

Влияние заземленных трансформаторов на чувствительность дистанционной защиты от коротких замыканий на землю

М. Н. Семенов¹, Е. Г. Степанова²

Казанский государственный энергетический университет;
Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги
Казань, Россия

¹maxim.snt@inbox.ru, ²lenochka2997@mail.ru

Аннотация. Дистанционная защита позволяет защищать линии электропередачи от коротких замыканий на землю. В энергосистеме находится множество заземленных трансформаторов, которые являются источником тока подпитки при коротких замыканиях на землю. Данная подпитка влияет на работу дистанционной защиты и может вызвать неселективное отключение поврежденных на линии. В программном комплексе PSCAD была построена модель энергосистемы, которая показала работу дистанционной защиты при коротком замыкании на землю в сети с заземленными трансформаторами. Анализ симуляции показал, что чувствительность дистанционной защиты снижается при наличии заземленных трансформаторов. Повысить чувствительность можно, увеличив коэффициент компенсации тока нулевой последовательности от вычисленного номинального значения.

Ключевые слова: дистанционная защита от замыканий на землю; чувствительность; компенсация тока нулевой последовательности; заземленные трансформаторы

I. ВВЕДЕНИЕ

Дистанционная защита (ДЗ) применяется в энергосистеме России как защита линий электропередачи (ЛЭП) от междуфазных коротких замыканий (КЗ). Для защиты от замыканий на землю в основном используется токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП), которая использует ток и мощность нулевой последовательности короткого замыкания. Но ТЗНП обладает рядом недостатков, которые могут быть устранены при применении ДЗ от всех видов замыканий на землю [1].

С середины прошлого века было известно, что ДЗ в принципе может защищать линию как от междуфазных КЗ, так и от замыканий на землю. Но в то время, применялись электромеханические реле, выпускать серийно ДЗ от всех видов КЗ было достаточно сложным процессом из-за высокой технологически не простой задачей по сборке устройства и высокой стоимости. Массовый переход особенно с начала XXI века от электромеханических реле на микропроцессорные предоставил возможность реализовать данную идею, т.к. физически все остается таким же, как для ДЗ с применением электромеханических реле, кроме некоторых несущественных деталей. Вместе с тем, быстрый переход не был возможен, в том числе, из-за недостаточной нормативно-технической базы и отсутствия рекомендаций по расчету параметров настройки и определения замеров ДЗ. Следует особенно отметить, дополнительную сложность при расчетах

добавляет наличие разветвленной сети, которая изобилует множеством параллельных линий и наличием большого количества отпаяк.

Все вышеуказанные факторы влияют на селективность и чувствительность защиты, поэтому необходимо подобрать правильные способы и методики определения замера в данных режимах работы сети [2].

II. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

Особенностью ДЗ реагирующая на токи короткого замыкания на землю в сети 110–220 кВ является использование фазного напряжения поврежденной фазы и скомпенсированного фазного тока. Компенсация происходит за счет учета тока нулевой последовательности и коэффициента компенсации, зависящего от удельных сопротивлений прямой и нулевой последовательности линии [3].

Формула выглядит следующим образом:

$$Z_{\phi 0} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi} + k_0 \cdot I_0} \quad (1)$$

где $Z_{\phi 0}$ – дистанционный замер в месте установки защиты; U_{ϕ} – фазное напряжение поврежденной фазы в месте установки защиты; I_{ϕ} – фазный ток поврежденной фазы в месте установки защиты; k_0 – коэффициент компенсации тока нулевой последовательности, определяемый по удельным параметрам защищаемой линии ($Z_{0л} - Z_{1л}$)/ $Z_{1л}$.

I_0 – ток нулевой последовательности, измеренный в месте установки защиты.

Фазное напряжение будет определяться следующим образом:

$$U_{\phi} = Z_{1к} \cdot I_{\phi} + I_0 \cdot (Z_{0к} - Z_{1к}) \quad (2)$$

где $Z_{1к}$ и $Z_{0к}$ – сопротивление прямой и нулевой последовательности от места установки защита до точки КЗ.

