

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.316.1

В. А. Бошняга¹, В. М. Суслов², И. П. Стратан³, И. В. Добря⁴

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КАБЕЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6–35 КВ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

¹*Кандидат технических наук, Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Молдова*

²*Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Молдова*

³*Кандидат технических наук, профессор, Технический университет Молдовы,
Кишинев, Молдова*

⁴*Технический университет Молдовы, Кишинев, Молдова*

Аннотация. Работа посвящена исследованию кабельной линии среднего напряжения при изолированной и компенсированной нейтрали в пакете МАТЛАБ. Выявлены некоторые присущие закономерности изменения напряжений и токов в схеме при вариации сопротивления повреждения в разных точках линии.

Ключевые слова: кабельная распределительная сеть 6–35 кВ, установившийся режим, изолированная и компенсированная нейтраль, однофазное замыкание.

V. A. Bosneaga¹, V. M. Suslov², I. P. Stratan³, I. V. Dobrea⁴

FEATURES OF OPERATION OF CABLE DISTRIBUTION NETWORK 6–35 KV IN STEADY MODE WITH ISOLATED AND COMPENSATED NEUTRAL WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT

¹*Ph. D. in Engineering Science, Institute of Power Engineering, Chisinau, Moldova*

²*Institute of Power Engineering, Chisinau, Moldova*

³*Ph. D. in Engineering Science, Professor, Technical University, Chisinau, Moldova*

⁴*Technical University, Chisinau, Moldova*

Annotation. The work is devoted to the study of medium voltage cable line with isolated and compensated neutral in the MATLAB package. Some inherent patterns of voltage and current changes in the circuit are revealed when the damage resistance varies at different points of the line.

Keywords: cable distribution networks 6–35 kV, steady state mode, isolated and compensated neutral, single-phase failure.

Введение. Работе кабельных сетей среднего напряжения 6–35 кВ в режиме изолированной нейтрали посвящено большое количество работ ввиду важно-

сти этого вопроса. В результате многолетних исследований и сопутствующей дискуссии исследованы многочисленные аспекты данной проблемы, связанные с обеспечением надежного электроснабжения, начиная с классических работ в этой области [1–3] и многих других и заканчивая сравнительно недавними научными публикациями, а также разработанными на их основе нормативными материалами [4–6]. Рассмотрены и различные способы заземления нейтрали, призванные устранить присущие этому режиму недостатки, например, [7–9]. В основе многих исследований лежат упрощенные схемы замещения, позволяющие получить аналитические выражения, описывающие как установившиеся, так и переходные процессы, в том числе с использованием различных моделей возникающей электрической дуги.

Материалы и методы исследования. В данной работе авторы попытались дать наглядное описание установившегося процесса такой цепи при однофазном замыкании на землю через некоторое сопротивление с использованием программного пакета МАТЛАБ. Этот пакет дает возможность достаточно просто и точно рассчитать практически любой режим работы кабельной или смешанной сети для реальных параметров трансформаторов и линий с учетом многих факторов, которые сложно учесть при аналитическом исследовании. Кроме того, одним из преимуществ данного способа моделирования является легкость изменения конфигурации схемы сети и ее параметров в процессе моделирования конкретной сети.

Опишем кратко используемую модель, приведенную на рис. 1.

Схема содержит в основном стандартные элементы из библиотеки МАТЛАБа, такие как трехфазный источник питания (Three phase source), три участка линии в виде пи-схемы (PI Line Section 1–3), четыре измерительных блока для определения токов и напряжений в схеме, вспомогательный измеритель (Multimeter), некоторые операционные блоки (sqrt), отдельные сопротивления для моделирования нагрузки (Load) и замыкания на землю (4, 10). В состав модели также включен дополнительный элемент (Additional lines), позволяющий при необходимости моделировать остальную часть сети. Кроме того, включены модели силового питающего (Y0/d 1) и вспомогательного трансформаторов (Y/d 2). Последний используется для моделирования всевозможных способов заземления нейтрали. Отметим, что при необходимости в рассматриваемую схему можно легко включить и другие элементы, например, вместо пи-схемы линии можно использовать модель линии с распределенными параметрами, позволяющие получить более точные результаты. Однако проведенные расчеты не выявили существенных отличий результатов при использовании более точной модели, в связи с этим в дальнейшем применялась пи-схема.

Описанная модель использовалась для проведения расчетов стационарного режима кабельной линии номинальным напряжением 10 кВ, состоящей из двух участков кабеля (PI Line section 1 и 3), что дает возможность при необходимости измерить токи и напряжения и в средней части линии. Участок линии (PI Line

