

О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ

В.А. ШУИН, Е.А. МУРЗИНА, О.А. ДОБРЯГИНА
Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ)
Россия
shuin@rza.ispu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрические сети 6-10 кВ, замыкания на землю, переходные процессы, схема замещения.

1 ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в исследовании переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или с высокоомным заземлением через резистор, в частности, в сетях 6-10 кВ, возникает при решении следующих задач:

- анализ спектра и оценка параметров и соотношений переходных токов и напряжений, используемых для действия защит от данного вида повреждений, реагирующих на переходный процесс;
- анализ влияния переходных процессов на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов);
- определение места (зоны) повреждения на ЛЭП с использованием волновых или параметрических методов;
- оценка максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся;
- определением эффективного (среднеквадратичного) значения тока в месте повреждения для оценки термической стойкости ограничителей перенапряжений и других элементов при дуговых перемежающихся ОЗЗ и др.

В настоящее время наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей (схем замещения) электрической сети и имитационного моделирования на ЭВМ с применением более точных, и соответственно, более сложных моделей сети и ее элементов. Поэтому совершенствование методов аналитического расчета переходных процессов при ОЗЗ в сетях в целях повышения их точности является актуальной задачей.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Классификация известных аналитических решений уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ

В переходном процессе при ОЗЗ условно выделяют две основные стадии, связанные соответственно с разрядом емкостей поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз, которым соответствуют две основные частотные составляющие. С учетом этого все схемы замещения можно разделить на 2 группы:

- схемы, учитывающие наличие в переходных токах и напряжениях двух частотных составляющих – разрядной и зарядной (такие схемы замещения могут быть названы двухчастотными) [например, 1];

– схемы, учитывающие наличие в переходных токах и напряжениях одной, зарядной или разрядной, частотной составляющей (одночастотная схема замещения) [2–5 и др.].

В некоторых случаях применяются более сложные схемы замещения, учитывающие многочастотный характер разрядной стадии переходного процесса при ОЗЗ (например, 3-х частотная схема замещения, учитывающая в разрядных токах две частотные составляющие [6]).

Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ на моделях, учитывающих реальную конфигурацию сетей 6-10 кВ и распределенный характер параметров линий

В большинстве работ, как было отмечено выше, для получения аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ используется одночастотная схема замещения, учитывающая, как правило, только зарядную составляющую в переходных токах и напряжениях. В [7] на основе исследований, выполненных на физической модели кабельной сети 6-10 кВ, учитывающей распределенный характер параметров линий, показано, что пренебрежение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ влиянием разрядной составляющей переходного тока может приводить к значительным погрешностям в оценке амплитуды полного тока, рассчитываемой свободной составляющей, а также среднеквадратичного значения переходного тока при дуговых перемежающихся замыканиях. С учетом этого в [1] для расчетов переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ предложена двухчастотная схема замещения, учитывающая наличие в переходных токах и напряжениях разрядной и зарядной составляющих (рис. 1).

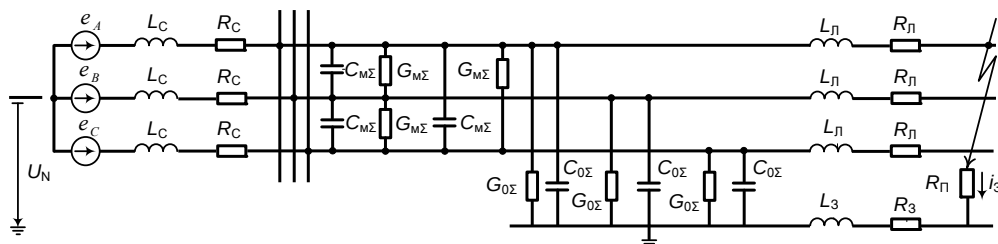


Рис. 1. Двухчастотная схема замещения сети 6-10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ [1]

