основным же фактором, определяющим опасность возникновения и развития однофазных замыканий в данных сетях, является способ заземления нейтрали.

В Украине сети 6–10 кВ работают либо с изолированной нейтралью, либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе обсуждаются следующие возможные режимы нейтрали:

- изолированная нейтраль;
- компенсированная (заземленная через дугогасящий реактор) нейтраль;
- включение низкоомного или высокоомного резистора в нейтраль [2].

Каждый из возможных вариантов имеет свои как достоинства, так и недостатки. Вопрос о том, какому способу отдать предпочтение, какими соображениями и какими критериями пользоваться при выборе режима нейтрали этих сетей, является предметом активной полемики.

Разработана математическая модель переходных процессов в электрической сети в фазных координатах [3]. Использование модели для исследования переходных процессов в электрических сетях дает возможность определять перенапряжения и величины токов, воздействующих на оборудование сетей, оценивать эффективность применяемых средств защиты.

Моделирование ОЗЗ в сетях 6 кВ с различными режимами нейтрали.

Для подстанций с протяженными кабельными сетями в установившихся режимах ОЗЗ емкостные токи достигают значений 70–100 А, а фазные напряжения – 6,2–6,6 кВ. Еще больших значений эти величины могут достигать в переходных процессах, так как при наличии в цепи замыкания емкостных и индуктивных элементов переходные процессы носят колебательный характер. С использованием разработанных моделей и программных средств выполнены исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6 кВ для определения параметров переходных процессов, основных влияющих факторов и оценки возможности ограничения связанных с ними отрицательных последствий.

В качестве расчетных приняты 4 схемы кабельных сетей г. Сумы, питающиеся от различных подстанций 110/6 кВ, имеющие суммарную протяженность от 10–20 км до 90 км. Так, суммарная протяженность кабельной сети п/ст “Центролит” составляет 23,1 км (расчетная схема 1), п/ст “Чеховская” – 41,3 км (расчетная схема 2), секции шин № 1 п/ст “Кировская” – 60,6 км (расчетная схема 3), секции шин № 2 п/ст “Кировская” – 81,5 км (расчетная схема 4).

В работе [4] представлены результаты моделирования переходных процессов при ОЗЗ в расчетных сетях при работе с изолированной нейтралью.

В настоящее время в соответствии с [5] некомпенсированными (работающими с изолированной нейтралью) сетями могут быть воздушные сети средних напряжений сельских районов, а также сравнительно короткие (до 20–25 км) кабельные сети городов и промышленных предприятий. Главное достоинство таких сетей – поддержание бесперебойной работы потребителей электроэнергии при наличии ОЗЗ.

Проведенные в [4] исследования свидетельствуют о том, что, несмотря на малые токи замыкания на землю, такие сети подвергаются воздействиям перенапряжений и бросков токов при ОЗЗ, особенно – при возникновении перемежающейся дуги. А по данным [6], около 60–80 % всех замыканий на землю в этих сетях носит именно такой характер. Кроме того, перемежающиеся дуги могут возникать в сетях с изолированной нейтралью при любых токах замыкания на землю.

Компенсация емкостных токов замыкания на землю рассматривается как одно из средств уменьшения отрицательных последствий при ОЗЗ в сетях 6–35 кВ [7]. Индуктивность, обеспечивающая компенсацию, включается в нейтраль дополнительного трансформатора. Поэтому для обеспечения возможности исследования сетей с компенсированной нейтралью в числе элементов сети в разработанной математической модели предусмотрен трансформатор со схемой соединения Y/Δ с нейтралью, заземленной через сопротивление Z_n [8]. Моделирование электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в схемах 1–4 с подключенным на шинах питающих подстанций специальным трансформатором с ДГР в нейтрали выполнено также с применением разработанной программы. В каждой из схем кроме основного силового трансформатора имеется дополнительный трансформатор ДГР со схемой соединения обмоток Y/Δ , нейтраль которого может быть изолирована, заземлена через резистор (активное сопротивление) или реактор (реактивное сопротивление).

Для каждой из схем выполнены расчеты режимов при замыкании фазы на землю, в которых варьировались: режим нейтрали (изолированная, заземленная), способ заземления (через реактор, через резистор), величины сопротивлений реактора и резистора для исследования влияния этих факторов на сопротивления нулевой последовательности, токи замыкания на землю, напряжение смещения нейтрали.

Установленные в настоящее время средства компенсации емкостных токов в подавляющем большинстве не являются быстродействующими, поэтому они реагируют на токи и напряжения в установившемся режиме. Ниже рассмотрены параметры установившихся режимов при замыканиях на землю.