III. ВЛИЯНИЕ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Заземленный трансформатор при коротком замыкании на землю является дополнительным источником питания тока нулевой последовательности. Ток, протекающий через нейтраль трансформатора, будет вызывать дополнительное падение напряжения в контуре КЗ (рис. 1).

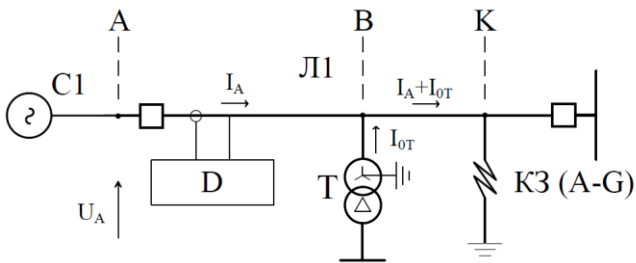


Рис. 1. Влияние заземленных нейтралей на замер сопротивления

Данное явление вызовет изменение измеряемого значения сопротивления, что отразится на работе ДЗ.

Напряжение в месте установки защиты будет состоять из значений симметричных составляющих (прямой, обратной и нулевой) и будет выглядеть следующим образом:

$$U_A = Z_{1K} \cdot (I_{A1} + I_{A2} + I_0) + I_0 \cdot (Z_{0K} - Z_{1K}) + Z_{0BK} \cdot I_{0T} \quad (3)$$

Сравнивая выражения (3) и (2), становится понятно, что при влиянии заземленных трансформаторов нельзя использовать формулу (1), иначе замер сопротивления будет определен неправильно в сторону увеличения, что может привести к уменьшению зоны срабатывания и неселективному отключению [4].

IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

A. Модель дистанционной защиты

Дистанционная защита будет представлена моделью, представленной на рисунке 2, состоящая из двух больших блоков: Signal Processing и Protection Scheme.

- Signal Processing – данный блок представлен для расчета значений тока и напряжения симметричных составляющих. Перед этим фазные значения тока проходят через алгоритм быстрого преобразования Фурье, чтобы вычлнить значения амплитуды и фазы первой гармоники.
- Protection Scheme – в данном блоке представлена схема работы ДЗ. Она состоит из элемента для расчета замера, самого устройства дистанционной защиты с круговой характеристикой и выходными сигналами о срабатывании защиты.

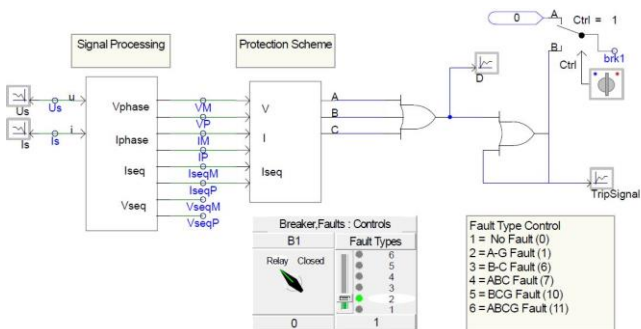


Рис. 2. Модель дистанционной защиты

B. Построение модели

Для определения зависимости увеличения замера сопротивления дистанционной защиты от количества заземленных трансформаторов, их мощности и места

установки построим математическую модель энергосистемы (рис. 3).

Модель будет состоять из следующих элементов: системы C1 и C2, 3 линии электропередачи, 3 трансформатора 110/10, 4 нагрузки и ДЗ в начале линии Л1. От линии Л1 отходят 2 отпайки, одна из них с ЛЭП. Параметры элементов энергосистемы приведены в таблицах I-IV.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ-ИСТОЧНИКОВ

Параметр	Обозначение, ед.изм	C1	C2
Напряжение	$U_{НОМ}$, кВ	110	110
Импеданс	Z_s , Ом	10, deg10	7, deg5

ТАБЛИЦА II ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Параметр	Обознач.	Л1	Л2	Л3
Длина	L, км	60	50	16
Акт. сопр.	r_0 , Ом/км	0.118	0.118	0.118
Инд. сопр.	x_0 , Ом/км	0.435	0.435	0.435

ТАБЛИЦА III ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Параметры	ТД-40000/110	ТДН-16000/110
$S_{НОМ}$, МВА	40	16
$U_{ВН,НОМ}$, кВ	121	115
$U_{НН,НОМ}$, кВ	10,5	11
u_k , %	10,5	10,5
ΔP_K , кВ	160	85
ΔP_X , кВ	50	19

Для начала примем Т1, Т3 – ТДН-40000/110, Т2 – 16000/110.

