

Развитие методов обеспечения дальнего резервирования защит трансформаторов на линиях с отпайками

А.В. Булычев, Д.С. Васильев, А.О. Павлов
ООО «НПП Бреслер»
Россия
vds@bresler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ответственные подстанции, дальнее резервирование, алгоритмическое моделирование.

1 ВВЕДЕНИЕ

В распределительных сетях 35-110 кВ эксплуатируется значительное число подстанций, выполненных по упрощенным схемам с использованием короткозамыкателей и отделителей в качестве коммутационных аппаратов. В таких сетях необходимо дальнее резервирование защит, установленных на трансформаторах. Традиционные резервные защиты, построенные на дистанционном принципе, во многих случаях не обладают требуемой чувствительностью. Особенно – при выявлении удаленных коротких замыканий за трансформатором на ответвлении высоковольтной линии сложной магистральной сети. Это обусловлено тем, что мощность защищаемого трансформатора может быть меньше, чем транзитная мощность линии, и короткое замыкание слабо проявляется на фоне нагрузочного режима.

Рассматривается разработанная и внедренная в серийное производство микропроцессорная защита дальнего резервирования Бреслер-0107.030. Разработанная защита является кардинальным развитием версии, выпускавшейся ООО «НПП Бреслер» с 1998 г.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Защита дальнего резервирования устанавливается на головных концах линий электропередачи 35 – 110 кВ и обеспечивает выявление коротких замыканий (КЗ) в силовых отпаечных трансформаторах и на стороне низшего напряжения.

При реализации дальнего резервирования защит трансформаторов ответвительных подстанций возникает ряд проблем:

- отстройка от нагрузочных (транзитных) токов линий;
- согласование с линейными защитами и с защитами, установленными на отпайках;
- диапазон изменения токов в режиме аварии на линии превышает диапазон изменения токов при замыканиях в трансформаторах ответвительных подстанций;
- необходимость учитывать наличие тяговой нагрузки на некоторых линиях.

С целью выявления достоинств нового предлагаемого метода можно рассмотреть поведение классического дистанционного органа на примере имитационной модели, показанной на рисунке 1. Примем, что отпаечный трансформатор не нагружен. Будем моделировать трехфазные замыкания на стороне низшего напряжения подстанции.

В симметричном нагрузочном режиме входное сопротивление $\underline{Z}_s^{\text{нп}}$ на зажимах дистанционного органа в месте наблюдения определяется соотношением:

$$\underline{Z}_s^{\text{нп}} = \frac{\underline{U}_s^{\text{нп}}}{\underline{I}_s^{\text{нп}}} = \frac{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r) + \underline{Z}_s \underline{E}_r / \underline{E}_s}{1 - \underline{E}_r / \underline{E}_s} \quad (1)$$

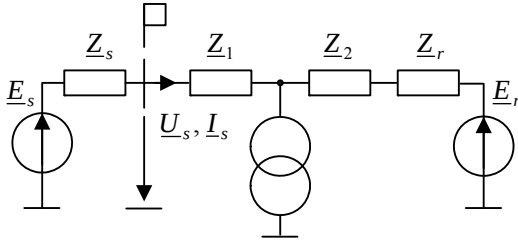


Рис. 1 : Имитационная модель ЛЭП с ответвительной подстанцией

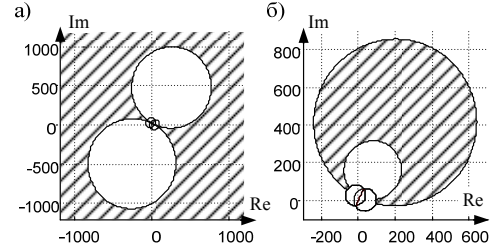


Рис. 2 : Области расположения входного сопротивления дистанционного органа
а) Нагрузочный режим; б) Замыкание за трансформатором;

При трехфазном замыкании с переходным сопротивлением $R_f = 0 \text{ Ом}$ на стороне низшего напряжения трансформатора (рис. 1) входное сопротивление $\underline{Z}_s^{K3}$ на зажимах дистанционного органа в месте наблюдения определяется соотношением:

$$\underline{Z}_s^{K3} = \frac{\underline{U}_s^{K3}}{\underline{I}_s^{K3}} = \frac{\underline{E}_s(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_T(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)/(\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)) + \underline{E}_r \underline{Z}_s \underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)}{\underline{E}_s - \underline{E}_r \underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)} \quad (2)$$