Полученные результаты расчетов при включении в нейтраль трансформатора на шинах подстанции 6 кВ ДГР или заземляющего резистора представлены ниже в виде графиков (рис. 1–5).

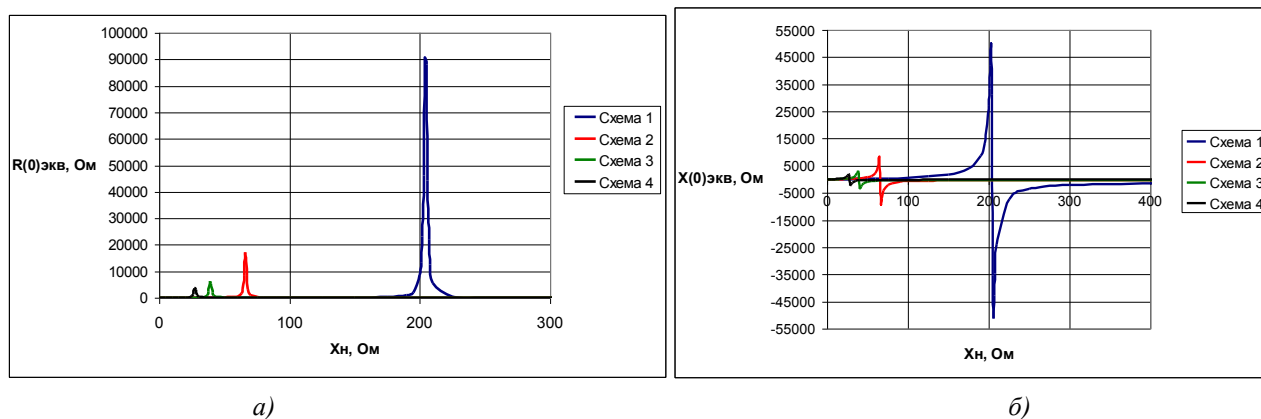


Рисунок 1 – Зависимость активного сопротивления (а) и реактивного сопротивления (б) нулевой последовательности схемы от реактивного сопротивления в нейтрали

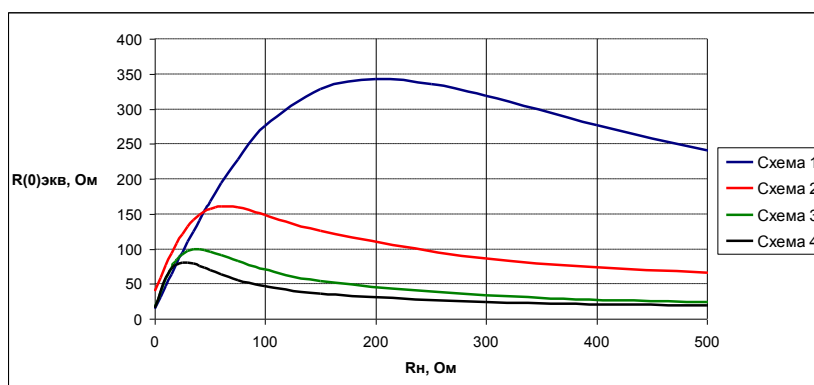


Рисунок 2 – Зависимость активного сопротивления нулевой последовательности схемы от активного сопротивления в нейтрали

Значения сопротивлений реактора или резистора в нейтрали изменялись от нуля до бесконечности, чем охватывается весь возможный диапазон способов заземления нейтрали – глухозаземленная (при $Z_n = 0$), компенсированная (при $I_n = 0$), с низкоомным и высокоомным заземлением (при $R_n = 100-600$ Ом), изолированная (при $Z_n = \infty$). С увеличением сопротивления в нейтрали токи ОЗЗ по модулю снижаются от сотен ампер до единиц и десятков ампер, по фазе изменяются с отстающего до опережающего, напряжение нейтрали увеличивается до фазного.

