

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПО ДЛИНЕ НЕОДНОРОДНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

А.В. Коржов¹, О.В. Волков², Ю.В. Коровин¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ПО «Центральные электрические сети» ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго», г. Челябинск, Россия

Перенапряжения в кабельных линиях 6 (10) кВ являются одним из наиболее существенных факторов, влияющих на показатели надёжности городских сетей. В работе представлены результаты исследований распределения величин максимальных перенапряжений по длине типового участка городской распределительной кабельной сети 10 кВ при однофазном замыкании на землю и методика минимизации этих перенапряжений.

Исследования проведены с применением виртуального моделирования в программном комплексе ATPDraw. Основу ATP-модели кабельной сети составили элементы с распределёнными реактивными и активными параметрами. Установлено, что величины перенапряжений вдоль кабельных линий значимо изменяются в зависимости от конфигурации и принятых проектных решений по применяемым типам и сечениям кабелей. В случае тупиковых линий максимальные перенапряжения наблюдаются в самом конце кабельной линии, при этом имеет место как монотонное увеличение перенапряжений вдоль кабельной линии от её начала к концу, так и появление локальных максимумов. В случаях, когда рассматриваемая линия не являлась тупиковой, максимальные перенапряжения наблюдались ближе к её концу, но не в самом конце. Также определено, что величина максимального перенапряжения в кабельной сети меняется при изменении сечения её линий.

Практическим результатом исследований явились изложенная в работе методика и результаты поиска оптимального варианта развития кабельной сети по критерию минимума кратности вероятных перенапряжений. Результаты для наглядности предложено представлять в виде диаграмм, отображающих изменения максимальных величин перенапряжения вдоль кабельных линий. Построение данных диаграмм на этапе проектирования, эксплуатации и модернизации сети позволяет прогнозировать наиболее уязвимые точки в кабельных линиях с риском пробоя изоляции при перенапряжениях. Показано, что разница в перенапряжениях между наилучшим и наихудшим вариантами сети может составлять более 12 %.

Ключевые слова: кабельные линии, перенапряжения, изоляция, развитие распределительной электрической сети, надёжность.

Введение

В настоящее время в структуре городских распределительных кабельных сетей 6 (10) кВ наблюдается некая хаотичность. Как правило, данная кабельная сеть очень неоднородна по своей структуре. Эксплуатируются силовые кабели как с бумажной пропитанной изоляцией, так и кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, постепенно вводимые в эксплуатацию. При этом кабели имеют разный срок наработки и различное состояние изоляции. Отдельные участки кабельной сети могут состоять из кабелей разных сечений, а также применяются разные типы концевых и соединительных муфт. Данный факт влияет на появляющиеся различия в величинах волновых параметров как отдельных участков кабельной сети, так и самих кабелей разного типа, что сказывается на величинах возникающих перенапряжений [1]. В условиях развития городской сети также невозможно одновременно провести существенную модернизацию, что накладывает отпечаток на показатели

надёжности её работы, а также процесс старения изоляции от различных проектных и эксплуатационных факторов [2, 3], одним из которых являются перенапряжения, возникающие в результате переходного электромагнитного процесса при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ). Это повреждение является наиболее часто встречающимся в распределительных сетях 6 (10) кВ. Впоследствии в трёхжильных кабельных линиях (КЛ) ОЗЗ может перейти в двухфазное или двойное короткое замыкание. Следует отметить, что среди списка требований по выбору сечений новых КЛ, приведённых в [4], нет ни одного, учитывающего опасность появления при ОЗЗ недопустимых перенапряжений, возникающих вследствие ошибочного сочетания кабелей с различным волновым сопротивлением. В работе [5] отмечено, что поскольку измерения и исследования напряжения происходят, как правило, в концевых точках, то возможность появления наибольшего значения перенапряжения на других участках линии мало исследована. В связи с этим

остро встаёт вопрос о количественном анализе возникающих в сетях перенапряжений: их кратности, длительности и координатах их максимальных значений.

Целью данной работы стала разработка методики исследования возможности появления наибольших значений перенапряжений по длине кабельной сети с задачей поиска оптимального варианта развития сети по критерию минимума кратности перенапряжений.

1. Методика исследования

Методика исследования включала следующие пункты.