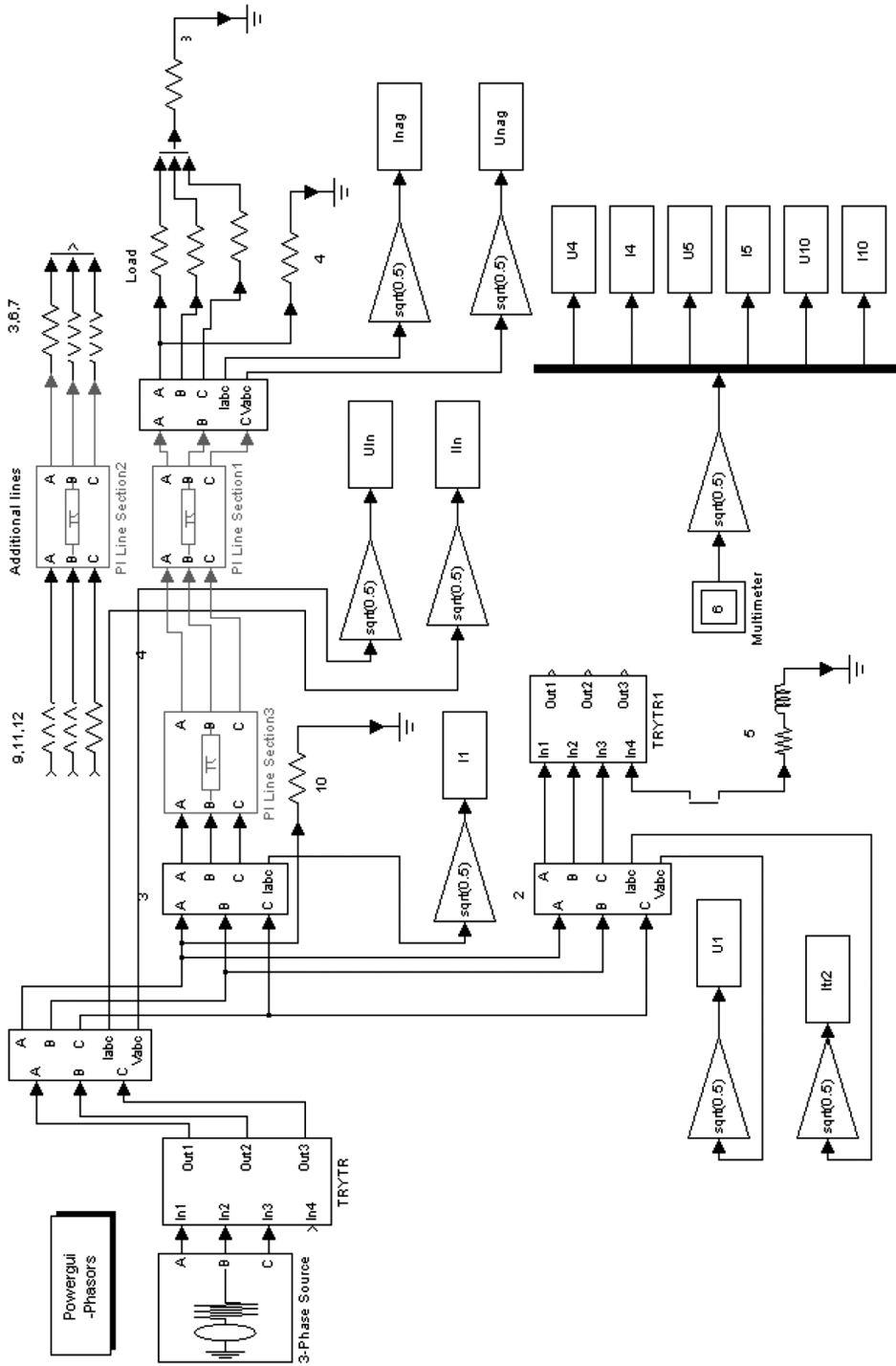


Рис. 1. Базовая схема, используемая при моделировании электрической сети

section 2) предусмотрен для возможности моделирования также воздушных линий, если они имеются в сети.

На рис. 2 приведено окно для ввода параметров участка кабеля, в котором видно, какие заданы удельные параметры для разных последовательностей, а также какая задана длина участка. В данном случае для сети выбран трехфазный алюминиевый кабель сечением жилы 120 мм^2 , его пассивные параметры взяты из [5]. Как видно из рис. 2, в данной модели кабеля заданы удельные активные сопротивления для прямой и нулевой последовательности в Ом/км, а также аналогично индуктивность и емкость на единицу длины. Кроме того, задается длина участка кабельной линии, в данном случае 5 км. Таким образом, исследуемая кабельная линия имеет полную длину 10 км.

Следующим основным элементом модели является стандартная модель трансформатора с соединением Y0/d, параметры которой рассчитаны по предложенной методике на основе данных из каталогов заводов изготовителей трансформатора с учетом особенностей его работы при данной схеме соединения обмоток. Принято допущение о равенстве его параметров короткого замыкания для режимов прямой и нулевой последовательностей. Параметры холостого хода вводятся только для режима прямой последовательности, так как режим холостого хода для нулевой последовательности при такой схеме соединения обмоток нереализуем.

Такой подход позволяет моделировать трехстержневые конструкции в отличие от трехфазных групп однофазных трансформаторов. На рис. 3 приведено окно с данными для основного силового трансформатора, мощностью 16 МВА. Для вспомогательного трансформатора мощностью 250 кВА, служащего для образования искусственной нейтрали, также аналогично заданы соответствующие типовые значения параметров.