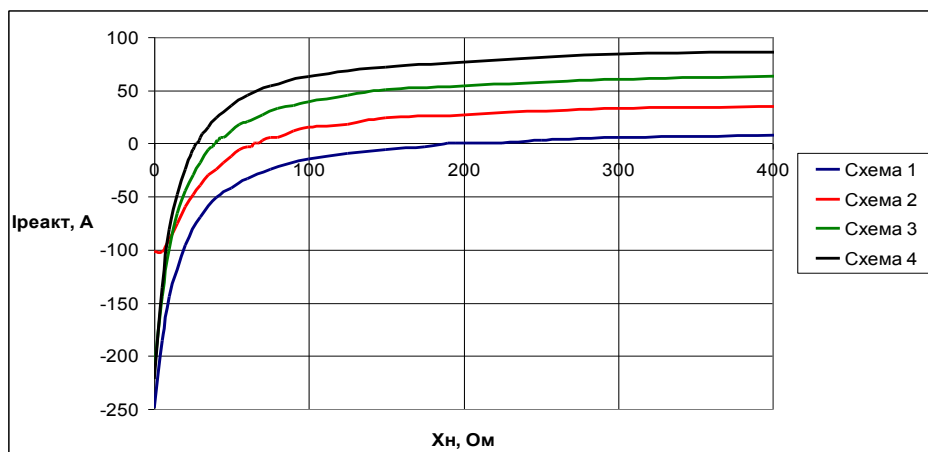


Рисунок 3 – Зависимость реактивной составляющей тока в месте замыкания от реактивного сопротивления в нейтрали

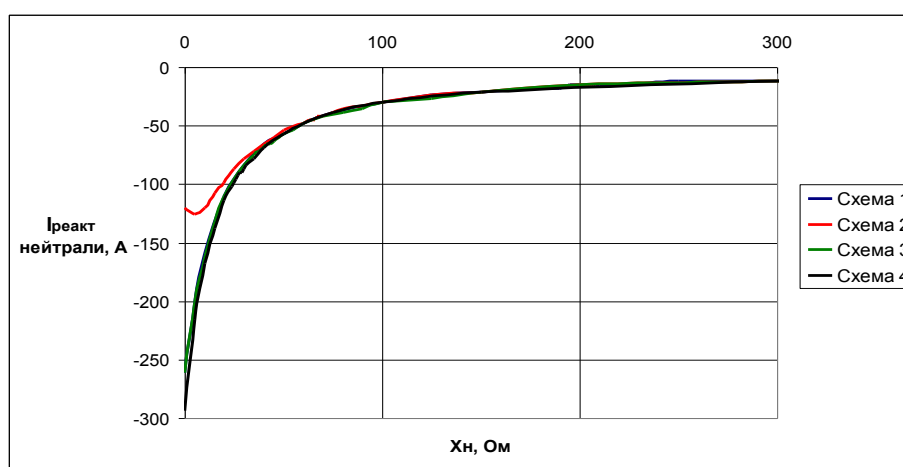


Рисунок 4 – Зависимость реактивной составляющей тока в нейтрали от реактивного сопротивления в нейтрали

Сопоставление результатов, относящихся к разным схемам и режимам заземления нейтрали, приводит к следующим выводам:

- уменьшение величины тока замыкания на землю (компенсация) происходит при изменении индуктивного сопротивления в нейтрали специального трансформатора;
- напряжение смещения нейтрали зависит практически только от модуля полного сопротивления Z_n в нейтрали, суммарная протяженность сети на него влияет незначительно;
- в сетях с резонансным заземлением нейтрали наблюдается различие токов в месте замыкания на землю и в месте установки ДГР (в нейтрали сети);
- в сетях с низкоомным заземлением нейтрали (сопротивление резистора, реактора до 100–200 Ом) ток ОЗЗ имеет индуктивный характер, в сетях с высокоомным заземлением (сопротивление резистора, реактора выше 100–200 Ом) ток ОЗЗ имеет емкостный характер;
- зависимость тока ОЗЗ от сопротивления (реактора, резистора) нелинейная, крутая при индуктивных токах и пологая – при емкостных токах.

При заземлении нейтрали через реактор зависимость тока ОЗЗ от сопротивления в нейтрали X_n в окрестностях точки $I_n = 0$ (режима с компенсацией тока ОЗЗ) для 1-й и 2-й схем (с наиболее характерной длиной 20–40 км) очень пологая (малым изменениям тока должен соответствовать значительный диапазон изменения X_n), что снижает эффективность применяемых сейчас ступенчато регулируемых и повышает требования к плавно регулируемым ДГР.

При заземлении нейтрали через реактор полная компенсация тока ОЗЗ ($I_n = 0$) достигается при значениях сопротивления $X_n = 100$ –600 Ом и в более крутой части характеристики, что также повышает требования к точности и скорости работы ДГР.

Результаты моделирования показали, что установившиеся токи ОЗЗ в сетях с глухим и низкоомным заземлением нейтрали зависят от удаленности точки замыкания от источника, в сетях с высокоомным заземлением и изолированной нейтралью – от протяженности сети, причем при наличии реактора в нейтрали они меньше. В исследованных схемах наблюдается резонанс активного и реактивного сопротивлений сети и сопротивления, включенного в нейтраль.