В целях оценки точности расчетов и определения области применения двухчастотной и одночастотных схем замещения с использованием системы моделирования Matlab были проведены исследования переходных процессов при ОЗЗ на математических моделях кабельных сетей 6-10 кВ, учитывающих реальную их конфигурацию, распределенный характер параметров линий, средние значения параметров линий (длин, сечений) и других элементов и диапазоны их изменения. В качестве основного объекта исследований были выбраны кабельные сети 6-10 кВ систем промышленного электроснабжения, имеющие более сложную конфигурацию, чем кабельные сети другого назначения. При исследованиях моделировались ОЗЗ на шинах центра питания (ЦП) и в промежуточных точках сети (на шинах распределительных (РП) и трансформаторных (ТП) подстанций), а также в промежуточных точках кабельных линий (например, рис. 2, 3).

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что представление переходного процесса при ОЗЗ как одночастотного может приводить к существенным погрешностям в оценке амплитуд переходных токов и его составляющих. Однако применение таких схем допустимо при оценке максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах и в нейтрали сети при дуговых перемежающихся ОЗЗ, на которые разрядная составляющая, как правило, не оказывает существенного влияния (например, рис. 3).

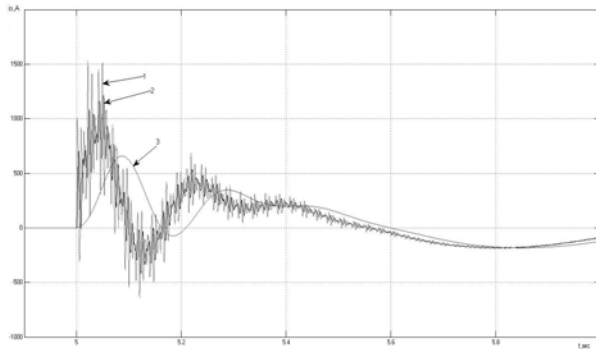


Рис. 2. Расчетные осциллограммы переходного тока в месте повреждения при ОЗЗ в промежуточной точке сети (на шинах ТП): 1 – ток в месте ОЗЗ (исходный сигнал); 2 – сигнал переходного тока, пропущенный через ФНЧ с частотой среза 100 кГц; 3 – то же самое при частоте среза ФНЧ 5 кГц

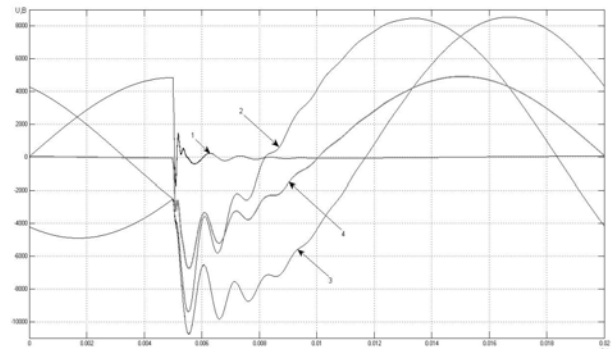


Рис. 3. Расчетные осциллограммы переходных напряжений на шинах ЦП при ОЗЗ в промежуточной точке сети (на шинах ТП): 1 – напряжение поврежденной фазы "А"; 2 – напряжение в нейтрали; 3, 4 – напряжения неповрежденных фаз "В" и "С" соответственно

Исследования на моделях показали также, что схема замещения по рис. 1 позволяет с достаточной точностью рассчитать разрядную составляющую переходного тока только при ОЗЗ в конце линий, но не в промежуточных точках линии (сети), т.к. не учитывает влияние емкостей элементов, расположенных за местом пробоя изоляции. Указанные емкости (поврежденной линии за местом ОЗЗ и емкости линий, подключенных к шинам питаемого по линии объекта – ТП, РП) приводят к появлению дополнительных высокочастотных разрядных составляющих и обуславливают явно выраженный многочастотный характер разрядной составляющей (рис. 2). Дополнительные высокочастотные разрядные составляющие, имеющие, как правило, частоту порядка десятков и сотен килогерц, приводят к "зашумлению" основной составляющей, однако при изменении расчетных условий (параметров питающей системы, линий и места ОЗЗ в сети) практически не влияют на частоту и амплитуду основной разрядной составляющей.

