

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ЛИНИИ 6÷10 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В.П. Закарюкин

Рассмотрены режимы работы линий напряжением 6÷10 кВ с изолированной нейтралью в условиях влияния контактной сети железной дороги, электрифицированной по системе 1х25 кВ. Показано, что электрическое влияние контактной сети приводит к искажению звезды фазных напряжений линии с появлением напряжения нулевой последовательности. Расчетным путем и экспериментально выявлена возможность феррорезонансных эффектов в линии с трансформаторами типа ОМ с возрастанием напряжения провод-земля до 20 кВ.

1. Вводные замечания. Контактная сеть железной дороги, электрифицированной по системе переменного тока 1х25 кВ, вызывает появление наведенных напряжений на смежных линиях, особенно на линиях, расположенных на опорах контактной сети. Как известно, электромагнитное влияние на смежные линии подразделяется на три разновидности [1].

Во-первых, это электрическое влияние, появляющееся за счет емкостной связи между контактной сетью и смежной линией. Линии напряжением 6÷10 кВ в рабочем режиме представляют собой изолированные от земли системы. Гальваническая связь с землей через обмотки трансформаторов напряжения не изменяет ситуации, поскольку токи первичных обмоток измерительных трансформаторов НТМИ составляют обычно несколько миллиампер. Величины наводимых напряжений при этом имеют тот же порядок, что и рабочие напряжения линий.

Во-вторых, это магнитное влияние, обусловленное наведением ЭДС в контуре смежной провод-земля переменным магнитным полем контактной сети. Значительное магнитное влияние создается при системе электрификации 1х25 кВ. Напряжения, наводимые за счет магнитного влияния, обычно много меньше напряжений электрического влияния, за исключением кратковременных режимов коротких замыканий в тяговой сети. Этот вид влияния редко приводит к появлению длительных напряжений, сопоставимых по величине с рабочими напряжениями высоковольтных линий.

В-третьих, это гальваническое влияние, возникающее за счет токов, протекающих в земле, а также по заземленным металлическим объектам. При тяге переменного тока этот вид влияния существенно не проявляется.

Наличие электрического и магнитного влияний от контактной сети переменного тока 1х25 кВ тре-

бует повышенных мер безопасности при работах на электрооборудовании со снятием напряжения и заземлением. Электрическое влияние на смежные линии, расположенные на опорах контактной сети, настолько велико, что требует предварительной проработки и применения технических решений для снижения неблагоприятных изменений рабочих режимов смежных линий. Тем не менее до настоящего времени рабочие режимы линий 6÷10 кВ в условиях влияния контактной сети детально не рассматривались, хотя в эксплуатационной практике примеры такого влияния известны. К последствиям влияния относятся перекосы фазных напряжений из-за появления напряжения нулевой последовательности с нарушением работы сигнализации об однофазных коротких замыканиях.

В данной статье рассматриваются расчетные оценки и приводятся результаты экспериментальных измерений режимов линий 6÷10 кВ, расположенных как на опорах контактной сети, так и на отдельных опорах.

2. Особенности электрического влияния на ЛЭП 6÷10 кВ. Электрические сети с изолированной нейтралью, которые используются для питания автоблокировки и линейно-путевых потребителей, имеют в нормальном режиме единственную гальваническую связь с землей – через первичную обмотку трансформатора напряжения НТМИ (рис. 1). Трансформатор НТМИ работает в режиме, близком к холостому ходу (ток холостого хода трансформатора НТМИ составляет примерно 5 мА), и мало нагружает источник питания из-за высокого индуктивно-активного сопротивления его первичной обмотки. Такая ситуация не только не устраняет проблему электрического влияния, но и приводит к возможности резонансных явлений в колебательном контуре, образованном индуктивностью НТМИ и емкостью линии.

Питание линии электропередачи производится от треугольника районной обмотки тягового трансформатора или от специального повышающего трансформатора. В нормальном режиме напряжения линии определяются емкостями проводов и электрооборудования по отношению к земле и составляют симметричную звезду трехфазной системы.