ТАБЛИЦА IV ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

Нагрузка	P, МВт	Q, МВАр
Н1	25,5	15,8
Н2	21,25	13,17
Н3	8,5	5,3
Н4	29,75	18,44

Короткое замыкание будет производиться на расстояние x от места установки защиты. Расстояние до места КЗ будем менять для вывода защиты на грань срабатывания. Под гранью срабатывания будет пониматься такое состояние ДЗ: если удалить точку КЗ на какое-то малое значение, то защита перестает срабатывать и наоборот. Это позволит определить несрабатывание защиты даже при малом увеличении замера сопротивления.

Для моделирования энергосистемы и модели ДЗ использовался программный комплекс PSCAD компании Manitoba Hydro International. Данная программа дает высокий набор возможностей для построения сети, выполнения моделирования КЗ и т. д. (рис. 4).

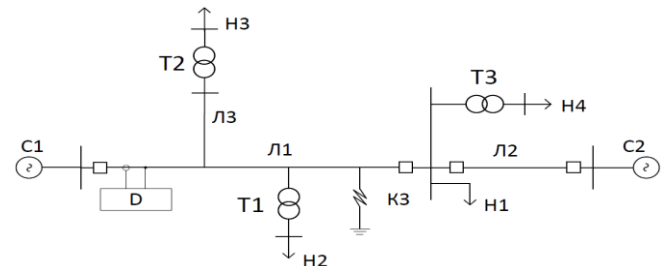


Рис. 3. Математическая модель энергосистемы

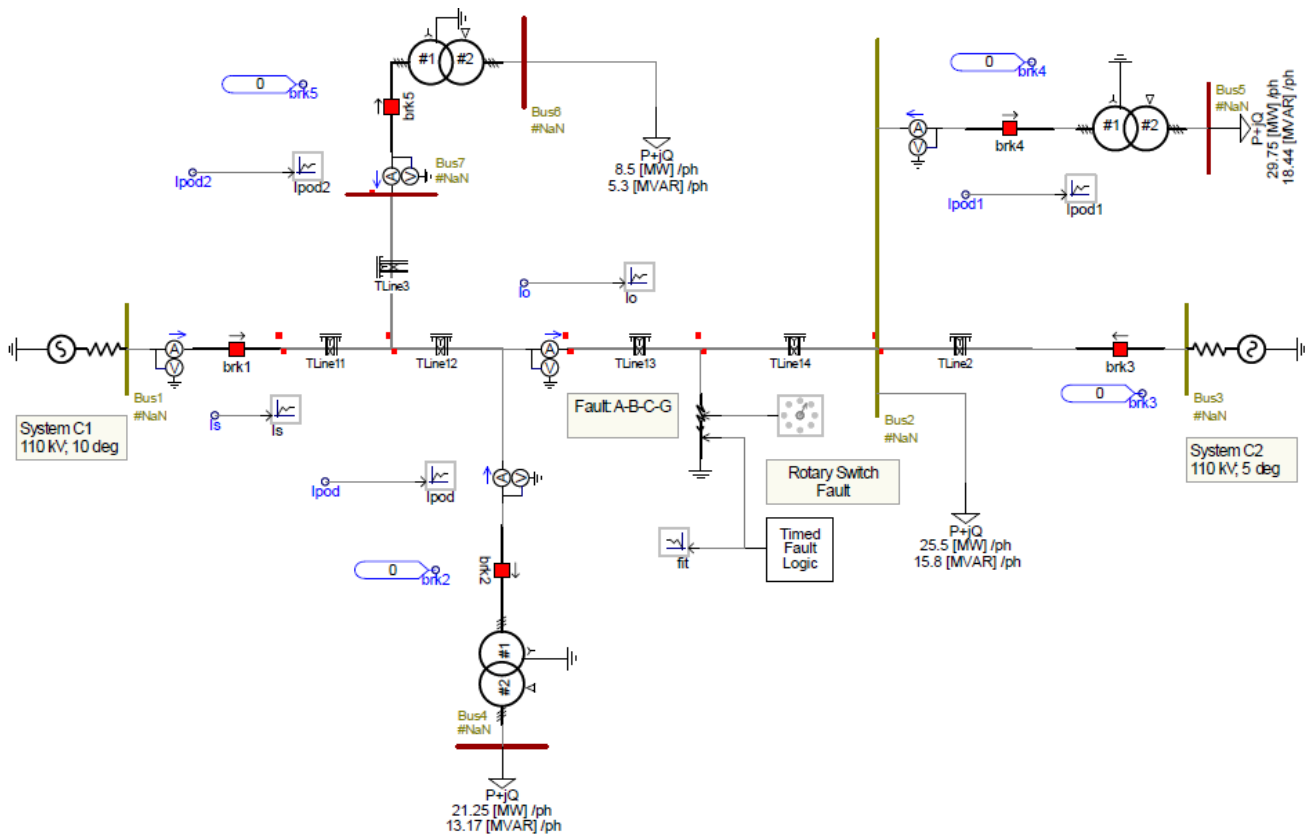


Рис. 4. Модель энергосистемы в программном комплексе

С. Выбор параметров настройки защиты

Для первой ступени ДЗ, которая будет защищать линию от всех видов КЗ, уставку выберем 85 % от длины линии. Получим $Z_{уст} = 0,85 * L1 * Z_1 = 0,85 * 60 * 0,451 = 23 \text{ Ом}$.

Характеристику срабатывания выберем окружность, проходящая через начала координат, с углом максимальной чувствительности 80 градусов.

Определим центр окружности:

$$X_0 = Z_{уст} / 2 * \cos \phi_{м.ч.} = 11,5 * \cos(80) = 2 \text{ Ом}$$

$$Y_0 = Z_{уст} / 2 * \sin \phi_{м.ч.} = 11,5 * \sin(80) = 11,3 \text{ Ом}$$

Компенсация тока нулевой последовательности:

$$k_0 = (Z_0 - Z_1) / Z_1 = (1,2 - 0,451) / 0,451 = 1,66$$