Найдем области, в которых располагается сопротивление на зажимах дистанционного органа с учетом ограничений, определяемых тем, что соотношение ЭДС по модулю не выходит за пределы $k_1 \leq \text{mod}(\underline{E}_r / \underline{E}_s) \leq k_2$, где $k_1 = \text{mod}(\underline{E}_{r, \min} / \underline{E}_{s, \max})$ и $k_2 = \text{mod}(\underline{E}_{r, \max} / \underline{E}_{s, \min})$. Другое ограничение определяется из условия устойчивости энергетической системы: $\alpha_1 < \arg(\underline{E}_r / \underline{E}_s) < \alpha_2$.

Для нагрузочного режима из выражения (1) получим соотношения:

$$\frac{\underline{E}_{r, \min}}{\underline{E}_{s, \max}} < \text{mod}\left(\frac{\underline{Z}_s^{\text{HP}} - \underline{a}_{\text{HP}}}{\underline{Z}_s^{\text{HP}} - \underline{b}_{\text{HP}}}\right) < \frac{\underline{E}_{r, \max}}{\underline{E}_{s, \min}}; \quad \alpha_1 < \arg\left(\frac{\underline{Z}_s^{\text{HP}} - \underline{a}_{\text{HP}}}{\underline{Z}_s^{\text{HP}} - \underline{b}_{\text{HP}}}\right) < \alpha_2,$$

где $\underline{a}_{\text{HP}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r$, $\underline{b}_{\text{HP}} = -\underline{Z}_s$.

Для режима с замыканием из выражения (2) получим соотношения:

$$\text{mod}\left(\underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)\right) \cdot \frac{\underline{E}_{r, \min}}{\underline{E}_{s, \max}} < \text{mod}\left(\frac{\underline{Z}_s^{K3} - \underline{a}_{K3}}{\underline{Z}_s^{K3} - \underline{b}_{K3}}\right) < \frac{\underline{E}_{r, \max}}{\underline{E}_{s, \min}} \cdot \text{mod}\left(\underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)\right);$$

$$\alpha_1 + \arg\left(\underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)\right) < \arg\left(\frac{\underline{Z}_s^{K3} - \underline{a}_{K3}}{\underline{Z}_s^{K3} - \underline{b}_{K3}}\right) < \alpha_2 + \arg\left(\underline{Z}_T / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)\right),$$

где $\underline{a}_{K3} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_T(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r)/(\underline{Z}_T + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r))$, $\underline{b}_{K3} = -\underline{Z}_s$.

На рисунке 2 построены области замера сопротивления для имитационной модели с параметрами $0.9 \leq \text{mod}(\underline{E}_r / \underline{E}_s) \leq 1.1$, $-60^\circ < \arg(\underline{E}_r / \underline{E}_s) < 60^\circ$, $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = 9.96 + j17.08 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_s = \underline{Z}_r = 15.63 + j31.25 \text{ Ом}$ и $\underline{Z}_T = 14.7 + j220.4 \text{ Ом}$.

На практике необходимо учитывать изменения величин загрузки трансформаторов, сопротивлений эквивалентных ЭДС. Поэтому осуществить полноценное дальнейшее резервирование при замыканиях на стороне низшего напряжения ответвительных подстанций на линии с двухсторонним питанием используя классический дистанционный орган затруднительно.

В защите Бреслер-0107.030 проблема выявления повреждения отпаечного трансформатора решена путем расширения информационной базы. С помощью нового метода, названного информационным анализом [1], разработана защита дальнего резервирования, оперирующая всей доступной информацией при наблюдении за линией электропередачи (ЛЭП)

с одного конца: током и напряжением предшествующего и аварийного режимов [2]. Данная защита решает проблему выявления факта повреждения отпаечного трансформатора.

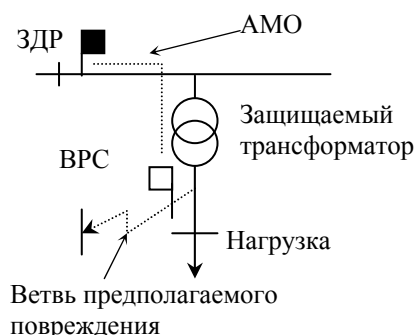


Рис.3 : Алгоритмическая модель объекта

алгоритмических моделей удастся настроить виртуальные реле на каждую защищаемую ответвительную подстанцию, если их несколько. Это позволяет упростить расчет уставочных характеристик и добавляет возможность идентифицировать поврежденную отпайку. Данный способ эффективен тем, что решает проблему объединения информации о защищаемом объекте.