Близкое расположение контактной сети приводит к тому, что по емкостным элементам C_A , C_B , C_C протекают не только токи от источника питания, но и емкостные токи электрического влияния контактной сети, фаза которых определяется фазой напряжения контактной сети. Последняя со-

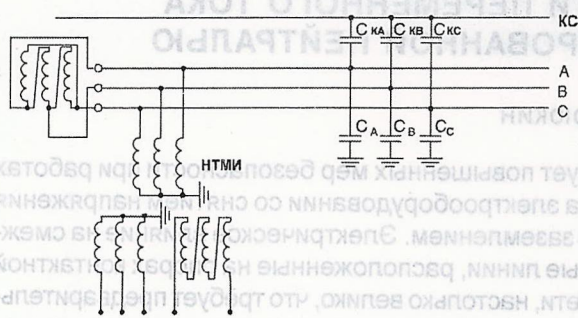


Рис. 1. Схема электрического влияния контактной сети на ЛЭП

падает с углом одного из линейных напряжений ЛЭП (рис. 2), так что на три фазных напряжения накладываются три напряжения электрического влияния, образующих нулевую последовательность.

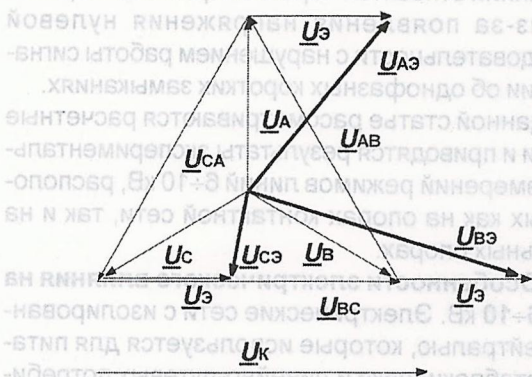


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений ЛЭП:

U_k – вектор напряжения контактной сети;
 U_A, U_B, U_C – фазные напряжения нормального неискаженного режима, U_3 – вектор напряжения электрического влияния, $U_{AЭ}, U_{BЭ}, U_{CЭ}$ – результирующие напряжения провод – земля

Из рисунка 2 видно, что на двух проводах фазные напряжения заметно больше номинальных, а на третьем существенно меньше номинала. На разомкнутом треугольнике трансформатора НТМИ напряжение определяется электрическим влиянием, с учетом коэффициента трансформации на вторичную звезду (10000/100:3 для треугольника трансформатора НТМИ-10 с последующим утроением напряжения нулевой последовательности). Наличие такого напряжения при достаточно большой его величине (когда ЛЭП расположена на опорах контактной сети) приводит к невозможности обнаружения однофазных замыканий на землю, поскольку сигнализация будет срабатывать от напряжения электрического влияния. Необнаруженные однофазные замыкания приведут к двухфазным замыканиям и к недопустимым перерывам в электроснабжении потребителей.

3. Методика анализа влияния тяговой сети на смежные линии. Анализ режимов работы ли-

ний в условиях влияния проведен с применением сертифицированного программного комплекса Flow3, [2] (сертификат RU.ME93.H00133 от 30.10.2003 г.). Этот программный комплекс предназначен для расчетов режимов электрических систем в фазных координатах и позволяет формировать модели элементов со взаимноиндуктивными и емкостными связями. К таким элементам относятся многопроводные воздушные и кабельные линии, в том числе и тяговые сети железных дорог вместе с расположенными поблизости линиями электропередачи. При расчетах режимов в программном комплексе Flow3 автоматически рассчитываются напряжения электрического и магнитного влияния соседних проводов.

Все провода многопроводной системы считаются тонкими, прямолинейными, параллельными друг другу и поверхности плоской однородной земли с заданной удельной электропроводностью. Потенциалы рельсов принимаются нулевыми, но учитывается проводимость их заземления. Внешнее сопротивление провода вычисляется с учетом влияния проводящей однородной земли. При расчетах учитываются собственные и взаимные частичные емкости проводов.

4. Расчеты наведенных напряжений на проводах ЛЭП-10 кВ. Оценки реальных величин напряжений на проводах линий 6÷10 кВ должны производиться с учетом емкостей оборудования, подключенного к линиям, и влияния индуктивности трансформаторов.

К линиям напряжением 6÷10 кВ, проложенным вдоль железной дороги, подключены сигнальные точки автоблокировки и нежелезнодорожные потребители. Сигнальные точки питаются через однофазные трансформаторы типа ОМ, а прочие потребители – через силовые трансформаторы разной мощности. Емкости первичной обмотки трансформаторов ОМ-1,25/10 относительно земли составляют примерно 100 пФ на фазу, емкости силовых трансформаторов имеют большее значение, порядка 1000 пФ на фазу по отношению к земле. Это сравнительно небольшие емкости, существенно меньшие емкостей провод-земля линии реальной длины.