1. В качестве объекта исследования был рассмотрен характерный участок схемы городской кабельной сети 10 кВ, приведённый на рис. 1.

2. Математическое описание переходных процессов в сети, содержащей элементы с распределёнными параметрами, сводится к системе дифференциальных уравнений, базирующихся на телеграфных уравнениях длинных линий. Составление и решение этих уравнений для достаточно разветвлённой сети является весьма трудоёмкой задачей. Наиболее просто она может быть решена с применением современных программных средств [6], имеющих графический интерфейс элементов электрической цепи, находят применение расчёты с использованием нейронной сети [7].

Для решения поставленной задачи была разработана модель сети, реализованная в программном комплексе *ATPDraw*, широко используемом для виртуального моделирования электромагнитных процессов в электрических цепях [6]. Модель состояла из трёхфазного источника напряжения *AC-3ph. Type 14*, элементов *LINEZT_1*, моделирующих фазы участка воздушной и кабельных линий, а также трёхфазного трансформатора, выполненного по Г-образной схеме замещения. Активное сопротивление трансформатора представлено элементом *Resistor*, индуктивное сопротивление – элементом *IND_RP*, шунт проводимости – элементом *IND_RP*, входная ёмкость трансформатора – элементом *CAP_RS*, а коэффициент трансформации устанавливался с помощью элемента *TRAF0_13*. Параметры всех задаваемых элементов сети взяты из [8]. Волновая скорость и сопротивления, необходимые для моделирования, рассчитывались через удельные ёмкости и индуктивности, соответствующие значения которых для каждого из рассматриваемых сечений кабеля были взяты из [9]. К трансформаторным подстанциям под номерами 3, 4, 5, 7 и 8 была подключена нагрузка, каждая из фаз которой представлялась последовательно соединёнными активным сопротивлением и индуктивностью. Важность учёта нагрузки и её влияние на возникающие переходные процессы были показаны в [10].

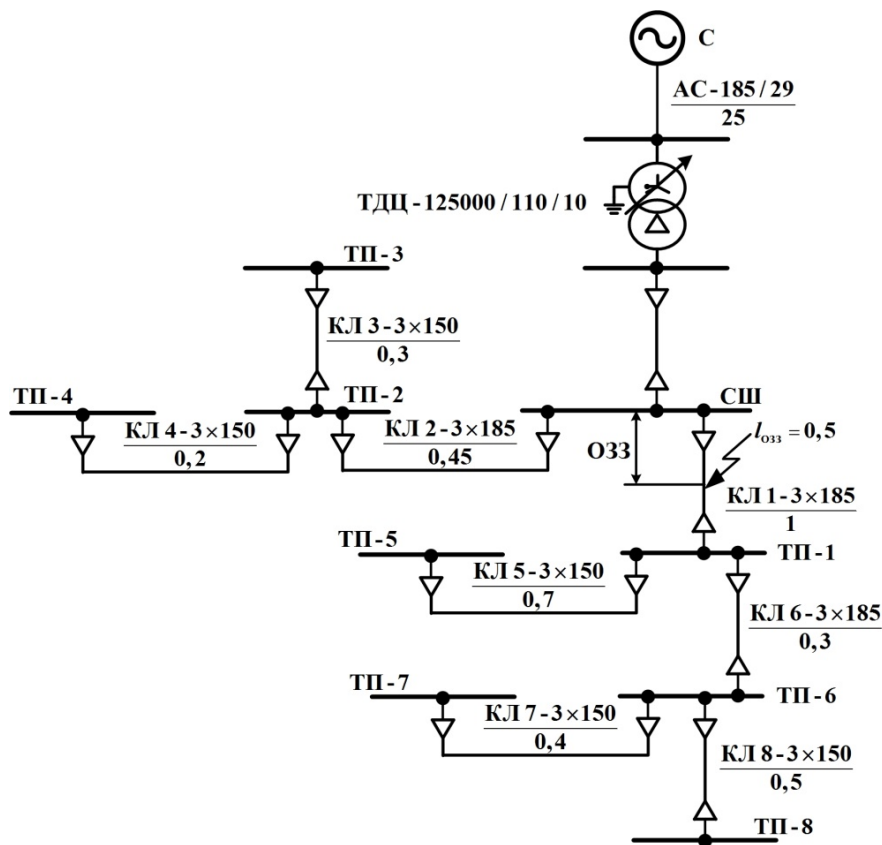


Рис. 1. Пример участка схемы электрической сети

Данные о составе кабельной сети

Вариант	Сечение линии, мм ²							
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈
1	185	185	150	150	150	185	150	150
2	185	185	150	150	150	120	150	150
3	185	185	150	150	150	120	120	150