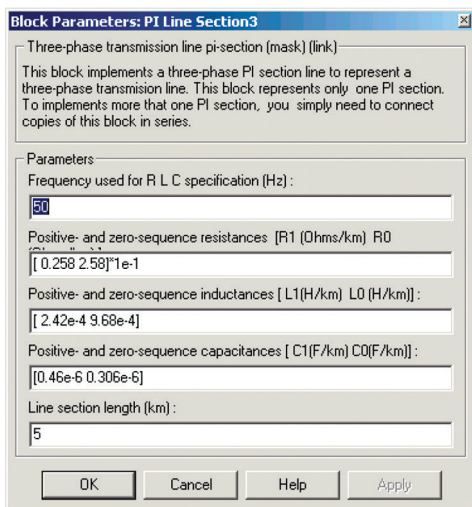


Рис. 2. Окно для ввода параметров участка кабельной линии 10 кВ

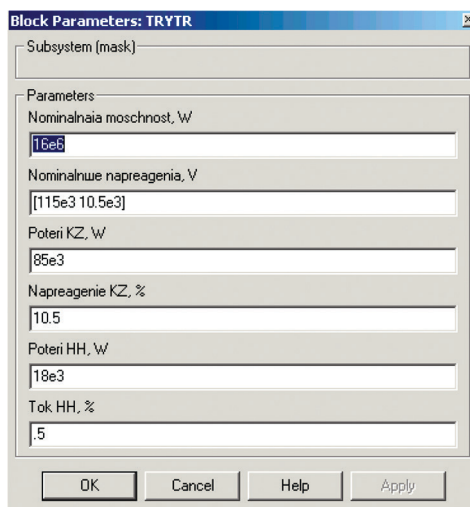


Рис. 3. Окно с исходными данными основного трансформатора

Токи и напряжения элементов схемы, включенных в места замыкания на землю и в нейтраль вспомогательного трансформатора (сопротивления 4, 5, 10 по рис. 1), измеряются с помощью элемента Multimeter, который, наряду с упомянутыми ранее измерительными элементами, позволяет строить векторы токов и напряжений схемы, что облегчает и делает наглядным анализ происходящих процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. 1. Установившийся режим кабельной линии с изолированной нейтралью. Для начала опишем результаты, полученные для наиболее простого режима без включения дополнительных элементов в нейтраль вспомогательного трансформатора. Отметим, что проведенное моделирование различных режимов при наличии нагрузки показало, что для выявления основных закономерностей протекания токов через емкости линии на первом этапе полезно и достаточно рассмотреть режим холостого хода линии, так как токи нагрузки значительно превышают емкостные токи и затуманивают картину происходящего. На рис. 4 приведена упрощенная схема, позволяющая наглядно описать происходящие процессы на основе результатов моделирования по полной схеме. Для иллюстрации приведены только емкости фаз на землю. Зачерненными прямоугольниками показаны низковольтные обмотки фаз, соединенные в треугольник, основного (Y/d 1) трансформатора и соединенные в звезду обмотки фаз вспомогательного (Y/d 2) трансформатора, запитанные от треугольника вторичных обмоток основного трансформатора.

Показан также треугольник низковольтной вторичной обмотки вспомогательного трансформатора, наличие которого принципиально важно для протекания токов нулевой последовательности. Прямоугольниками показаны комплексные сопротивления 5, 10 и 4, которые моделируют заземление нейтрали и повреждения при замыкании фазы на землю в начале или в конце линии, и упрощенно в виде конденсаторов показаны емкости фаз линии относительно земли. Также показаны стрелками токи, протекающие в ветвях схемы: токи ($I_{a'}$, $I_{b'}$, $I_{c'}$) от питающего треугольника вторичной обмотки основного трансформатора, токи (I_a , I_b , I_c) в начале линии (после подключения сопротивления 10, моделирующего замыкание на землю), токи (I_{tra} , I_{trb} , I_{trc}) в обмотках звезды вспомогательного трансформатора, а также токи I_n и I_p в нейтрали и в месте повреждения.

Рассмотрим замыкание на землю в начале линии через активное сопротивление 10 (рис. 4), при этом в процессе моделирования будем изменять его величину. Зададим сопротивле-

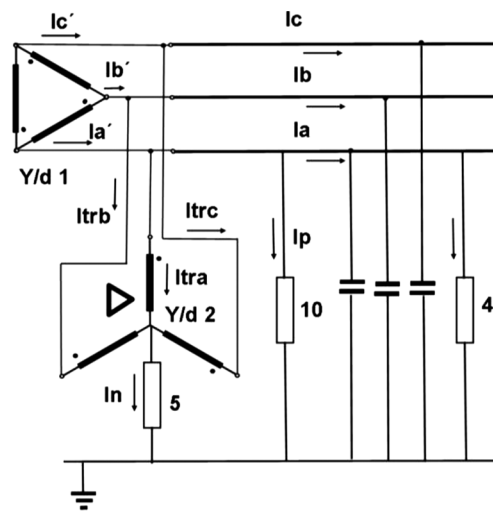


Рис. 4. Упрощенная схема сети

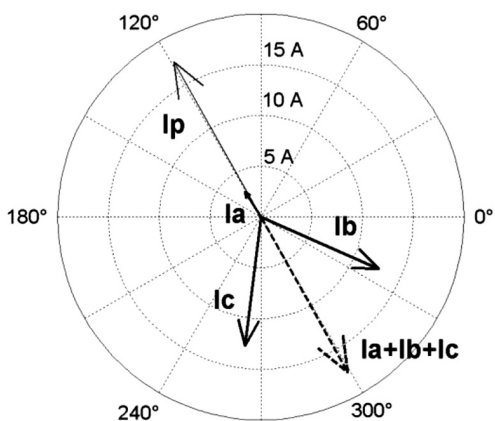


Рис. 5. ВД токов в начале линии (I_a , I_b , I_c) и в заземляющем сопротивлении 10 (I_p) для случая $R_{10} = 4 \text{ Ом}$

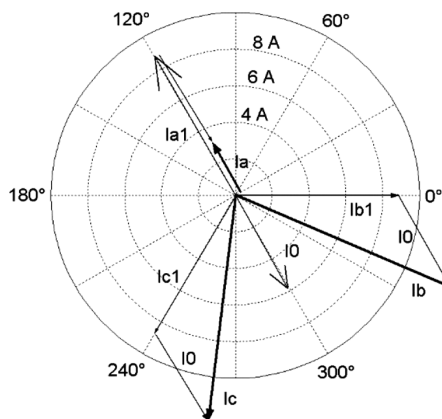


Рис. 6. ВД токов в начале линии с разложением на симметричные составляющие

ние 4, позволяющее при необходимости моделировать замыкание на землю в конце линии (рис. 1), равное 4 Мом , что практически эквивалентно разрыву. ВД токов фаз в начале линии (I_a , I_b , I_c) и тока I_p в заземляющем сопротивлении для рассматриваемого случая изолированной нейтрали с повреждением в начале линии через сопротивление $R_{10} = 4 \text{ Ом}$ приведена на рис. 5. Отметим, что токи линии измеряются согласно рис. 1 и 4 после места подключения заземляющего сопротивления 4.