V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАМЕРА

Сначала проверим правильность работы ДЗ при КЗ на землю с применением скомпенсированного тока нулевой последовательности. Для этого отключим трансформаторы Т1, Т2, Т3, чтобы исключить влияние подпитки током нулевой последовательности от заземленных нейтралей.

Уставка и алгоритм для определения замера выбраны. Поставим точку КЗ: 85% от длины линии. Защита в этом режиме должна выводиться на грань срабатывания.

По рис. 5 можно увидеть, что сопротивление замера пересекает характеристику срабатывания и находится на грани, т.е. при дальнейшем удалении точки КЗ ДЗ не сработает из-за увеличения сопротивления.

Значит компенсация тока нулевой последовательности правильно определяет сопротивление до места повреждения, защита работает селективно.

Далее определим влияние заземленных трансформаторов на правильность точность замера. Будем по отдельности и вместе включать трансформаторы Т1, Т2, Т3.

A. Включение трансформатора Т1

Трансформатор Т1 является отпаечной подстанцией (ПС) на защищаемой линии. Для трансформатора Т1 изначально выбрана мощность равная 40 МВА. Результаты работы сети со включенным трансформатором Т1 во время КЗ показали, что замер сопротивления увеличился и ДЗ не сработала. Можно сделать вывод, что длина зоны срабатывания уменьшилась, сопротивление замера составило примерно 26 Ом. Ток поврежденной фазы в месте замыкания составил 2,366 кА, а в месте установки защиты 2,166 кА. Подпитка от нейтрали трансформатора Т1 получилась равной 0,25 кА. Уменьшение мощности трансформатора до 16 МВА приведет к меньшему влиянию на работу ДЗ, при этом замер составил 23,6 Ом.