Моделирование ОЗЗ осуществлялось с помощью элемента *Switch time controlled*, замыкающего фазу А кабеля № 1 на землю. Замыкание произошло в момент времени $t_{\text{озз}} = 0,01$ с в точке на заданном удалении от сборных шин питающей подстанции 110/10 кВ, когда напряжение на этой фазе достигало по модулю своего максимального значения.

Для измерения распределения перенапряжения по длине, КЛ были разбиты на небольшие участки одинаковой длины, на концах которых были установлены вольтметры.

3. В процессе моделирования были приняты следующие допущения:

а) поскольку дуговое замыкание носит случайный характер и зависит от многих факторов, то при моделировании сопротивления дуги её длина считалась неизменной;

б) загорание дуги происходило при максимальном напряжении, прикладываемом к фазе А, а погасала она в первый момент прохождения протекающего по ней тока через ноль;

в) не проводилась проверка кабелей на длительно допустимые токи и по допустимому падению напряжения.

4. На первом этапе исследования был рассмотрен вопрос распределения величин максимальных перенапряжений вдоль КЛ для трёх вариантов схем, различающихся сечением отдельных кабелей (табл. 1).

5. На втором этапе исследований был рассмотрен поиск наилучшего и наихудшего вариантов выполнения сети исходя из вероятных перенапряжений. Сам алгоритм поиска на данном этапе исследования заключался в последовательном переборе всех возможных сечений определённой линии. Критерием выбора требуемого сечения являлось возникновение экстремального (наибольшего, при поиске наихудшего варианта, или наименьшего – при поиске наилучшего) перенапряжения в сети. После нахождения искомого сечения процесс повторялся для другой линии, при этом сечение ранее рассмотренной линии было изменено на найденное.

Поясним сказанное на примере поиска варианта сети с наибольшим из возникающих перенапряжений. Поиск был начат с линии № 6. В исходном варианте она имела сечение 185 мм², а максимальное перенапряжение между фазами А и С в сети при этом возникало на линии № 8 и составля-

ло 21 097 В. В результате рассмотрения аналогичных схем с сечением линии № 6, равным 240, 150 или 120 мм², было установлено, что наибольшее перенапряжение, равное 21 203 В на линии № 8, возникает в том случае, когда рассматриваемая линия выполнена кабелем сечением 240 мм². Далее аналогичным образом была рассмотрена линия № 7. При этом схема сети отличалась от исходной (см. рис. 1) тем, что в ней линия № 6 имела сечение 240 мм².

6. Величина возникающих в сети перенапряжений, безусловно, во многом зависит от случайных факторов, таких как величина подключенной нагрузки, место и время возникновения ОЗЗ, состава работающих кабельных линий. Поэтому задача перебора всех вариаций сети и возникающих в ней перенапряжений на практике выглядит крайне сложной и трудоёмкой.

Проведённые исследования позволили сформулировать ряд рекомендаций, направленных на минимизацию количества возможных расчётов.

1. В качестве места возникновения ОЗЗ следует выбирать характерные точки, такие как: соединительные кабельные муфты; предполагаемые места с ослабленной изоляцией (например, наиболее длительно эксплуатируемые участки сети); точки, в которых возникновение замыканий в предыдущих расчётах приводило к наибольшим или наименьшим перенапряжениям.

2. Рассмотрению подлежат режимы максимальной и минимальной загрузки трансформаторных подстанций, а также наиболее характерный режим их работы, устанавливаемые с учётом графиков нагрузки.

3. В расчётах следует рассматривать замыкания фазы, произошедшие в момент, когда её напряжение равно амплитудному значению. При этом величина перенапряжений достигает максимальных значений.