Алгоритмическую модель объекта разделяют на модель предшествующего и чисто аварийного режимов. Модель предшествующего режима формирует замер напряжений $\underline{U}_f^{пл}$ в ветви предполагаемого повреждения, по замерам напряжения $\underline{U}_s^{пл}$ и тока $\underline{I}_s^{пл}$ из места наблюдения. В предшествующем режиме в ветви предполагаемого повреждения отсутствовали токи, поэтому $\underline{I}_f^{пл} = 0$.

Модель чисто аварийного режима формирует замер напряжений $\underline{U}_f^{ав}$ и токов $\underline{I}_f^{ав}$ в ветви предполагаемого повреждения по замерам чисто аварийных составляющих напряжения $\underline{U}_s^{ав}$ и тока $\underline{I}_s^{ав}$ из места установки защиты.

Составляющие чисто аварийного режима в месте наблюдения определяются следующим образом, как комплексная разность текущего и предшествующего замера: $\underline{U}_s^{ав} = \underline{U}_s^{тк} - \underline{U}_s^{пл}$, $\underline{I}_s^{ав} = \underline{I}_s^{тк} - \underline{I}_s^{пл}$. Передаточные коэффициенты АМО зависят только от пассивных параметров схемы замещения предшествующего и чисто аварийного режимов.

Учитывая, что $\underline{I}_f^{тк} = \underline{I}_f^{ав}$, $\underline{U}_f^{тк} = \underline{U}_f^{ав} + \underline{U}_f^{пл}$, получаем оценки текущих значений тока $\underline{I}_f^{тк}$ и напряжения $\underline{U}_f^{тк}$ в ветви предполагаемого повреждения по составляющим предшествующего и чисто аварийного режимов.

Кроме алгоритмической модели объекта в виртуальное реле сопротивления входит формирователь замера сопротивления, который объединяет информацию о токах и напряжениях различных режимов (предшествующего и чисто аварийного) в единый алгоритмический параметр – замер текущего сопротивления в месте предполагаемого повреждения. Специфика отпаечного трансформатора такова, что возможны только два вида повреждения на низшей стороне трансформатора. В защите реализовано четыре формирователя замера текущего сопротивления: три для междуфазных и один для трехфазного замыканий:

$$\underline{Z}_f^{тк} = \frac{\underline{U}_f^{тк}}{\underline{I}_f^{тк}}; \underline{Z}_{fb}^{тк} = \frac{\underline{U}_{fb}^{тк} - \underline{U}_{fc}^{тк}}{\underline{I}_{fb}^{тк} - \underline{I}_{fc}^{тк}}; \underline{Z}_{fc}^{тк} = \frac{\underline{U}_{fc}^{тк} - \underline{U}_{fa}^{тк}}{\underline{I}_{fc}^{тк} - \underline{I}_{fa}^{тк}}; \underline{Z}_{fab}^{тк} = \frac{\underline{U}_{fa}^{тк} - \underline{U}_{fb}^{тк}}{\underline{I}_{fa}^{тк} - \underline{I}_{fb}^{тк}}.$$

Таким образом, в защите заложен дистанционный принцип выявления факта повреждения защищаемого трансформатора. Защита оперирует оцениваемыми алгоритмической моделью величинами. Для каждой из защищаемых отпайк применяется своя

АМО и уставочная характеристика, при трехфазных и междуфазных замыканиях, полигональной формы, позволяющая гибко отстроиться от рабочих коммутаций.