Как видно из рис. 5, емкостные зарядные токи в фазах **в начале** линии несимметричны, ток поврежденной фазы A значительно меньше остальных, а их сумма не равна нулю и представлена пунктирным вектором ($I_a+I_b+I_c$). Очевидно, этот вектор представляет собой утроенный ток нулевой последовательности в начале линии. Он равен по величине и находится в противофазе по отношению к вектору тока I_p в сопротивлении R_{10} . Таким образом, токи нулевой последовательности всех фаз циркулируют в контуре, образованном емкостями фаз линии и замыкаются через сопротивление R_{10} в месте повреждения. Более подробно этот момент отражен на рис. 6, где показаны рассчитанные значения симметричных составляющих токов фаз в начале линии для прямой и нулевой последовательностей (I_{a1} , I_{b1} , I_{c1} и I_0). Видно, что суммирование соответствующих векторов дает те же векторы реальных токов фаз в линии, которые изображены на рис. 5, с учетом разных масштабов рисунков.

Отметим также, что ввиду отсутствия нагрузки токи всех фаз в конце линии нулевые. Это означает, что и тока нулевой последовательности (как и других последовательностей) в конце линии нет, он, как и реальные токи фаз, убывает по мере продвижения к концу линии. Поэтому неоправданное применение упрощенных схем замещения, предполагающих неизменный продольный ток (типа схемы, представленной на рис. 4), может привести к неадекватным выводам. Как показал расчет, токи в первичных обмотках вспомогательного трансформатора в этом режиме малы и являются намагничивающим током (рис. 7).

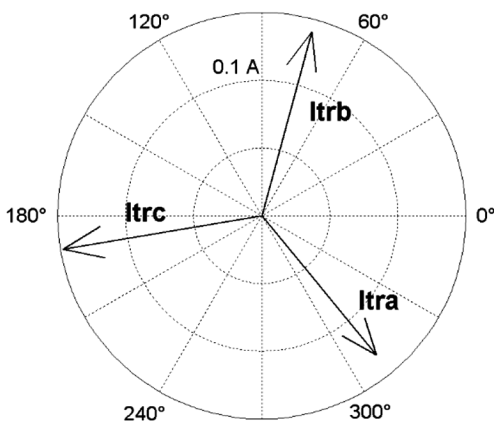


Рис. 7. Токи в фазах первичной обмотки вспомогательного трансформатора в режиме изолированной нейтрали

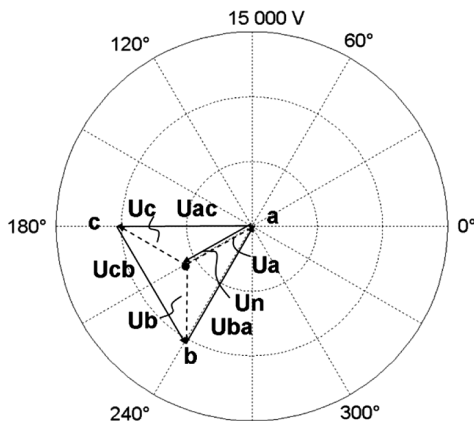


Рис. 8. Напряжения фаз вторичной обмотки основного трансформатора относительно земли при замыкании

Рассмотрим далее величины напряжений в данном режиме. На рис. 8. представлены векторы напряжений обмоток основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через небольшое сопротивление $R_{10} = 4 \text{ Ом}$. Видно, что треугольник линейных напряжений вторичной обмотки основного трансформатора одной из вершин практически касается нулевой точки. Реальное напряжение в этой вершине треугольника относительно земли составляет десятки вольт и незаметно по сравнению с фазным напряжением. Пунктиром показаны напряжения обмоток вспомогательного трансформатора, а его нейтраль, как и следовало ожидать, находится под фазным потенциалом относительно земли, что отображается вектором U_n , показанным сплошной линией.

Рассмотрим, как изменятся токи и напряжения в схеме при замыкании фазы на землю через большее сопротивление, равное величине $R_{10} = 400 \text{ Ом}$. На рис. 9, 10 представлены соответственно ВД токов и напряжений в схеме. Из рис. 9 видно, что картина токов фаз в начале линии существенно изменилась, ток поврежденной фазы меньше отличается от токов здоровых фаз, что и следовало ожидать при увеличении сопротивления в месте повреждения. Токи фаз a и b находятся почти в противофазе и близки по величине, т. е. почти компенсируют друг друга, а ток фазы c находится практически в противофазе с током в месте повреждения I_p . Как и ранее, сумма токов фаз ($I_a + I_b + I_c$) уравнивается током повреждения, и токи нулевой последовательности замыкаются в контуре, образованном емкостями линии и сопротивлением R_{10} .

На рис. 10. представлена ВД напряжений фаз вторичной обмотки основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через сопротивление $R_{10}=400 \text{ Ом}$. Видно, что собственно треугольник линейных напряжений практически не меняется, а перемещается параллельно сам себе, при этом изменяются потенциалы всех его вершин, в том числе и вершины, связанной с землей в месте повреждения. Этот

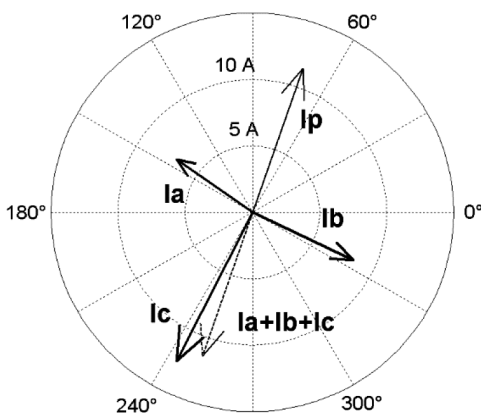


Рис. 9. ВД токов в линии (Ia, Ib, Ic) и в заземляющем сопротивлении R10 (Ip) для случая R10 = 400 Ом