2. Результаты исследования и их анализ

Первоначально было получено распределение величин максимальных перенапряжений вдоль КЛ. Характерные графики распределения напряжений на участках сети для трёх линий приведены на рис. 2–4. На всех графиках представлены напряжения, измеренные между фазами А и С, т. е. между повреждённой и одной из «здоровых» фаз.

На рис. 2 приведены графики распределения величины максимального перенапряжения по дли-

не линии № 4. Наименьшие значения перенапряжений для всех вариантов соответствуют началу линии. По мере удаления от начала линии значения напряжений растут и достигают наибольших величин на её конце. Данная монотонная закономерность характерна для графиков большинства тупиковых ветвей.

На рис. 3 приведены аналогичные графики для линии № 5. В данном случае наблюдалось

большее количество точек локальных экстремумов значений напряжений, координаты которых для разных вариантов сети не всегда совпадают, причём наибольшие значения перенапряжений, так же как и в предыдущем случае, соответствуют концу линии.

На рис. 4 приведены графики распределения величины максимального перенапряжения по длине линии № 6. В данном случае для вариантов

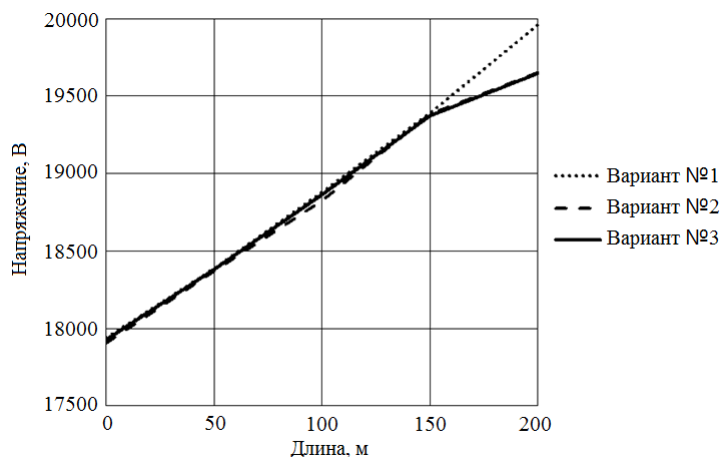


Рис. 2. Распределение максимальных перенапряжений между фазами А и С для линии № 4

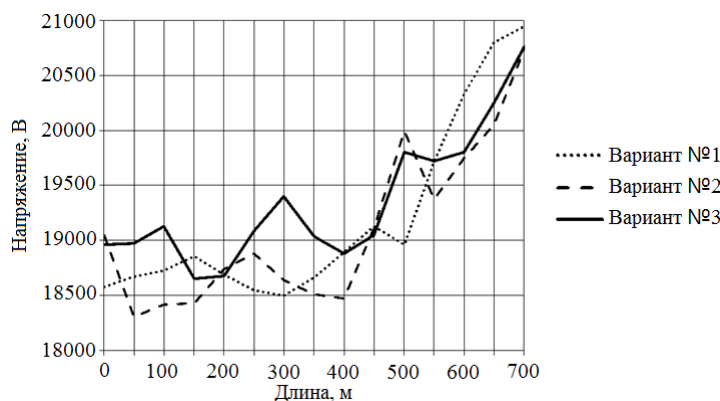


Рис. 3. Распределение максимальных перенапряжений между фазами А и С для линии № 5

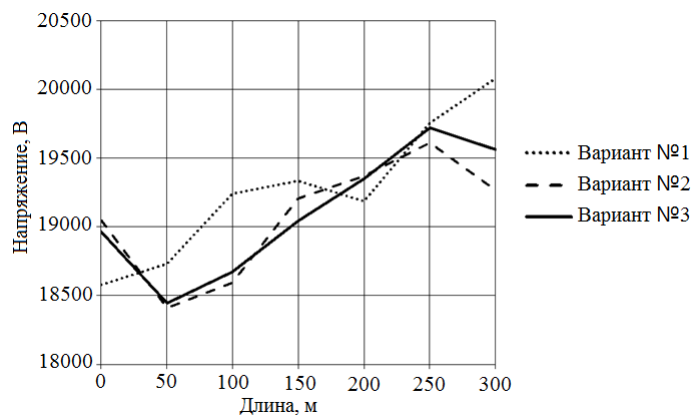


Рис. 4. Распределение максимальных перенапряжений между фазами А и С для линии № 6

2 и 3 координата наибольшего перенапряжения находилась не в самом конце линии. По результатам проведённых расчётов данный факт часто наблюдался для линий, которые не являются тупиковыми.