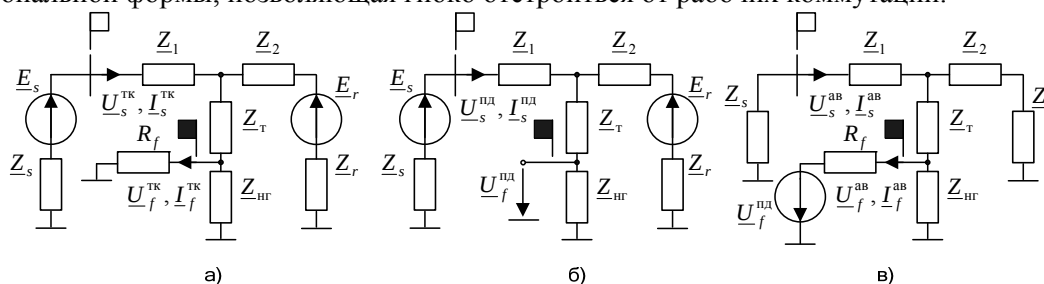


Рис. 4: Алгоритм работы виртуального реле сопротивления

а) Схема замещения сети в режиме замыкания; б) Схема замещения предаварийного режима; в) Схема замещения чисто аварийного режима

На примере имитационной модели (рис. 1) приведен принцип работы ВРС при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения трансформатора. Как известно, расчет токов и напряжений в режиме замыкания (рис. 4 а) можно заменить расчетом предшествующего (рис. 4 б) и чисто аварийного (рис. 4 в) режимов. В модели чисто аварийного режима в ветви повреждения находится источник ЭДС равный напряжению в точке замыкания в предшествующем режиме. Источники, действующие в схеме предшествующего режима, отсутствуют.

Замер виртуального реле сопротивления при трехфазном замыкании равен:

$$\underline{Z}_f^{\text{TK}} = \frac{\underline{U}_f^{\text{TK}}}{\underline{I}_f^{\text{TK}}} = \frac{\underline{U}_f^{\text{ПД}} + \underline{U}_f^{\text{АВ}}}{\underline{I}_f^{\text{АВ}}} = \frac{\underline{U}_f^{\text{ПД}}}{\underline{I}_f^{\text{АВ}}} + \frac{\underline{U}_f^{\text{АВ}}}{\underline{I}_f^{\text{АВ}}}, \text{ где } \frac{\underline{U}_f^{\text{АВ}}}{\underline{I}_f^{\text{АВ}}} = -\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} - \text{эквивалентное сопротивление за спиной виртуального реле сопротивления.}$$

Из схемы замещения чисто аварийного режима (рис. 4 в) вытекает следующее равенство:

$$\frac{\underline{U}_f^{\text{ПД}}}{\underline{I}_f^{\text{АВ}}} = R_f + \underline{Z}_{\text{ЭКВ}}.$$

Таким образом, $\underline{Z}_f^{\text{TK}} = \frac{\underline{U}_f^{\text{TK}}}{\underline{I}_f^{\text{TK}}} = R_f + \underline{Z}_{\text{ЭКВ}} - \underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = R_f$. Видно, что замер виртуального реле

сопротивления не зависит от величин эквивалентных ЭДС систем и угла передачи между ними. Замер ВРС отстроен от нагрузочных режимов и зависит от переходного сопротивления в месте замыкания и адекватности реальной сети к алгоритмической модели. Альтернативными режимами для адаптивной защиты, реагирующей на изменения режима, являются рабочие коммутации и замыкания в смежных элементах.

На практике модель адекватна объекту не в полной мере, что в свою очередь приводит к смещению замера и соответственно к расширению области наблюдаемых режимов. Это может быть вызвано изменением нагрузки трансформатора, оперативными переключениями на смежных объектах или изменениями параметров самого трансформатора (например, при изменении положения РПН). В методике расчета уставок используется линейная аппроксимация сложной области наблюдаемых режимов четырехугольником в целях упрощения операции определения попадания замера ВРС в область, ограниченную уставочной характеристикой.

Классические методы выявления броска намагничивающего тока трансформаторов (БНТ), включаемых на холостой ход могут оказаться неэффективными на магистральных линиях электропередачи с ответвительными подстанциями (отстройка от БНТ на основе оценки формы кривой тока или доли содержания второй гармоники в токе).

Резервные защиты расположены по концам ЛЭП, а не непосредственно у защищаемых ответвительных подстанций, бросок тока намагничивания накладывается на транзитный ток, протекающий в ней. Отсутствуют паузы между импульсами тока и два последовательных импульса тока не являются импульсами одной полярности. Из-за большой величины

транзитной мощности содержание второй гармоники в токе может составлять менее 5 %. Поэтому возникает необходимость снижения величины уставки, что может привести к ложному блокированию защиты по БНТ при замыкании.