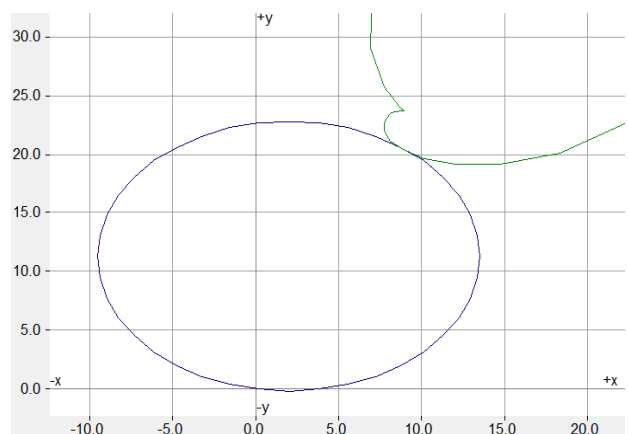


Рис. 5. ДЗ на грани срабатывания без трансформаторов

В. Включение трансформатора Т3

Определим влияние Т3 мощностью 40 МВА на сопротивление замера ДЗ, отключив все другие трансформаторы (рис. 6).

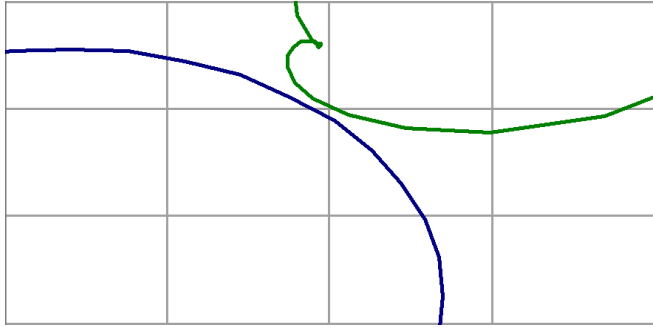


Рис. 6. Включение трансформатора Т3

Расчеты показали, ДЗ не сработает, вектор сопротивления замера не пересечет характеристику срабатывания. Пришлось увеличить диаграмму, чтобы увидеть незначительное смещение сопротивления контура КЗ в сторону увеличения, но достаточное для отказа защиты.

Ток в месте КЗ увеличился на 0,06 кА в сравнении со значением тока в месте установки защиты. А сопротивление замера составит 22,5 Ом. Это значение меньше уставки срабатывания, но защита все равно не сработает, потому что угол сопротивления КЗ меньше угла максимальной чувствительности, при котором определяется максимальное значение срабатывания, что видно на рис. 6.

Можно сказать, что заземленный трансформатор на шинах противоположной ПС оказывает влияние на работы ДЗ защищаемой линии. Но влияние будет незначительным даже при большой мощности трансформатора.

С. Включение трансформатора Т2

Влияние трансформатора Т2 будет аналогично Т1, но иметь другую степень из-за места отпайки, дополнительной линии ЛЗ и мощности трансформатора Т2. Ток в линиях в месте установки защита, точке КЗ и подпитка от трансформатора Т3 показаны на рис. 7.

I_s – ток в месте установки защиты; I_o – ток в месте КЗ; I_{pod2} – ток в нейтрали трансформатора Т2.

Видно, что ток нулевой последовательности от нейтрали трансформатора Т3 подпитывает ток в месте КЗ на землю. Влияние небольшое (0,07 кА) из-за малой мощности трансформатора (16 МВА). Тот же трансформатор Т1 при мощности 40 МВА, имеет ток подпитки 0,25 кА.

Замер сопротивления составит 23,3 Ом, что больше уставки срабатывания, значит ДЗ не сработает, длина зоны срабатывания уменьшена.

Трансформатор Т2 подключен к линии Л1 через отпаечную линию ЛЗ, которая тоже влияет на величину тока нулевой последовательности от нейтрали трансформатора. Определим это влияние, убрав линию ЛЗ и подключив трансформатор Т2 напрямую к линии Л1.

Результаты моделирования показали, что влияние линии незначительное, ток нулевой последовательности от трансформатора Т2 увеличился на 0,1 кА и составил

0,9 кА. Сопротивление замера увеличилось на десятые доли.