В устройствах защиты от ОЗЗ, основанных реагирующих на электрические величины переходного процесса, используется спектр частот в диапазоне до 3-5 кГц, в котором сосредоточено более 90% энергии сигнала. Составляющие с частотами выше указанной не оказывают также существенного влияния на работу устройств защиты, основанных на использовании различных составляющих установившегося тока ОЗЗ, на максимальные перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях на землю и на интегральное значение тока в месте повреждения. Поэтому при решении практически всех указанных выше задач, связанных с расчетами токов переходного процесса при ОЗЗ, высокочастотными составляющими разрядного тока, кроме основной частотной составляющей тока разряда (например, кривая 3, рис. 2), можно пренебречь.

Поэтому при расчете основной разрядной составляющей влиянием емкостей сети, расположенных за местом ОЗЗ, можно пренебречь, однако эти емкости должны учитываться при расчете зарядной и принужденной составляющих.

Схема замещения для анализа переходных процессов при ОЗЗ и определение ее параметров

С учетом изложенного выше расчетную схему замещения сети кабельной сети 6-10 кВ для анализа переходных процессов при ОЗЗ не только в конце линии, но и в промежуточных точках можно представить в виде, показанном на рис. 4.

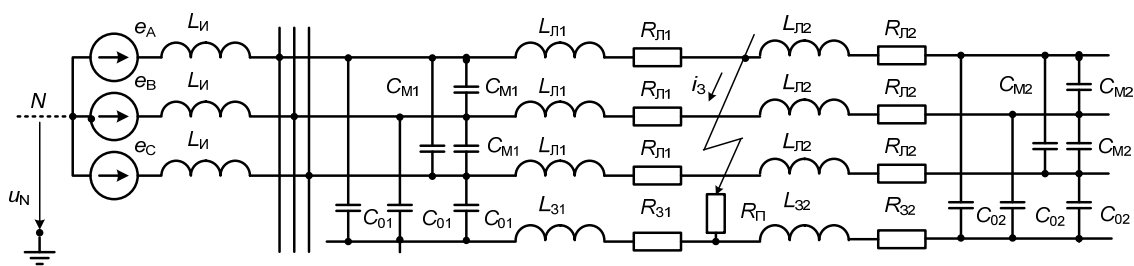


Рис. 4. Расчетная схема замещения сети 6-10 кВ для анализа переходных процессов при ОЗЗ с учетом влияния емкостей элементов, расположенных за местом повреждения

Переходный процесс при ОЗЗ в схеме по рис. 4 описывается дифференциальным уравнением 6-го порядка, т.е. исходная схема замещения является трехчастотной. Для приведения данной схемы к двухчастотной при расчете основной разрядной составляющей в схеме замещения по рис. 1 принимается: $C_{0\Sigma} = C_{01}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1}$, $L_L = L_{L1}$, $L_3 = L_{31}$, $R_L = R_{L1}$, $R_3 = R_{31}$, а при расчете зарядной и принужденной составляющих – $C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1} + C_{M2}$.

Такой подход к расчету разрядной и зарядной составляющих позволяет также приближенно учесть зависимость индуктивностей поврежденной линии L_{L1} и L_{31} от частоты. При расчете разрядной составляющей указанные индуктивности достаточно точно определяются по скорости распространения волн в каналах "фаза – фаза" и "фаза – земля", а при расчете зарядной составляющей, имеющей частоту в пределах 200 ... 3000 Гц, примерно равной индуктивности линий на частоте 50 Гц. Решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ для двухчастотной схемы замещения с использованием метода симметричных составляющих приведено в [1].

На рис. 5 в качестве примера дано сравнение результатов расчета разрядной и зарядной составляющих переходного тока на модели сети 6 кВ, учитывающей ее реальную конфигурацию и распределенный характер параметров линий, и по двухчастотной схеме замещения по рис. 1, параметры которой определялись с учетом изложенной выше методики (для упрощения сравнения оба сигнала – полученный моделированием на ЭВМ и расчетный пропущены через ФНЧ с частотой среза 5 кГц).