Для повышения чувствительности к броскам тока намагничивания на линиях с ответвлениями в защите дальнего резервирования применяется блокировка от БНТ, основанная на отношении тока второй гармоники к приращению тока первой гармоники:

$$\frac{I_{100\Gamma\text{ц}}^{\text{тк}}}{I_{50\Gamma\text{ц}}^{\text{тк}} - I_{50\Gamma\text{ц}}^{\text{пд}}} \cdot 100\%.$$

Использование комплексного приращения тока первой гармоники позволяет отстроиться от нагрузочного тока линии. В данном органе в качестве контролируемых величин были взяты составляющие прямой последовательности, поскольку они изменяются при любых видах повреждений и коммутаций в энергосистеме. При отсутствии информации о токе предшествующего режима (режим опробования линии или в цикле АПВ) измерительный орган работает как классический.

В защите реализован алгоритм выявления пуска двигателя основанный на анализе траектории движения годографа сопротивления прямой последовательности в аварийном режиме (рис. 5). Оцениваются замеры вида: $Z_{\text{тк}} = \frac{U_{\text{тк}}}{I_{\text{тк}}}$ и $Z_{\text{тк_пд}} = \frac{U_{\text{тк}}}{I_{\text{тк}} - I_{\text{пд}}}$. Учет тока

предшествующего режима позволяет отстроиться от нагрузочного тока линии. Дополнительно в аварийном режиме контролируется приращение и уровень тока обратной последовательности. При их наличии алгоритм выявления пуска двигателя блокируется.

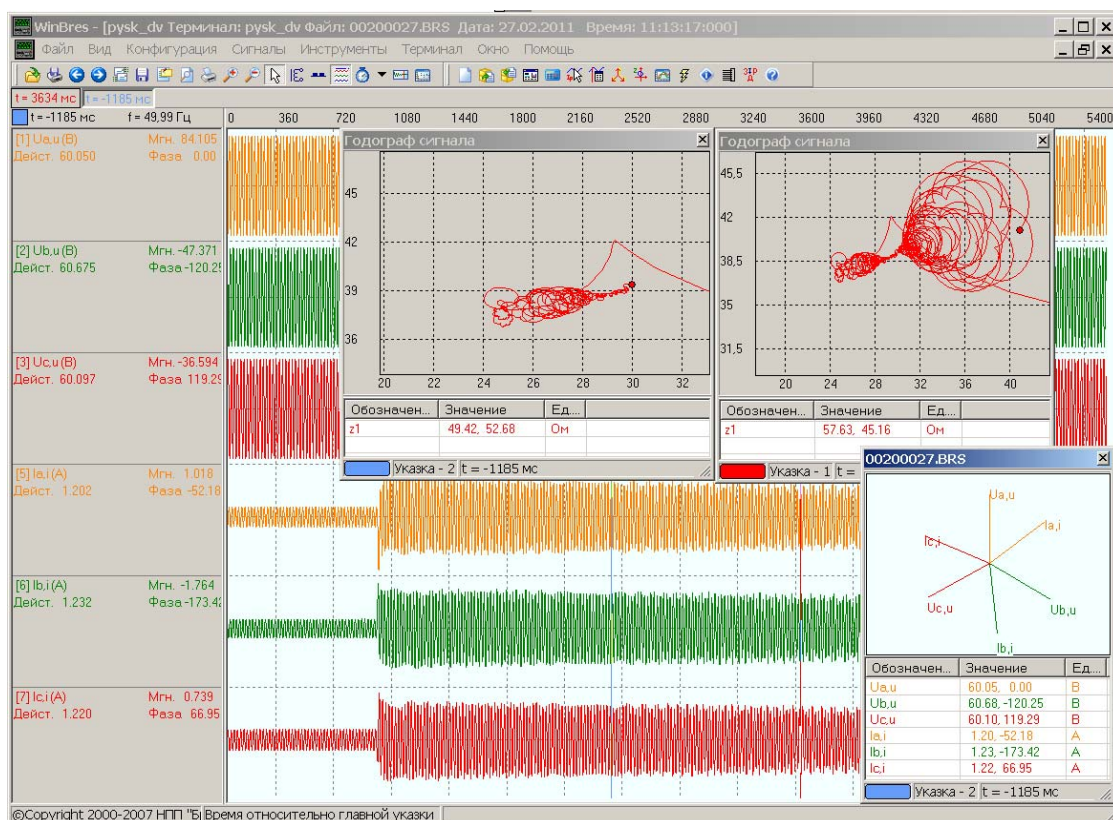


Рис. 5: Осциллограмма пуска двигателя

При реализации дальнего резервирования на параллельных линиях возникает проблема выявления поврежденной. Особенно при замыкании в ответственной подстанции, расположенной в конце линии. В алгоритме защиты Бреслер-0107.030 данная проблема решена путем сравнения величин приращений токов симметричных составляющих в параллельных

линиях. Влияние нагрузочных токов на измерительный орган, построенный по приращению, минимально. Линия, в которой максимальное приращение токов, считается поврежденной.

