

Учебное пособие

А.И. ЩЕГЛОВ, А.В. БЕЛОГЛАЗОВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ



А.И. ЩЕГЛОВ, А.В. БЕЛОГЛАЗОВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ



Учебное пособие

НОВОСИБИРСК

2015

УДК 621.316.925(075.8)

Щ 334

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *В.А. Давыдов*
канд. техн. наук, доцент *Э.М. Чекмазов*

Щеглов А.И.

Щ 334 Релейная защита электрических сетей: учеб. пособие /
А.И. Щеглов, А.В. Белоглазов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ,
2015. – 144 с.

ISBN 978-5-7782-2653-1

Рассмотрены принципы действия и расчет параметров срабатыва-
ния современных устройств релейной защиты высоковольтных элек-
трических сетей. Предназначено для использования при выполнении
выпускных бакалаврских и инженерных магистерских работ.

Работа подготовлена на кафедре электрических
станций для магистрантов направления «Электроэнергетика
и электротехника» (магистерская программа
«Автоматика энергосистем»)

УДК 621.316.925(075.8)

ISBN 978-5-7782-2653-1

© Щеглов А.И., Белоглазов А.В., 2015
© Новосибирский государственный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Релейная защита электрических сетей является первой частью курса «Релейная защита электроэнергетических систем», базовой дисциплиной при подготовке магистрантов по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (магистерская программа «Автоматика энергосистем»). В основу пособия положен курс лекций, неоднократно прочитанный при подготовке бакалавров данного направления и магистрантов первого года обучения.

Изучение курса базируется на начальных знаниях, полученных в дисциплине «Релейная защита и автоматизация», изучаемой ранее в рамках бакалаврской подготовки [2, 3, 4]. Основная задача курса – подготовка бакалавров и магистрантов к расчету релейной защиты высоковольтных линий на базе современных устройств. Такую задачу ставил профессор Л.В. Багинский [П9–П12]. Однако за прошедшее десятилетие устройства релейной защиты (УРЗ) претерпели существенные изменения и были полностью переведены на микропроцессорную базу. В настоящей работе предпочтение отдано отечественным шкафам ОАО НПП «Экра» [9]. Авторы активно использовали руководящие указания по релейной защите [5–8], которые по-прежнему являются основополагающими материалами при разработке методик расчета параметров срабатывания УРЗ; кроме того, использованы разработки института «Энергосетьпроект» [10, 11] и разработки производителя шкафов НПП «Экра». Одновременно в период подготовки и опробования пособия на кафедре электрических станций НГТУ были подготовлены и изданы методические указания с примерами расчета защит воздушных линий (ВЛ). Эти работы используются на практических занятиях и также могут быть рекомендованы при выполнении выпускных бакалаврских и магистерских работ.

1. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ВЛ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

1.1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ТИПЫ ЗАЩИТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Основным видом повреждений высоковольтных линий являются короткие замыкания (к.з.). В сетях с эффективно заземленной нейтралью (110 кВ и выше) имеют место как междуфазные к.з. ($K^{(3)}$, $K^{(2)}$) так и к.з. на землю ($K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$). В сетях с малыми токами замыкания на землю (3–35 кВ) короткие замыкания бывают только междуфазные. Однофазные замыкания не являются короткими замыканиями. Эти замыкания сопровождаются токами, обусловленными сопротивлением емкостей фаз относительно земли, трансформаторами напряжения, а также сопротивлениями дугогасящих катушек и высоковольтных реакторов, включенных в нейтрали трансформаторов. Величины этих токов на порядок меньше токов к.з., и действующие Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [1] допускают при данных видах повреждений защите действовать только на сигнал, если эти повреждения не представляют непосредственной опасности для жизни людей (например, электрические сети в шахтах и карьерах). Все эти замыкания должны отключаться релейной защитой (РЗ). Однако следует отметить недостаточное внимание, которое уделяется отключению релейной защитой замыканий на землю в сетях 3–35 кВ. Они не только представляют опасность для жизни людей и животных (падение провода на землю), но и приводят к появлению двойных к.з. (одновременно в разных точках сети).

На линиях 110 кВ и выше с двусторонним питанием обычно устанавливают в качестве основной быстродействующую защиту с абсолютной селективностью от всех видов к.з. В качестве резервных – ступенчатые защиты: отдельно от междуфазных к.з. (дистанционная защита – ДЗ) и от к.з. на землю (токовая направленная защита нулевой последовательности – ТНЗНП), на которые возложена функция дальнего резервирования.