Из приведённых выше графиков видно, что изменение сечений одной из линий сети приводит к изменению как значений наибольших перенапряжений, так и координат мест их возникновения в других кабельных линиях. Данный факт явился предпосылкой для второго этапа исследования.

В качестве практического применения, например, в городских электрических сетях, было предложено полученные результаты исследований представлять в виде диаграмм, отображающих изменения максимальных величин перенапряжения вдоль кабельных линий. На рис. 5 приведена одна из таких диаграмм, построенная для второго варианта рассмотренной сети. На графике закрашенные области показывают, что на данном участке идёт повышение напряжения относительно начального напряжения на этом участке, а не закрашенные – снижение.

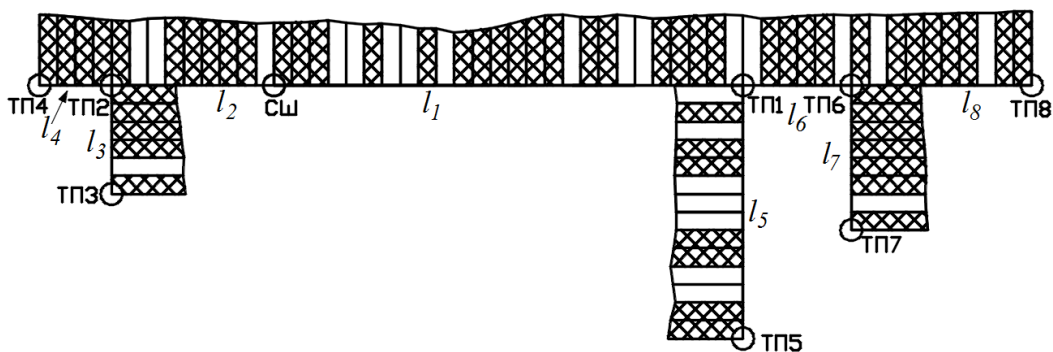


Рис. 5. Пример диаграммы распределения максимальных перенапряжений по кабельной сети

Построение данных диаграмм на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации сети позволяет заранее прогнозировать наиболее уязвимые точки в КЛ с риском пробоя изоляции при перенапряжениях.

Следующим шагом исследований стало нахождение оптимальных и наиболее неудачных, исходя из возникающих перенапряжений в сети, сечений кабельных линий.

В табл. 2 приведены этапы поиска наихудшего варианта сети. Также эта таблица содержит информацию о старых и новых сечениях линий, наибольших перенапряжениях и линиях, на которых они возникают.

Аналогичным образом был проведён поиск наихудшего варианта сети при другой последовательности этапов. Процесс поиска приведён в табл. 3.

Далее был выполнен поиск варианта сети, в котором возникающие перенапряжения имеют минимальную величину. Последовательность процесса поиска приведена в табл. 4.

Этапы преобразования схемы при поиске № 1

Таблица 2

№ этапа	№ КЛ	Старое сечение, мм ²	Новое сечение, мм ²	$U_{\max AC}$, В	№ линии с $U_{\max AC}$
1	6	185	240	21 203	7
2	7	150	120	21 268	7
3	8	150	185	21 568	8
4	5	150	150	21 568	8
5	4	150	240	21 879	8
6	3	150	240	22 417	8
7	2	185	240	22 806	8

Этапы преобразования схемы при поиске № 2

Таблица 3

№ этапа	№ КЛ	Старое сечение, мм ²	Новое сечение, мм ²	$U_{\max AC}$, В	№ линии с $U_{\max AC}$
1	2	185	240	21 629	5
2	4	150	240	21 887	8
3	3	150	240	22 236	8
4	5	150	240	22 893	7
5	6	185	185	22 893	7
6	7	150	150	22 893	7
7	8	150	150	22 893	7

Таблица 4

Этапы преобразования схемы при поиске наилучшего варианта

№ этапа	№ КЛ	Старое сечение, мм ²	Новое сечение, мм ²	$U_{\max AC}$, В	№ линии с $U_{\max AC}$
1	2	185	120	20 910	7
2	4	150	120	20 804	7
3	3	150	150	20 804	7
4	5	150	120	20 739	7
5	6	185	185	20 739	7
6	7	150	185	20 119	8
7	8	150	150	20 119	8

Из представленных табл. 2–4 следует, что максимальное и минимальное значения перенапряжений, наблюдаемые в различных вариантах сети, различаются на 12,9 %. Эта величина вполне значима, что указывает на практическую важность результатов исследования.