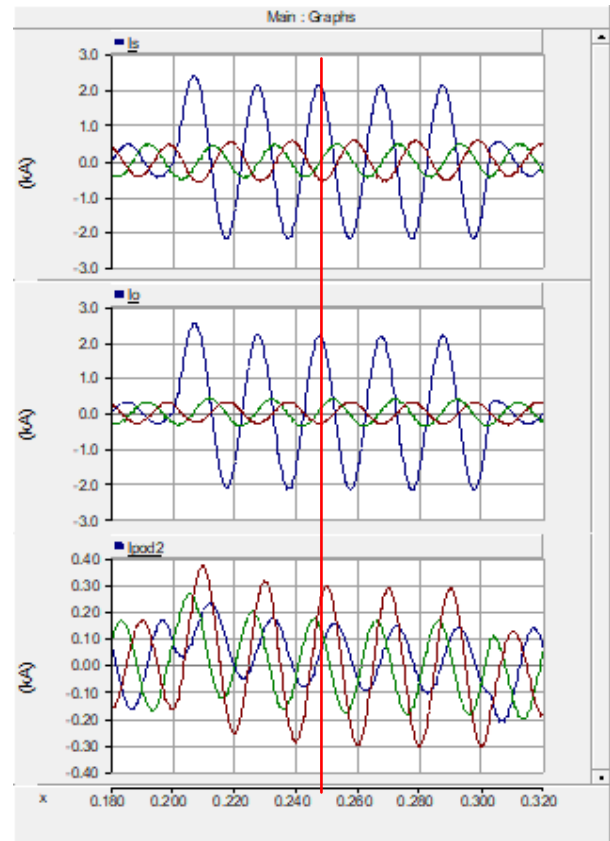


Рис. 7. Включение трансформатора Т2

Д. Включение всех трансформаторов

Включение всех трех трансформаторов вызовет отказ срабатывания защиты при КЗ на расстоянии 85 % от длины линии. При одновременной работе трансформаторов Т1, Т2, Т3 защита не сработает, что показано на рис. 8.

Мощность трансформатора Т2 была увеличена с 16 МВА до 40 МВА, чтобы показать, как повлияют два отпаечных трансформатора на линии по 40 МВА. Сопротивление замера составило 26,4 Ом, что больше срабатывания уставки на 15 %, даже не учитывая тот факт, что угол КЗ будет меньше угла максимальной чувствительности.

Величина подпитки током нулевой последовательности от нейтралей заземленных трансформаторов показана на рис. 9.