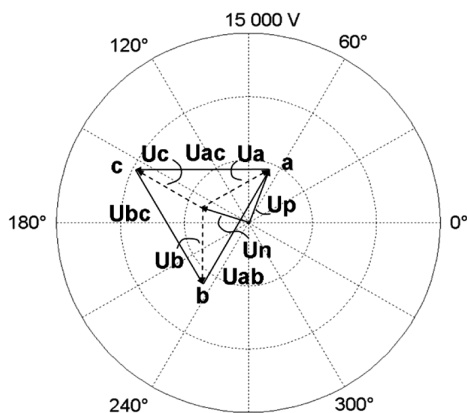


Рис. 10. Напряжения фаз вторичных обмоток основного трансформатора относительно земли при замыкании на землю через R10 = 400 Ом

потенциал отображен на рис. 10 вектором U_p . При этом одновременно меняется и напряжение нейтрали относительно земли, равное вектору U_n .

Напряжения фаз обмотки вспомогательного трансформатора, соединенной в звезду, остаются постоянными и по ним протекают только токи намагничивания, аналогично рис. 6. Таким образом, при изменении величины сопротивления в точке повреждения картина токов и напряжений в схеме изменяется, причем меняются как величины, так и фазы векторов, меньшему значению сопротивления в точке повреждения соответствует больший ток.

Рассмотрим этот вопрос более подробно, чтобы отследить закономерности изменения токов и напряжений в этом режиме. На рис. 11 представлены результаты расчетов напряжений фаз обмотки основного трансформатора относительно земли при ступенчатом изменении сопротивления в месте замыкания на землю в диапазоне 4–1800 Ом. Видна эволюция векторов напряжения U_p в точке повреждения.

При малом сопротивлении вершина треугольника сравнительно немного смещена относительно нуля, заметное смещение появляется при $R = 40$ Ом (точка, обозначенная цифрой 40), при этом величина напряжения U_p в точке повреждения равна приблизительно 650 В. При его увеличении конец вектора напряжения U_p (как известно из курса ТОЭ для ли-

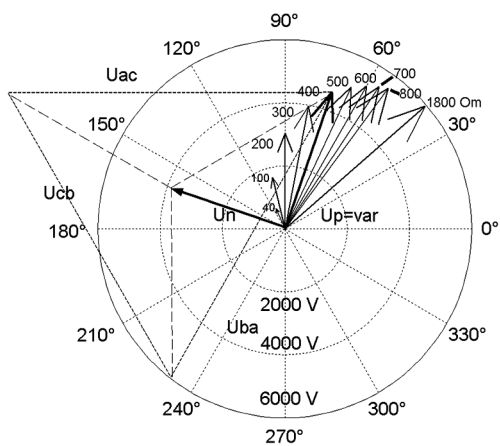


Рис. 11. Напряжения обмоток фаз основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через переменное сопротивление R10 = 4–1800 Ом

нейных цепей [10]) описывает дугу окружности, а его величина достигает в пределе фазного напряжения. Векторы напряжений U_p и U_n для промежуточного случая $R_{10} = 400$ Ом выделены более толстой линией, а треугольник напряжений вторичной обмотки основного трансформатора показан пунктиром для этого же значения сопротивления в месте повреждения. В предельном положении при достаточно большом значении сопротивления повреждения, что соответствует фактически отсутствию замыкания на землю, центр треугольника совпадает с началом координат.

Аналогично ведет себя и напряжение нейтрали, конец вектора этого напряжения также опишет дугу окружности. Максимальное напряжение, равное фазному (как это видно и из рис. 10), будет при нулевом сопротивлении в точке повреждения, а минимальное, равное нулю, при отсутствии повреждения. Аналогичный результат получен и в [4] на основе аналитических выкладок с использованием упрощенной схемы замещения сети.

Рассмотрим далее изменение тока в месте повреждения. На рис. 12 показаны векторы тока в месте повреждения при дискретном изменении сопротивления в месте замыкания на землю в диапазоне 4–1800 Ом. Видна эволюция вектора тока I_p в точке повреждения. Как и в случае с напряжением, в линейной цепи конец вектора тока описывает дугу окружности, и меньшему значению сопротивления соответствует, очевидно, больший ток. Таким образом, в данном случае при изменении сопротивления в месте повреждения треугольник линейных напряжений смещается относительно земли, так что потенциал вершины, которая непосредственно связана с местом повреждения, изменяется от нуля при металлическом к. з. до фазного при отсутствии повреждения, как и должно быть. Соответственно, изменяется и напряжение нейтрали от фазного при металлическом к. з. до нуля при отсутствии повреждения. Токи в фазах в начале линии несимметричны и их сумма не равна нулю, что указывает на протекание в фазах токов нулевой последовательности. Сумма этих токов равна по модулю и противоположна по фазе току в месте повреждения, т. е. эти токи замыкаются в контурах, образованных емкостями линии и сопротивлением в точке повреждения.

Моделирование, проведенное для случая, когда повреждение происходит в конце линии, показало, что закономерности изменения напряжений в линии имеют аналогичный предыдущему случаю характер. Треугольник линейных напряжений также смещается параллельно самому себе, небольшое отличие состоит лишь в величине напряжения в точке повреждения. Причем в режиме холостого хода линии напряжение поврежденной фазы в конце незначительно превышает напряжение в ее начале. Например, при сопротивлении в точке повреждения равном 4 Ом, напряжение на поврежденной фазе в начале линии составляет около 70 В, а в конце линии около 80 В.