Пусковой орган защиты дальнего резервирования Бреслер-0107.030 оперирует аварийными составляющими, возникающими при изменении режима работы сети. Он реагирует на векторное приращение тока прямой последовательности (трехфазные замыкания) или тока обратной последовательности (междуфазные замыкания). Условие срабатывания пускового органа записывается как $|\underline{I}_s^{\text{тк}} - \underline{I}_s^{\text{пл}}| > \Delta I_s^{\text{уст}}$ для тока прямой и обратной последовательности в месте установки защиты. Применение измерительных органов по приращению позволило реализовать дальней резервирование на линиях электропередачи с транзитными токами, превышающими ток замыкания при повреждении ответвительной подстанции.

Для предотвращения излишнего срабатывания защиты дальнего резервирования (в режимах связанных с плавкой гололеда, при замыканиях в смежных линиях) для каждой защищаемой ответвительной подстанции рассчитывается возможный диапазон приращений токов прямой и обратной последовательностей.

В последние годы, увеличилось количество повреждений силовых трансформаторов ответвительных подстанций в режимах продольно-поперечной несимметрии в линии, т.е. на стороне высшего напряжения трансформаторов (на отпайке присутствует режим обрыва фазного провода воздушной линии, со стороны высшего напряжения трансформатора с его одновременным замыканием на землю со стороны трансформатора).

В сетях 110 кВ основной защитой при данных видах повреждений является токовая защита нулевой последовательности, но ее чувствительности, как правило, недостаточно. Защиты ответвительного трансформатора (если они есть) не чувствительны к данному режиму, поскольку измерительные трансформаторы тока защит на стороне высшего напряжения соединены в треугольник, и токи нулевой последовательности замыкаются в нем, не фиксируясь в дифференциальном реле.

В [3] предложен вариант совершенствования защит ответвительных трансформаторов. Предлагается отключение трансформатора в этих условиях производить дополнительной токовой защитой нулевой последовательности, включив трансформатор тока в нейтраль трансформатора. Защита трансформатора будет иметь две выдержки на отключение. Первая работает на отключение выключателя трансформатора или на включение короткозамыкателя 110 кВ. Вторая - на отделитель 110 кВ в цепи трансформатора при отказе в отключении выключателя или если включение короткозамыкателя не привело к отключению линии.

Однако, такое решение не исключают необходимость резервирования защитами линий при отказе отделителя или выключателя.

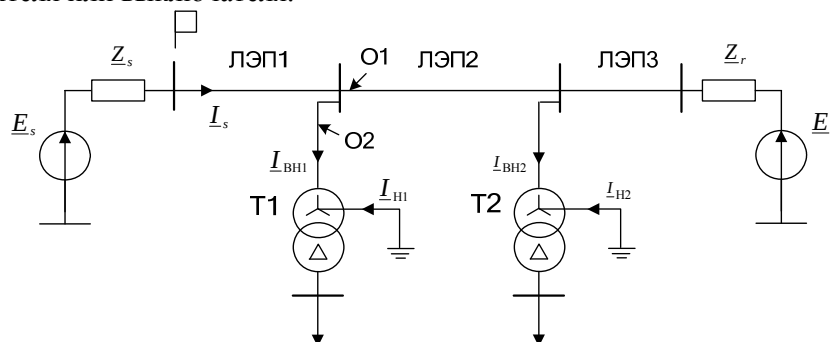


Рис. 6: Схема сети с ответвительными подстанциями

Рассмотрим неполнофазные режимы на примере сети приведенной на рисунке 6. Для наглядности используем реальные параметры элементов. Системы, обозначенные символами s и r , вносятся в модель сопротивлениями прямой (обратной) и нулевой последовательности: $Z_{1s} = Z_{1r} = 2 + j7 \text{ Ом}$, $Z_{0s} = Z_{0r} = 5 + j17.5 \text{ Ом}$. Линии электропередачи заданы параметрами: тип опоры ПБ110-1, марка провода АС-120/19, марка трос С-70, длина линий равна 10 км.