Также были рассмотрены схемы сети, состоящие из кабелей одного сечения. Значения максимальных перенапряжений при этом не являются минимальными по отношению к другим рассмотренным вариантам. Поэтому соблюдение однородности сети не обеспечивает минимальных перенапряжений при ОЗЗ.

Заключение

1. Полученные результаты исследований подтверждают предположения о возможности возникновения максимальных величин перенапряжений на удалении от узловых точек в кабельной сети. Это характерно для линий, не являющихся тупиковыми.

2. Изменение параметров одной из кабельных линий приводит к изменению величин максимальных перенапряжений на всех участках сети, а также к смещению координат локальных экстремумов перенапряжений.

3. В условиях проектирования, эксплуатации и модернизации распределительной кабельной сети, необходимо проводить оптимизацию сечений кабельных линий по критерию снижения максимальной кратности перенапряжения.

4. Результаты оценки распределения максимальных перенапряжений по координатам кабельной сети предложено представлять в виде диаграмм, которые позволяют прогнозировать наиболее уязвимые точки в кабельной сети с риском пробоя изоляции при перенапряжениях.

Литература

1. Fessol, F.N. Influence of Underground Cable Insulation Parameters on Transient Overvoltages / F.N. Fessol, A. Mohd Ariffin, H.A. Illias // IEEE 7th International Power Engineering and Op-

timization Conference. Langkawi, Malaysia, 2013. – P. 362–365. DOI: 10.1109/peoco.2013.6564573

2. Коржов, А.В. Исследование влияния переменного магнитного поля на интенсивность частичных разрядов в моделях, имитирующих изоляцию силового кабеля / А.В. Коржов // Кабели и провода. – 2013. – № 1 (338). – С. 8–13.

3. Основы кабельной техники: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пеškова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – СПб.: УВЦИЗ, 2005.

5. Шуин, В.А. Об эффективности ограничения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю различных режимов заземления нейтралей электрических сетей 6–35 кВ / А.В. Шуин, С.В. Солодов. – http://ispu.ru/files/str_71-75.pdf (дата обращения: 10.01.2019).

6. ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual. – <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMan56.pdf> (дата обращения: 10.01.2019).

7. Using Artificial Neural Network to Estimate Maximum Overvoltage on Cables with Considering Forward and Backward Waves / M. Shafiee, B. Vahidi, S.H. Hosseinian, S. Jazebi // Universities Power Engineering Conference. – 2008. DOI: 10.1109/urpc.2008.4651620

8. Карапетян, И.Г. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

9. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–550 кВ / под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2004. – 688 с.

10. Parameter Analysis and Research on Sheath Lightning Overvoltage of Single-core Cable / Niu Haiqing, Xin Zhou, Yao Zhang et al. // Power and Energy Engineering Conference. – 2009. DOI: 10.1109/appeec.2009.4918584

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; korzhovav@susu.ru.

Волков Олег Валерьевич, инженер, ПО «Центральные электрические сети» ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго», г. Челябинск; volkov-ov94@mail.ru.

Коровин Юрий Витальевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; korovinyv@susu.ru.

Поступила в редакцию 20 января 2019 г.

DOI: 10.14529/power200103

ANALYSIS OF OVERVOLTAGE IN NONHOMOGENEOUS DISTRIBUTION CABLE GRIDS

A.V. Korzhov¹, korzhovav@susu.ru,

O.V. Volkov², volkov-ov94@mail.ru,

Yu.V. Korovin¹, korovinyv@susu.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Production department “Central electrical grids”, OJSC IDGC of Urals – Chelyabenergo branch, Chelyabinsk, Russian Federation

Overvoltage in 6 (10) kV cable lines is one of the factors that have the strongest impact on the grid reliability. The paper discusses the results of testing the lengthwise distribution of overvoltage values in a typical section of a 10 kV distribution cable grid as induced by a single phase-to-ground fault; it also presents a method for minimizing such overvoltage.