Рассмотрим далее токи в начале при повреждении в конце линии и при $R_4 = 4$ Ом. Сопротивление R_{10} при этом принято достаточно большим. На рис. 13 приведена ВД токов в начале линии I_a , I_b , I_c и тока I_p в месте повреждения

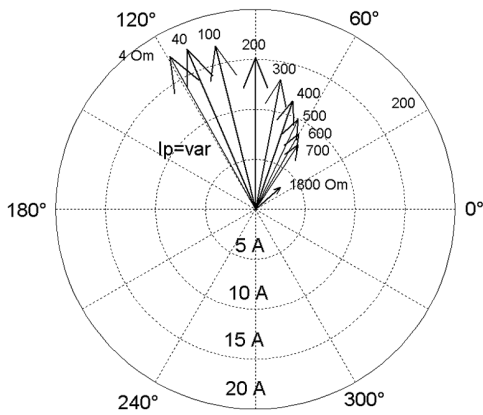


Рис. 12. Изменение величины тока I_p в месте повреждения при замыкании через переменное сопротивление $R_{10} = 4-1800 \text{ Ом}$

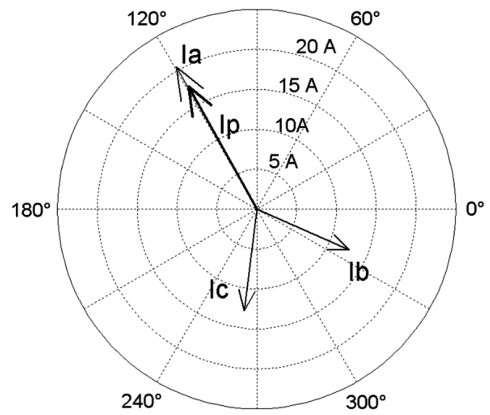


Рис. 13. ВД токов в начале линии I_a, I_b, I_c и тока I_p в месте повреждения при замыкании на землю в конце линии

в конце линии. Отметим, что в данном случае ток поврежденной фазы в начале линии становится больше токов здоровых фаз, так как на величину тока фазы A (ток I_a на рис. 5) существенно влияет еще ток I_p , текущий к месту повреждения. Разница токов поврежденной фазы I_a и тока в месте повреждения в конце линии I_p практически дает емкостной ток, который был в поврежденной фазе при замыкании в начале. Вместе с тем отметим, что в данном случае сумма токов в начале линии в отличие от предыдущего равна нулю. Это означает отсутствие токов нулевой последовательности в начале линии. Для пояснения этого на рис. 14 приведены векторы симметричных составляющих токов в начале линии. Видно, что в данном режиме в начале линии есть только составляющие токов прямой (I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}) и обратной последовательности (I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}), а нулевая последовательность отсутствует.

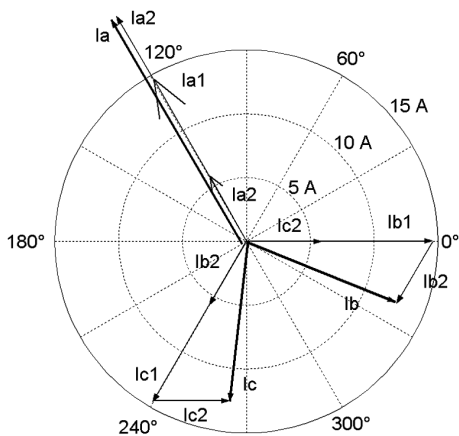


Рис. 14. Симметричные составляющие токов I_a, I_b, I_c в начале линии при замыкании на землю в конце

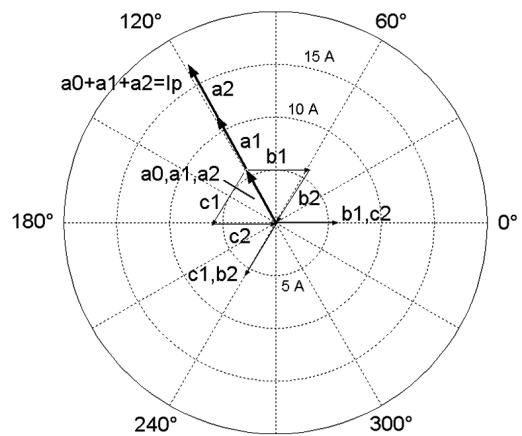


Рис. 15. Симметричные составляющие токов в конце линии

Складывая соответствующие векторы, получаем полные фазные токи I_a , I_b , I_c , совпадающие с приведенными на рис. 13. Рассмотрим для полноты картины симметричные составляющие токов в конце линии. При отсутствии нагрузки ток будет только в поврежденной фазе А. Расчет симметричных составляющих токов в конце линии (измеренных до точки повреждения) показал, что, в конце линии есть симметричные составляющие всех трех последовательностей. На рис. 15 приведены ВД симметричных составляющих токов. Для тока поврежденной фазы А сумма соответствующих составляющих дает ток в месте повреждения I_p , а для оставшихся двух фаз токи получаются нулевые. Таким образом, и в данном случае токи нулевой последовательности замыкаются через распределенные емкости линии и сопротивление в месте повреждения.

2. Установившийся режим кабельной распределительной сети с полной компенсацией емкостного тока. Рассмотрим далее режим полной компенсации емкостного тока с помощью дугогасящего реактора. Путем проведения серии расчетов для данного случая было подобрано значение индуктивности дугогасящего реактора, обеспечивающее минимальный ток в месте повреждения для рассматриваемого участка сети, равное 1,078 Гн. Проведенные расчеты показали, что картина распределения напряжения на линии практически аналогична полученной для предыдущего случая изолированной нейтрали, зависит лишь от величины сопротивления в месте повреждения, а изменяется лишь распределение токов в схеме. Сначала рассмотрим повреждение в начале линии. На рис. 16 показана ВД токов в начале линии при повреждении в начале линии через сопротивление 4 Ом (сопротивление 10 на рис. 4).