Индуктивность одной фазы первичной обмотки НТМИ составляет примерно 2000 Гн, активное сопротивление – 1500 Ом ($3,8(10^{-9} - j 1,6(10^{-6} \text{ См}$ проводимости эквивалентного шунта на землю при 50 Гц). Включенная параллельно первичной обмотке емкость проводов линии создает резонансный контур на частоте 50 Гц при длине линии порядка 1...2 км. Из-за нелинейности сердечника существует некоторый диапазон возможных резонансных длин. Емкостные токи, протекающие при этом по конденсатору контактная сеть–провод линии, малы (до десяти миллиампер на 1 км) и их недостаточ-

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ЛИНИИ 6÷10 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

но для существенного подъема напряжения на параллельном резонансном контуре. При резонансном подъеме напряжения на первичной обмотке трансформатора резко растут потери в нем, которые не могут быть обеспечены небольшим емкостным током в системе контактная сеть—провод. Если бы катушки имели более низкую индуктивность, то резонанс наступал бы для более длинных отрезков линии с большими емкостными токами, что приводило бы к частым выходам из строя трансформаторов НТМИ.

На рисунке 3 показано сечение расчетной системы проводов линии 10 кВ, использованное для расчетов электрического влияния на двухпутных участках. Согласно расчетам наводимых напряжений, влияние контактной сети приводит к появлению на отключенной незаземленной линии напряжения от 6 до 10 кВ на каждом проводе по отношению к земле в зависимости от высоты их расположения. При подаче рабочего напряжения на линию из-за электрического влияния возникают перекосы напряжения провод—земля: вместо 6 кВ по отношению к земле напряжения составляют от 8 кВ (фаза А), 11 кВ (фаза В) и 3 кВ (фаза С) до 11 кВ, 15 кВ и 6 кВ соответственно. Такое электрическое влияние приведет к появлению на разомкнутом треугольнике трансформатора НТМИ напряжения, соответствующего или превышающего напряжение, возникающее при однофазном замыкании на землю. Реально это напряжение обычно несколько меньше из-за влияния емкостей подключенного к линии оборудования и насыщения стержней перегруженных катушек НТМИ-10, тем не менее сигнализация об однофазных замыканиях на землю будет работать неверно.

Если же существуют необнаруженные замыкания на землю, то возможны резонансные эффекты на индуктивностях трансформаторов ОМ-10, один конец обмотки которых получит связь с землей. Для параметров трансформатора ОМ-1,25/10 резонансная длина линии ориентировочно равна 15 км, что соответствует длинам реальных линий. Фазные напряжения при этом могут достигать 20 кВ и приводить к повреждениям трансформаторов НТМИ и ОМ. Вход в резонанс происходит скачком из-за нелинейности индуктивности трансформаторов (триггерный эффект).

Необнаруженные однофазные замыкания могут приводить к возникновению двухфазных замыканий с отключениями линий. Кроме того, при работах со снятием напряжения и заземлением может возникнуть эффект ложного перехода на питание от отключенной ЛЭП на сигнальных точках, поскольку наложение заземляющих штанг производится неодновременно. При наложении штанги на один из проводов, к которому подклю-

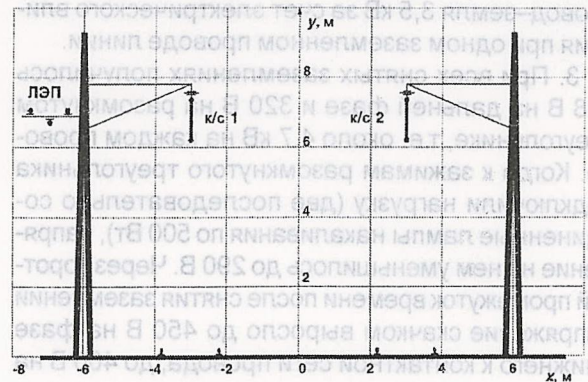


Рис. 3. Сечение расчетной системы

чен вывод ОМ-10, наведенное напряжение на еще не заземленном проводе может оказаться достаточным для переключения питания сигнальной точки.

5. Экспериментальные измерения наведенных напряжений. Измерения проводились на одном из перегонов Восточно-Сибирской железной дороги у поста секционирования примерно посередине между питающими линию 10 кВ подстанциями. Линия расположена на опорах контактной сети и служит для электроснабжения не транспортных потребителей, одновременно являясь резервом для питания автоблокировки. Рядом с местом измерений находилась опора с разъединителем, позволяющим отключать примерно половину ЛЭП, общая длина которой составляла 15 км. Для измерений использовались три трансформатора ОМ-1,25/10/0,23, включенные по схеме звезды с заземленной нейтралью. При проведении измерений рабочее напряжение на линии было отключено.