Трансформаторы типа ТДН-10000/110 с сопротивлением $\underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2} = 7.95 + j139 \text{ Ом}$. Коэффициент загрузки трансформаторов $k = 0.5$ и $\cos \varphi_{\text{нр}} = 0.8$. Нейтраль трансформаторов на стороне высшего напряжения заземлена.

Имитационное моделирование выполнялось методом каскадного эквивалентирования. Проводились опыты: обрыв фазы «А» в точках «О1» и «О2», обрыв фазы «А» в точке «О2», сопровождающийся однофазным замыканием со стороны трансформатора (рис. 6).

Режим	Фазные токи в месте наблюдения, А	Симметричные составляющие тока в месте наблюдения, А	Ток в трансформаторе Т1, А	Ток в трансформаторе Т2, А
«Обрыв-закоротка» в точке «О2»	$\underline{I}_s^a = 195.43 \angle 22.91$ $\underline{I}_s^b = 132.47 \angle -105.36$ $\underline{I}_s^c = 270.36 \angle 128.42$	$\underline{I}_s^1 = 198.21 \angle 14.52$ $\underline{I}_s^2 = 27.34 \angle -98.77$ $\underline{I}_s^0 = 53.94 \angle 98.20$	$\underline{I}_{\text{вн1}}^a = 137.06 \angle 94.63$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^b = 130.37 \angle 104.97$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^c = 161.19 \angle 92.74$ $\underline{I}_{\text{н1}} = 426.80 \angle -82.94$	$\underline{I}_{\text{вн2}}^a = 30.21 \angle -50.30$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^b = 29.75 \angle -143.04$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^c = 16.93 \angle 81.05$ $\underline{I}_{\text{н2}} = 24.47 \angle 85.70$
Обрыв в точке «О2»	$\underline{I}_s^a = 197.45 \angle 23.36$ $\underline{I}_s^b = 199.71 \angle -101.04$ $\underline{I}_s^c = 223.46 \angle 140.03$	$\underline{I}_s^1 = 206.77 \angle 20.74$ $\underline{I}_s^2 = 4.46 \angle -127.10$ $\underline{I}_s^0 = 12.76 \angle 137.53$	$\underline{I}_{\text{вн1}}^a = 0.00 \angle 0.00$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^b = 39.41 \angle 172.30$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^c = 42.42 \angle 107.96$ $\underline{I}_{\text{н1}} = 69.28 \angle -41.20$	$\underline{I}_{\text{вн2}}^a = 27.03 \angle -38.50$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^b = 24.74 \angle -152.93$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^c = 23.77 \angle 79.39$ $\underline{I}_{\text{н2}} = 5.88 \angle 126.46$
Обрыв в точке «О1»	$\underline{I}_s^a = 29.02 \angle -22.28$ $\underline{I}_s^b = 181.26 \angle -85.50$ $\underline{I}_s^c = 198.22 \angle 126.51$	$\underline{I}_s^1 = 130.08 \angle 17.00$ $\underline{I}_s^2 = 81.46 \angle -151.99$ $\underline{I}_s^0 = 27.79 \angle -157.15$	$\underline{I}_{\text{вн1}}^a = 30.23 \angle -26.53$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^b = 19.41 \angle -150.76$ $\underline{I}_{\text{вн1}}^c = 27.13 \angle 70.56$ $\underline{I}_{\text{н1}} = 19.31 \angle -172.26$	$\underline{I}_{\text{вн2}}^a = 21.33 \angle -51.81$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^b = 31.10 \angle -160.74$ $\underline{I}_{\text{вн2}}^c = 24.54 \angle 96.89$ $\underline{I}_{\text{н2}} = 19.30 \angle 7.92$

Табл. 1: Результат моделирования

В таблице 1 приведены токи в обмотках и в нейтрали трансформаторов Т1 и Т2, а также токи и их симметричные составляющие в месте наблюдения (т.е. в месте установки ЗДР в головном конце линии). Угол передачи между системами равен 15° .