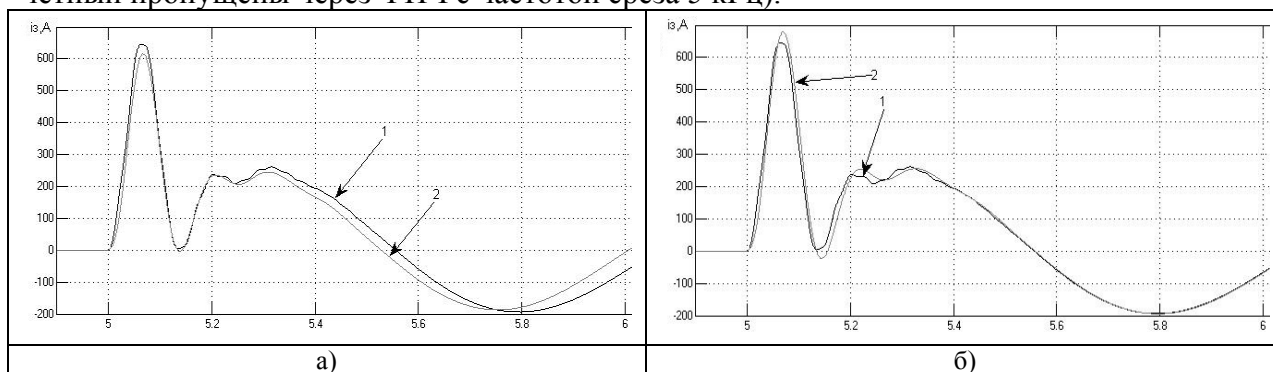


Рис. 5. Сравнение осциллограмм переходных токов при ОЗЗ, полученных на модели кабельной сети 6 кВ с распределенными параметрами линий (кривая 1) и по двухчастотной схеме замещения с различными параметрами элементов для разрядной и зарядной составляющих (кривая 2): а – расчет без учета емкостей элементов за местом ОЗЗ; б – расчет с учетом емкостей элементов за местом ОЗЗ

Из рис. 5, а можно видеть, что исключение из расчетной схемы замещения емкостей элементов, расположенных за местом повреждения C_{02} , C_{M2} , обеспечивает приемлемую точность расчета основной разрядной составляющей, но приводит к заметным погрешностям в определении зарядной составляющей. Для повышения точности расчетов последней в схеме замещения для расчета зарядной составляющей должно быть учтено влияние емкостей C_{02} , C_{M2} (рис. 5, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе исследований переходных процессов при ОЗЗ на моделях, учитывающих реальную конфигурацию кабельных сетей 6-10 кВ и распределенный характер параметров линий, показано, что разрядная составляющая переходного тока из-за влияния емкостей элементов, расположенных за местом пробоя изоляции, имеет явно выраженный многочастотный характер, однако влиянием обусловленных указанными емкостями дополнительных высокочастотных разрядных составляющих при решении большинства практических задач можно пренебречь.

2. Двухчастотная схема замещения сети 6-10 кВ, предложенная в [1], позволяет обеспечить достаточную точность расчетов только при ОЗЗ в конце линии.

3. Для повышения точности расчетов определение основной разрядной и зарядной составляющих должно производиться по двухчастотным схемам замещения с различными параметрами элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. – 1991, № 10. – С. 58 – 61.
- [2] Сирота И.М., Масляник В.В. Свободные емкостные токи замыкания на землю в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю // Электричество, 1977, № 3. – С. 38 – 43.
- [3] Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. - М.: Энергия, 1971.
- [4] Шуляк В.Г. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия ВУЗов. Энергетика, 1969, № 1. – С. 1 - 9.
- [5] Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество, 1957, № 5. – С. 31 – 36.
- [6] Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания на землю в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество, 2005, № 6. – С. 9 – 19.
- [7] Шуин В.А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество, 1983, № 12. С. 4 – 9.