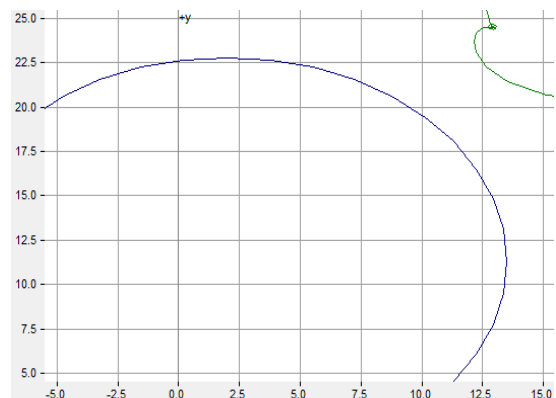


Рис. 8. Включение трансформаторов Т1, Т2, Т3

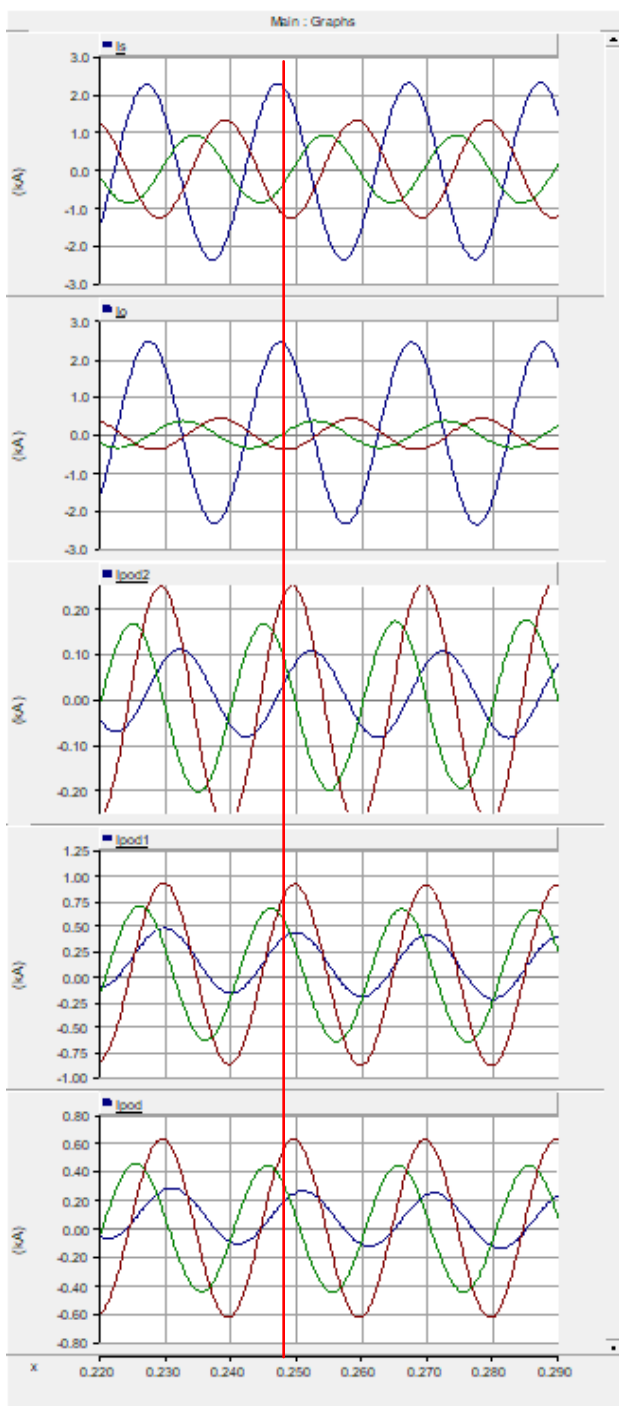


Рис. 9. Диаграмма токов при включении всех трансформаторов

I_{pod1} – ток в нейтрали трансформатора Т3, I_{pod} – ток в нейтрали трансформатора Т1.

Величина подпитки током нулевой последовательности составит: от Т1 – 0,142 кА, Т2 – 0,009 кА, Т3 – 0,06 кА. Включение трансформаторов вызвало большую погрешность даже при условии, что токи трансформатора Т1 и Т2 брались не в пиковом значении, а с некоторым отставанием, т.к. время измерения тока определялось пиковым значением в месте КЗ.

Е. Результаты моделирования

Сведем для наглядности в табл. V все полученные результаты. Параметры трансформаторов и топология сети останутся такой же, как в рис. 4 и табл. I–IV.

ТАБЛИЦА V РЕЗУЛЬТАТЫ

Включенный тр-р	Подпитка ЗИО, кА	Замер сопр-ия, Ом
T1	0,25	23,6
T2	0,06	23,3
T3	0,07	22,5
T1, T2, T3*	0,378	25,4
T1, T2, T3*	0,191	26,4

* - мощность Т2 изменена на 40 МВА.

При подключении отпаечных ПС с заземленными трансформаторами к защищаемой линии ДЗ может сработать неселективно из-за увеличения сопротивления замера по причине подпитки токами нулевой последовательности от нейтрали трансформаторов. Влияние будет тем значительнее, чем больше отпаечных ПС будет подключено к линии.

VI. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Решить данную проблему можно увеличением коэффициента компенсации тока нулевой последовательности.

Определим для каждого режима работы трансформатора величину коэффициент компенсации тока нулевой последовательности, при которой ДЗ будет правильно определять сопротивление замера контура КЗ.

- при включении трансформатора Т1 коэффициент k_0 необходимо увеличить до 3. При таком значении, защита будет работать на грани срабатывания, что является правильным при уставке 23 Ом и точке КЗ 51 км от места установки ДЗ (рис. 10);
- при включении Т2 – k_0 составит 2;
- при включении Т3 – k_0 составит 1.78;
- при включении Т1, Т2, Т3 – k_0 составит 3,74.