Как видно из таблицы, наиболее опасным для ответственного трансформатора Т1 является режим «обрыв-закоротка», приводящий к большим токам нулевой последовательности в нейтрали, что и является причиной его повреждения. Также видно, что эффективным средством выявления рассмотренных режимов является измерительный орган, контролирующий модуль отношения тока обратной последовательности к току нулевой последовательности $|\underline{I}_s^2 / \underline{I}_s^0|$. При повреждениях в отпайке (точка О2) этот модуль меньше 1, а для линии (точка О1) наоборот больше 1.

Дальнейшее моделирование показывает, что величина возмущения вызываемого обрывом зависит от величины тока, протекающего в месте обрыва в до аварийном режиме. В отсутствии перетока мощности по линии (для точки О1) или нагрузки трансформатор Т1 (для точки О2) данный режим, в отличие от режима «обрыв-закоротка», становится неразличимым.

Таким образом, мы имеем информационный параметр $|\underline{I}_s^2 / \underline{I}_s^0|$, позволяющий отличить рассмотренные виды повреждений в отпайке от повреждений в магистральной линии. Для его использования в ЗДР необходимо добавить критерии, позволяющие обеспечить селективность действия защиты по отношению к защищаемым отпайкам.

Теория алгоритмического моделирования, используемая в ЗДР Бреслер-0107.030, позволяет получать необходимые оценки токов и напряжений в произвольной точке защищаемой схемы. Для решения данной задачи необходимо дополнительно выполнить построение алгоритмической модели для схемы нулевой последовательности и изменить место установки виртуального реле сопротивления (ВРС), т.е. изменить ветвь, в которой необходимо

получить оценку токов и напряжений. Варианты установки виртуальных реле сопротивлений приведены на рисунке 7. На ответвление, не имеющее заземленную нейтраль, виртуальное реле сопротивления не устанавливается.

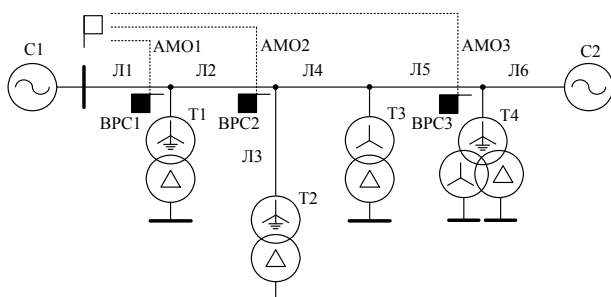


Рис. 7. Алгоритмическая модель объекта

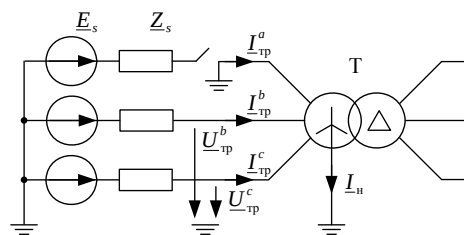


Рис. 8. Неполнофазный режим работы трансформатора

Для каждого из ВРС расчетная схема будет иметь вид, приведенный на рисунке 8. Анализ схемы показал, что имея величины тока и напряжения фаз «В» и «С» в месте установки ВРС может быть построен замер вида: $Z_{\text{реле}} = f(I_{\text{тр}}^b, I_{\text{тр}}^c, U_{\text{тр}}^b, U_{\text{тр}}^c)$. В случае адекватности алгоритмической модели к имитационной модели, замер виртуального реле будет равен сопротивлению трансформатора. Это свойство замера закладывается в алгоритм выявления рассмотренных видов повреждений.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В распоряжении современной микропроцессорной релейной защиты имеется мощный инструмент алгоритмического моделирования. Благодаря АМО релейная защита способна: оценивать – распознавать режимы; в случае необходимости привлекать дополнительную информацию; корректировать свои алгоритмы и тем самым адаптироваться к каждому конкретному случаю. Всё это, в итоге, позволяет существенно повысить точность расчётов и увеличить чувствительность защит.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liamets Y., Ivanov S., Podchivaline A., Nudelman G., Zakonjšek J. Informational analysis – new relay protection tool // Proc. 13th Int. Conf. Power System Protection, Bled, 2002, P.197-210.
- [2] Павлов А.О., Васильев Д.С. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи // Энергетик, 2008, №12. с.5-7.
- [3] Маруда И.Ф. Релейная защита понижающих трансформаторов от коротких замыканий на линии при разрывах фаз // Электрические станции, №2, 2003, с.44-46.