Вторичные обмотки трансформаторов были соединены в открытый треугольник с целью контроля напряжения нулевой последовательности. Измерение напряжения проводилось по фазам вторичных обмоток трансформаторов стрелочным вольтметром. Измерения производились в основном на отключенной линии в процессе снятия заземляющих штанг со следующими результатами.

1. При снятии одной заземляющей штанги (когда два оставшихся провода оставались заземленными) получены величины напряжений 35 В на фазе ближнего к контактной сети провода, 48 В на фазе среднего провода линии (этот провод расположен выше двух других) и 26 В на фазе дальнего провода. Эти напряжения соответствуют напряжениям провод—земля 1,5 кВ, 2,1 кВ и 1,1 кВ при заземленных соседних проводах линии.

2. При оставленной заземляющей штанге только на одной средней фазе получилось соответственно 74 В, 0, 80 В на фазах и 160 В на разомкнутом треугольнике. Это соответствует напряжениям

провод–земля 3,5 кВ за счет электрического влияния при одном заземленном проводе линии.

3. При всех снятых заземлениях получилось 108 В на дальней фазе и 320 В на разомкнутом треугольнике, т.е. около 4,7 кВ на каждом проводе. Когда к зажимам разомкнутого треугольника подключили нагрузку (две последовательно соединенные лампы накаливания по 500 Вт), напряжение на нем уменьшилось до 290 В. Через короткий промежуток времени после снятия заземлений напряжение скачком выросло до 450 В на фазе ближнего к контактной сети провода, до 400 В на фазе среднего провода, а напряжение разомкнутого треугольника измерить не удалось из-за закаливания вольтметра с верхним пределом 750 В. В итоге сгорел предохранитель одного из трансформаторов и пришлось снова наложить заземления. Напряжение 450 В на вторичной обмотке ОМ соответствует примерно 20 кВ на проводе. В этом случае наблюдался характерный эффект триггерного входа в феррорезонанс.

При перемагничивании сердечника трансформатора индуктивность его обмотки падает в несколько раз. Если в режиме холостого хода на номинальном напряжении индуктивность обмотки в несколько раз больше резонансной, то входение в феррорезонанс при случайном броске напряжения вполне вероятно, и оно будет происходить скачком – известный триггерный эффект при феррорезонансе.

Емкость провода АС-35 длиной 15 км по отношению к земле равна [3]:

$$C_0 = \frac{24 \cdot 10^{-9}}{\lg(2h/r_3)} l = 110 \text{ нФ}.$$

Соответствующая емкостная проводимость составляет примерно 35 мкСм. Ток холостого хода трансформатора ОМ-1,25/10 равен 0,029 А, т.е. индуктивная проводимость первичной обмотки на холостом ходу примерно 3 мкСм, что вполне оставляет возможность феррорезонанса при глубоком перемагничивании (когда индуктивность и индуктивное сопротивление будут существенно ниже, чем в нормальном режиме). Сопротивление трансформатора при резонансе должно снизиться примерно в 12 раз. При возросшем вдвое против номинала напряжении ориентировочно можно считать ток возросшим в 24 раза, т.е. примерно до 0,7 А. Это больше номинального тока 0,125 А в 5,6 раза. Полная и активная мощность трансформатора должна возрасти по сравнению с холостым ходом примерно в $24 \times 2 = 48$ раз. Паспортная мощность холостого хода трансформатора 0,06 кВт увеличивается до 2,9 кВт с активным током $2900/20000 = 0,145$ А. Именно такой ток способна поставлять соседняя контактная сеть через емкость провод линии–контактная сеть.

4. Измерения на трансформаторе НТМИ питающей подстанции при включении половинной длины ЛЭП и включенном рабочем напряжении привели к следующим результатам: на первой фазе вторичной звезды 65 В (т.е. 6,5 кВ провод–земля); на второй фазе – 80 В (8 кВ), на третьей фазе – 25 В (2,5 кВ); на разомкнутом треугольнике НТМИ – 62 В (величина наводимого напряжения электрического влияния 6,2 кВ). Эти результаты близки к результатам расчета напряжений провод–земля, представленным в предыдущем разделе.

6. Методы снижения наводимых напряжений. Расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о серьезной проблеме с наведенным напряжением для линий 6–10 кВ с изолированной нейтралью, смонтированным на опорах контактной сети, если у этих линий нет гальванического контакта с другими линиями, расположенными вдали от железной дороги.