Из рис. 16 видно, что сумма токов ($I_a + I_b + I_c$) (показанная пунктирной линией) представляет собой утроенный ток нулевой последовательности и равна по модулю и противоположна по фазе току I_n в сопротивлении реактора 5, включенного в нейтраль первичной обмотки вспомогательного трансформатора. Таким образом, и в данном режиме, аналогично тому, как это происходит

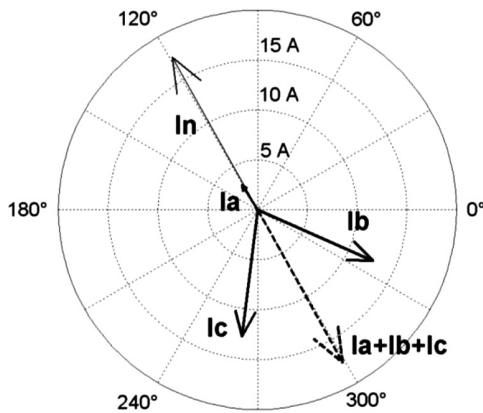


Рис. 16. ВД токов в начале линии при повреждении в начале линии через сопротивление 4 Ом

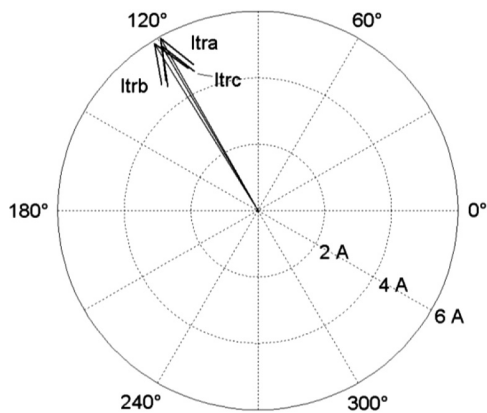


Рис. 17. ВД токов в первичных обмотках вспомогательного трансформатора

при замыкании в начале линии при изолированной нейтрали, токи нулевой последовательности циркулируют через распределенные емкости линии. Однако теперь они замыкаются через сопротивление дугогасящего реактора и обмотки вспомогательного трансформатора, соединенные в звезду. При этом ток в сопротивлении повреждения I_0 и напряжение на нем близки к нулю, как и должно, быть в режиме полной компенсации.

На рис. 17 показаны токи в фазах первичной обмотки вспомогательного трансформатора. Видно, что эти токи I_{tra} , I_{trb} , I_{trc} близки по фазе и являются для вспомогательного трансформатора практически токами нулевой последовательности. Отметим, что их рассчитанная сумма, как и должно быть, равна току в дугогасящем реакторе 5, включенном в нейтраль этой обмотки. На рис. 18 показаны ВД токов от питающих обмоток треугольника основного трансформатора $I_{a'}$, $I_{b'}$, $I_{c'}$ совместно с токами в обмотках вспомогательного трансформатора I_{tra} , I_{trb} , I_{trc} и токами в начале линии I_a , I_b , I_c . Как следует из рис. 18, питающие токи, равные сумме токов соответствующих обмоток вспомогательного трансформатора и токов в начале линии (рис. 4), при наличии дугогасящего реактора становятся симметричными, несмотря на несимметрию токов в начале самой линии. Таким образом, включение дугогасящего реактора оказывает симметрирующий эффект. Расчет показал, что при этом во вторичном замкнутом треугольнике вспомогательного трансформатора также протекает ток нулевой последовательности. В данном случае вспомогательный трансформатор работает в режиме короткого замыкания для токов нулевой последовательности. Моделирование режимов при увеличении величины сопротивления повреждения свыше 4 Ом показало, что ток в месте повреждения при этом практически не изменяется, работает принцип компенсации тока в месте повреждения.

Напряжение в точке повреждения изменяется в соответствии с ВД на рис. 19, описывая, как и ранее, дугу окружности в соответствии с ростом сопротивления

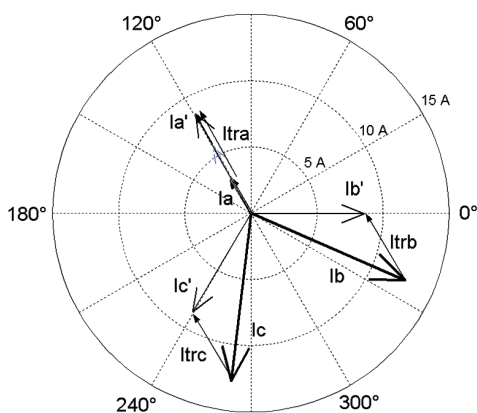


Рис. 18. ВД токов в линии с учетом токов в первичных обмотках вспомогательного трансформатора

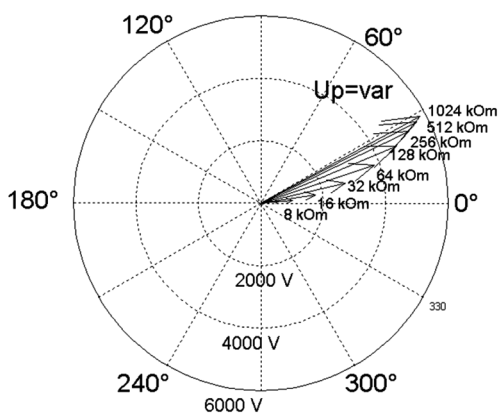


Рис. 19. ВД напряжений в точке повреждения при изменении сопротивления в этой точке

и может достигать опасных величин. Отметим, что упомянутые напряжения изменяются по разным законам, однако начальная и конечная точки дуг, описываемых векторами напряжений в месте повреждения U_p , совпадают для линии с изолированной и компенсированной нейтралью. При малом сопротивлении вершины треугольников, примыкающие к точке повреждения, сливаются с началом координат, при этом в обоих случаях напряжение нейтрали равно фазному. При большом сопротивлении, моделирующем отсутствие повреждения, центры треугольников линейных напряжений совпадают с началом координат, тока в нейтрали в обоих случаях нет и режим симметричный. Анализ режима с повреждением **в конце** линии при изменении сопротивления повреждения показало, что напряжение и ток в месте повреждения изменяются аналогичным образом.