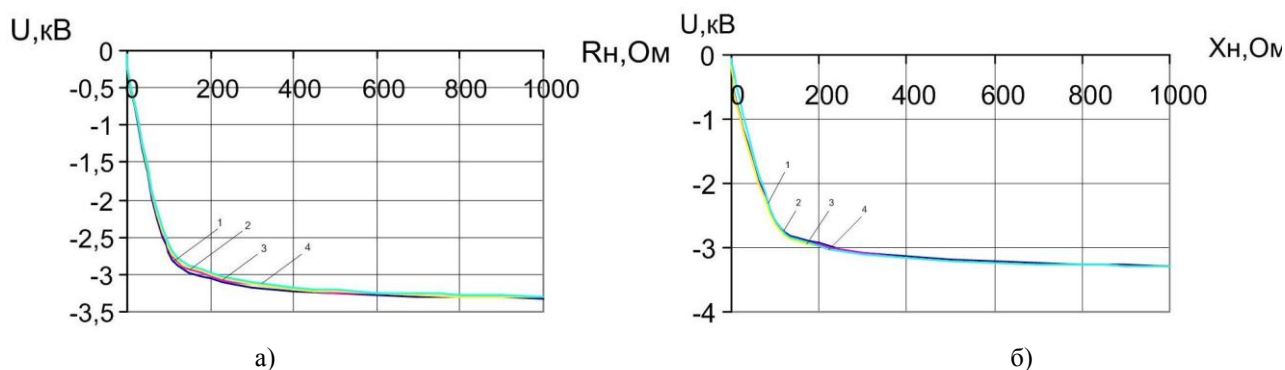


Рисунок 5– Зависимость напряжения смещения нейтрали от активного (а) и реактивного (б) сопротивления в нейтрали

Выводы. В работе приведены результаты математического моделирования однофазных замыканий на землю в кабельных сетях напряжением 6 кВ с различными режимами работы нейтрали.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения ДГР как средства ограничения токов ОЗЗ. Однако для эффективной компенсации емкостных токов ДГР должен иметь возможность плавно и достаточно быстро автоматически регулировать величину своего индуктивного сопротивления. Применяемые сейчас ДГР в большинстве регулируются ступенчато и вручную. Поэтому необходимо внедрение автоматических регуляторов на ДГР и корректировка действующих нормативных материалов по компенсации емкостного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусяненко А.Г. Пути повышения надежности работы городских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ / Мусяненко А.Г., Сивокобыленко В.Ф., Дергилов М.П. // Электрические сети и системы. – 2003. – № 3. – С. 18–26.
2. Веприк Ю.Н. Перенапряжения в электрических сетях 6–35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю / Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Петровский М.В. // Вісник Сумського державного університету. Сер. “Технічні науки”. – 2008. – № 4. – С. 59–69.
3. Веприк Ю.Н. Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах / Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Веприк В.Ю. // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 74–77.
4. Веприк Ю.Н. Исследование электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6 кВ при однофазных замыканиях на землю / Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Веприк В.Ю. // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 9. – С. 27–32.
5. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
6. Виштибеев А.В. О необходимости перевода электрических сетей 6–35 кВ на режим резистивного заземления нейтрали / Виштибеев А.В. // Проблемы энергетики. – 2002. – № 3.
7. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ. – К.: НИИ Энергетики, 1998. – 64 с.
8. Лебедка С.Н. Дискретные модели элементов электрической сети, полученные с использованием формулы второго порядка неявного метода Гира / Лебедка С.Н., Веприк Ю.Н. // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 22. – С. 21–26.

Надійшла до редколегії 22.03.2011

Рецензент: В.Ф.Сивокобыленко

Ю.М. ВЕПРИК¹, С.М. ЛЕБЕДКА²

¹ Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»

² Сумський державний університет

J. WEPRIK¹, S. LEBEDKA²

¹ National Technical University

"Kharkiv Polytechnic Institute"

² Sumy State University

Математичне моделювання замикань на землю в мережах 6 кВ з різними режимами нейтралі У статті наведені результати математичного моделювання однофазних замикань на землю в кабельних мережах напругою 6 кВ з різними режимами роботи нейтралі. Наведено залежності параметрів мереж від величин активних і реактивних опорів у нейтралі. Рекомендовано впровадження автоматичних регуляторів на ДГР і коригування діючих нормативних матеріалів з компенсації ємнісного струму.
Моделювання, замикання на землю, дугогасильний реактор, ємнісний струм.

Mathematical Modeling of Earth Faults in Networks of 6 Kv with Different Modes of Neutral. The results of mathematical modeling of single-phase earth fault in the cable networks of 6 kV with different modes of the neutral. Shows the dependence of the parameters of networks on the values of active and reactive resistances in neutral. Recommended the introduction of automatic controls on the arcing reactor and the adjustment of existing regulatory material for compensation of capacitive current.
Modeling, ground fault, arcing reactor, capacitive current.