Эффективным средством для снижения наводимого напряжения может быть установка на шинах 10 кВ подстанции конденсаторов порядка 0,02 мкФ на 1 км длины линии (на каждом из трех проводов по отношению к земле). Необходимая емкость пропорциональна длине линии. Конденсаторы емкостью 0,2 мкФ, требуемой для участка линии длиной 10 км на опорах контактной сети, приводят к току около 1,5 А при однофазном коротком замыкании на землю, что приемлемо для системы с изолированной нейтралью.

Включение в цепь разомкнутого треугольника трансформатора напряжения НТМИ резистора сопротивлением 1...1,5 Ом не дает эффекта (кроме возможного повреждения обмотки НТМИ и невозможности использования его для контроля однофазных замыканий на землю) из-за большой индуктивности рассеивания трансформатора. Установка конденсаторов емкостью 0,2 мкФ для линии длиной 10 км приведет к напряжениям на проводах по отношению к земле в 4,7, 5,9 и 7 кВ с напряжением на разомкнутом треугольнике около 30 В, а при емкостях 1,0 мкФ напряжения становятся равными 7, 5 и 6 кВ на проводах и 15 В на разомкнутом треугольнике.

Разумеется, наиболее радикальным средством устранения неблагоприятных последствий электрического влияния является расположение линий на отдельных опорах. Уже на ширине сближения примерно 15 м наводимое напряжение не превышает 2 кВ и не будет приводить к эффектам блокировки сигнализации об однофазных коротких замыканиях.

Для конденсаторной установки могут быть использованы косинусные конденсаторы марок КЭ1-10,5-37,5-2У1 или КЭ1-10,5-30-2У1, подбираемые для получения необходимой емкости путем пос-

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ЛИНИИ 6÷10 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

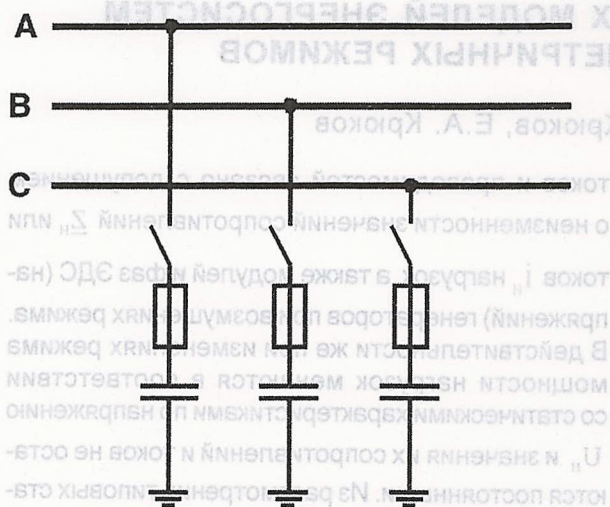


Рис. 4. Схема подключения конденсаторов к шинам 10 кВ подстанции

ледовательного соединения двух или трех конденсаторов. Схема подключения конденсаторов приведена на рисунке 4. Для защиты от возможных коротких замыканий устанавливаются предохранители марки ПК-10Н или аналогичные. Разъединители должны обеспечивать разрыв тока конденсаторов порядка 10 А.

Выводы

1. Электрическое влияние контактной сети приводит к появлению напряжения нулевой последовательности на проводах линий с изолированной нейтралью, расположенных на опорах контактной

сети, величиной от 6 до 10 кВ. В рабочем режиме линий это приводит к искажению звезды фазных напряжений. В итоге нарушается работа сигнализации об однофазных коротких замыканиях на землю. Существование подобного эффекта подтверждено расчетами и экспериментальными измерениями.

2. В смежной линии 6÷10 кВ с трансформаторами ОМ возможны феррорезонансные эффекты с возрастанием напряжения провод-земля до 20 кВ.

3. Достаточно эффективное средство для снижения нежелательных эффектов электрического влияния контактной сети – установка на шинах 10 кВ питающей подстанции конденсаторов емкостью 0,02 мкФ на 1 км длины линии. Конденсаторы включаются между каждой фазой и землей.

4. Кроме установки конденсаторов, снижение наводимых напряжений достигается использованием линий, расположенных на отдельных опорах на расстоянии не менее 15 м от оси железной дороги.

Литература

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 638 с.
2. Закарюкин В.П. Расчеты режимов электрических систем в фазных координатах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири: Сб. науч. тр. Иркутск, 2003. С. 262–273.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. М.: Высш. шк., 1981. Т. 2. 408 с.