Заключение. 1. В результате моделирования получена наглядная картина происходящих процессов в кабельной линии при однофазном замыкании на землю в начале и конце линии через некоторое сопротивление для случаев изолированной и компенсированной нейтрали электрической сети.

2. При уменьшении величины сопротивления в месте повреждения от максимума до нуля (крайние положения треугольника линейных питающих напряжений) **независимо от режима нейтрали** треугольник линейных питающих напряжений перемещается так, что его подключенная к месту повреждения вершина описывает дугу окружности, при этом величина напряжения смещения нейтрали изменяется соответственно от нуля (нет повреждения) до фазного напряжения. Однако для компенсированной линии отличие состоит в существенно другой кривизне траектории изменения вектора напряжения в точке повреждения.

3. При **изолированной нейтрали** и повреждении **в начале** линии в нее втекают токи прямой и нулевой последовательностей, которые уменьшаются до нуля по мере приближения к концу. Конец вектора тока повреждения при таком же как и ранее изменении сопротивления описывает (аналогично напряжению в месте повреждения) дугу окружности, достигая максимальной предельной величины при приближении сопротивления к нулю. Если повреждение происходит в конце линии, в начале линии есть только токи прямой и обратной последовательностей и нет токов нулевой последовательности. В свою очередь, в конце линии есть одинаковые токи всех трех последовательностей, что приводит к тому, что остается только ток в поврежденной фазе, а в остальных фазах токи нулевые.

4. При **компенсированной линии** ток в месте повреждения близок к нулю **независимо** от его места. Зато в нейтрали вспомогательного трансформатора протекает утроенный ток нулевой последовательности. При повреждении **в начале** линии в нее втекают токи прямой и нулевой последовательностей, которые уменьшаются до нуля по мере приближения к концу, где токи всех фаз нулевые.

Список использованных источников

1. Вильгельм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгельм, М. Уотерс. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
2. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1971. – 152 с.
3. Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических систем / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. – Киев : АН СССР, 1985. – 264 с.
4. Вайнштейн, Р. А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, В. В. Шестакова. – Томск : ТПУ, 2006. – 118 с.
5. Кабельные и воздушные линии электропередачи / Н. П. Бадалян [и др.]. – Владимир : ВлГУ, 2019. – 260 с.
6. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6–35 : утв. ГПО «Белэнерго» 01.08.20046-35 кВ. – Минск : Белэнерго, 2004.
7. Кадомская, К. П. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6–35 кВ различного назначения / К. П. Кадомская, А. Б. Виштибеев // Режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ : науч.-техн. конф. : докл. – Новосибирск, 2000.
8. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината / М. В. Ильных [и др.] // Новости электротехники. – 2007. – № 2 (44).
9. Евдокунин, Г. А. Резистивное заземление нейтрали сетей 6–10 кВ / Г. А. Евдокунин, С. С. Титенков. – СПб. : Терция, 2009. – 264 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1973. – 752 с.

References

1. Vil'gel'm, R. Zazemlenie nejtrali v vysokovol'tnyh sistemah / R. Vil'gel'm, M. Uoters. – M. : Gosenergoizdat, 1959. – 415 s.
2. Lihachev, F. A. Zamykaniya na zemlyu v setyah s izolirovannoj nejtral'yu i kompensaciej emkostnyh tokov / F. A. Lihachev. – M. : Energiya, 1971. – 152 s.
3. Sirota, I. M. Rezhimy nejtrali elektricheskikh sistem / I. M. Sirota, S. N. Kislenco, A. M. Mihajlov. – Kiev : AN SSSR, 1985. – 264 s.
4. Vajnshtejn, R. A. Rezhimy zazemleniya nejtrali v elektricheskikh sistemah / R. A. Vajnshtejn, N. V. Kolomic, V. V. SHeStakova. – Tomsk : TPU, 2006. – 118 s.
5. Kabel'nye i vozdushnye linii elektropredachi / N. P. Badalyan [et al.]. – Vladimir : VIGU, 2019. – 260 s.
6. Tipovaya instrukciya po kompensacii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskoi seti 6–35 : utv. GPO «Belenergo» 01.08.20046-35 kV. – Minsk : Belenergo, 2004.
7. Kadomskaya, K. P. O rezistivnom zazemlenii nejtrali v setyah 6–35 kV razlichnogo naznacheniya / K. P. Kadomskaya, A. B. Vishtibeev // Rezhimy zazemleniya nejtrali setej 6–35 kV : nauch.-tekhn. konf. : dokl. – Novosibirsk, 2000.
8. Kompensirovannaya i kombinirovanno zazemlennaya nejtral'. Opyt ekspluatatsii seti 6 kV metallurgicheskogo kombinata / M. V. Il'nyh [et al.] // Novosti elektrotekhniki. – 2007. – № 2 (44).
9. Evdokunin, G. A. Rezistivnoe zazemlenie nejtrali setej 6–10 kV / G. A. Evdokunin, S. S. Titenkov. – SPb. : Terciya, 2009. – 264 s.
10. Bessonov, L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki / L. A. Bessonov. – M. : Vyssh. shk., 1973. – 752 s.