Tests were run by simulation in *ATPDraw*. The cable-grid ATP model was based on elements with distributed reactive and active parameters. Cable-line overvoltage was found to change significantly depending on the configuration and design choices of cable types and cross-section values. Dead-end feeders had maximum overvoltage at the very end, where the research team observed both monotonic increase in overvoltage towards the end, and local maxima. In case where the line was not a dead end, maximum overvoltage was observed towards, but not at the end. Maximum overvoltage in a grid was found to correlate with the cable cross-sections.

The practical output of this research is guidelines on how to optimize the design for further cable grid development by minimizing the factor of projected overvoltage. The paper proposes visualizing the results as diagrams showing changes in maximum overvoltage along cable lines. Plotting such diagrams when designing, operating, or upgrading a grid will help pre-identify the most vulnerable points of cable lines where overvoltage could cause insulation failure. The paper shows that the best grid design and the worst grid design may differ by > 12 % in peak overvoltage.

Keywords: cable lines, overvoltage, insulation, distribution grid development, reliability.

References

1. Fessol F.N., Ariffin A. Mohd., Illias H. A. Influence of Underground Cable Insulation Parameters on Transient Overvoltages. *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*. Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 362–365. DOI: 10.1109/peoco.2013.6564573

2. Korzhov A.V. [Investigation of the influence of an alternating magnetic field on the intensity of partial discharges in models simulating the insulation of a power cable]. *Cables and Wires*, 2013, no. 1 (338), pp. 8–13. (in Russ.)

3. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyy S.D. *Osnovy kabel'noy tekhniki: uchebnyk dlya stud. vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Fundamentals of cable technology: a textbook for students. higher education institutions]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 432 p.

4. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for the installation of electrical installations]. 7th ed. St. Petersburg, UVISIZ, 2005.

5. Shuin A.V., Solodov S.V. *Ob effektivnosti ogranicheniya perenapryazheniy pri dugovykh замыkaniyakh na zemlyu razlichnykh rezhimov zazemleniya neytrali elektricheskikh setey 6–35 kV* [On the effectiveness of overvoltage limitation during arc faults to earth of various modes of neutral grounding of electric networks of 6–35 kV]. Available at: http://ispu.ru/files/str_71-75.pdf (accessed 10.01.2019).

6. ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual. Available at: <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMan56.pdf> (accessed 10.01.2019).

7. Shafiee M., Vahidi B., Hosseinian S.H., Jazebi S. Using Artificial Neural Network to Estimate Maximum Overvoltage on Cables with Considering Forward and Backward Waves. *Universities Power Engineering Conference*, 2008. DOI: 10.1109/upec.2008.4651620

8. Karapetyan I.G., Faibisovich D.L., Shapiro I.M. *Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey* [Handbook for the design of electrical networks]. 4th ed., Revised. and add. Moscow, ENAS Publishing House, 2012. 376 p.

9. Goryunov I.T., Lyubimov A.A. (Ed.) *Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–550 kV* [Handbook of electrical networks 0.4–35 kV and 110–550 kV]. Moscow, Papyrus Pro Publ., 2004. 688 p.

10. Haiqing Niu, Xin Zhou, Yao Zhang, Xiaobing Wang, Yinxia Shi, Yuxiang Xu. Parameter Analysis and Research on Sheath Lightning Overvoltage of Single-Core Cable. *Power and Energy Engineering Conference*, 2009. DOI: 10.1109/appeec.2009.4918584

Received 20 January 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коржов, А.В. Исследования перенапряжений по длине неоднородной распределительной кабельной сети / А.В. Коржов, О.В. Волков, Ю.В. Коровин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 22–29. DOI: 10.14529/power200103

FOR CITATION

Korzhev A.V., Volkov O.V., Korovin Yu.V. Analysis of Overvoltage in Nonhomogeneous Distribution Cable Grids. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 22–29. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200103