Параметры трансформаторов и топология сети останутся такой же, как в рисунке 4 и таблицах I–IV.

Видно, что чем больше заземленных трансформаторов, тем на большее значение должен быть увеличен коэффициент компенсации тока нулевой последовательности. Увеличение носит широкий спектр, на несколько десятков при малом влиянии и в 2–3 раза при включении нескольких трансформаторов.

Выполнение данных расчетов может быть возложено на специалистов службы релейной защиты Системного оператора или сетевых организаций, в ведении которых имеются ЛЭП с отпайками заземленных трансформаторов.

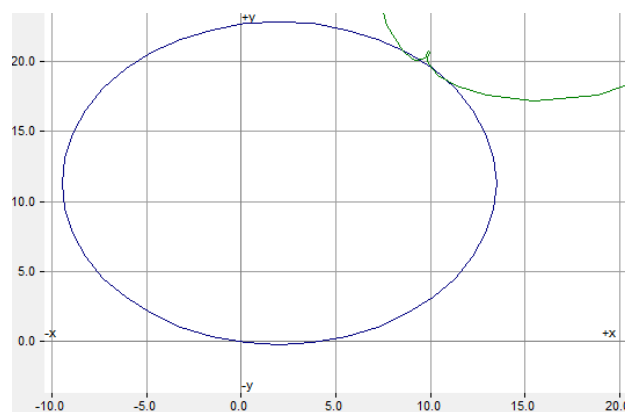


Рис. 10. Работа ДЗ с пересчитанным k_0 при включенном Т1

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа дистанционной защиты от всех видов КЗ, в частности от КЗ на землю, может быть осложнена рядами факторов. Одним из таких является влияние заземленных трансформаторов, которые установлены на отпаечных подстанциях защищаемой линии.

При КЗ на землю ток нулевой последовательности поступает к месту КЗ не только через источники питания (системы), но и через нейтрали заземленных трансформаторов, что вызывает дополнительное падение напряжения на линии и вследствие, влияет на работу дистанционной защиты.

Чем больше заземленных трансформаторов и чем больше их номинальная мощность, тем выше будет влияние. В данном исследовании повышение замера сопротивления доходило до 15 %, что снижает зону срабатывания защит. Если не предпринять никаких мер для решения данной проблемы, защита может сработать неселективно при большом количестве отпаечных подстанций.

Данная проблема решается увеличением коэффициента компенсации тока нулевой последовательности. Смысл решения заключается в том, что при увеличении коэффициента мы компенсируем наведенное напряжение током подпитки от трансформаторов.

Дальнейшими перспективами исследования являются вывод эмпирической формулы для автоматического пересчета коэффициента компенсации тока нулевой последовательности по параметрами защищаемой линии, количества отпаечных трансформаторов, их мощности, места отпаек.

Сама тема дистанционной защиты от всех видов КЗ в последнее время приобретает все большую популярность. Это связано с внедрением микропроцессорных устройств релейной защиты, преимуществами дистанционной защит перед токовыми, потребность резервирования защит.

На данный момент дистанционная защит от всех видов КЗ применяется только в первой ступени, но с усложнением топологии 110-220 кВ городских сетях, большой запутанностью, использование данной защиты, во-вторых, и третьих ступенях может быть перспективным.

Тема заземленных трансформаторов в работе дистанционной защиты, как уже было сказано, только одна из проблем. К другим можно отнести: влияние взаимоиндукции на параллельных и двухцепных линиях, переходное сопротивление в месте КЗ, несимметрия линии, последовательная (продольная компенсация).

Поэтому можно сказать, что тема дистанционной защиты является перспективной для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Чернобровов Н.В. Релейная защита: Учебное пособие для техникумов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1971. 624 с. с илл.
- [2] Фабрикант В.Л. Дистанционная защита: Учеб. пособие для вузов. М: Высш. школа, 1978. 215 с., ил.
- [3] Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. М: Энергоатомиздат, 1985. 176 с., ил.
- [4] Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Перевод с англ. Под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. 322 с.