В распределительных сетях 110–220 кВ в качестве основных и резервных защит, если они удовлетворяют быстродействию, применяют ступенчатые ДЗ и ТНЗНП. На тупиковых линиях часто удается и от междуфазных к.з. использовать токовые ступенчатые защиты.

В сетях 3–35 кВ защита от междуфазных к.з., как правило, выполняется в виде ступенчатых токовых защит. При этом в кольцевых сетях и сетях с двусторонним питанием используются направленные токовые защиты. Защита от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю занимает особое место в структуре релейной защиты, и вопрос о ней рассматривается в отдельном курсе.

1.2. КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ТИПА ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Выбор типа защиты воздушных линий (ВЛ) определяется необходимой скоростью устранения к.з. В сетях 330–500 кВ в качестве основных защит применяются защиты с абсолютной селективностью, устраняющие любое к.з. без выдержки времени.

В сетях 110–220 кВ быстродействия защиты может потребовать обеспечение устойчивой работы энергосистемы либо питание ответственных потребителей, не допускающих длительного перерыва в электроснабжении. Если предварительный расчет устойчивости не был произведен, то на стадии проектирования ПУЭ рекомендует использовать в качестве критерия уровень остаточного напряжения на шинах, от которых питаются межсистемные связи и ответственные потребители.

В соответствии с пунктом 3.2.106 все трехфазные к.з., которые вызывают снижение напряжения на указанных шинах ниже $0,6U_{\text{ном}}$, должны отключаться без выдержки времени. На рис. 1 приведена зависимость остаточного напряжения на шинах подстанции A от расстояния до места трехфазного к.з. на линии.

Остаточное напряжение на шинах находится как падение напряжения на участке от шин A до точки к.з. $Z_{\text{Л к.з.}}$ от тока $I_{\text{к.з.}}^{(3)}$:

$$U_{\text{ост}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{к.з.}}^{(3)} \cdot Z_{\text{Л к.з.}}$$

Участок линии, в пределах которого трехфазные к.з. вызывают посадку напряжения $U_{\text{ост}}$ ниже $0,6U_{\text{ном}}$, называют зоной $L_{0,6}$. Все К⁽³⁾ в этой зоне должны отключаться без выдержки времени. Эта зона

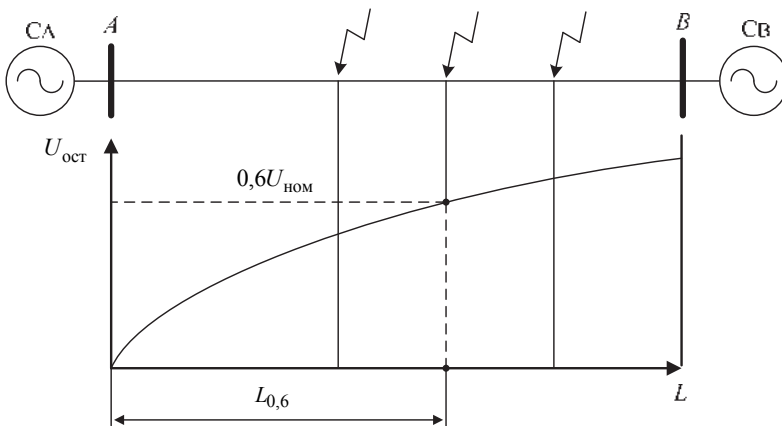


Рис. 1. Зависимость остаточного напряжения на шинах подстанции A от расстояния до места к.з. на линии AB

должна перекрываться первой ступенью токовой (дистанционной) защиты. Если этого не удалось обеспечить, то на линии с двусторонним питанием рекомендуется применять защиту с абсолютной селективностью (высоочастотную или дифференциальную). На радиальных линиях с односторонним питанием отключение к.з. без выдержки времени можно обеспечить ускорением второй ступени защиты в цикле АПВ (поочередное АПВ).

1.3. НАПРАВЛЕННЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

1.3.1. ПОТРЕБНОСТЬ В ОРГАНАХ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

В сетях с двусторонним питанием и кольцевых сетях токовые защиты часто приходится делать направленными. Направленными называются такие защиты, которые способны отличить к.з. на защищаемой линии от к.з. в питающей ее части сети по направлению тока. Так, на рис. 2 защита 4 должна срабатывать при к.з. на линии BC (точка КЗ) и не должна срабатывать в точках К1 и К2, которые по отношению к этой защите называют короткими замыканиями «за спиной».

Направленность защиты обеспечивается установкой дополнительного органа, реагирующего на угол между вектором тока, протекающего через защиту, и вектором напряжения на шинах подстанции (рис. 3).

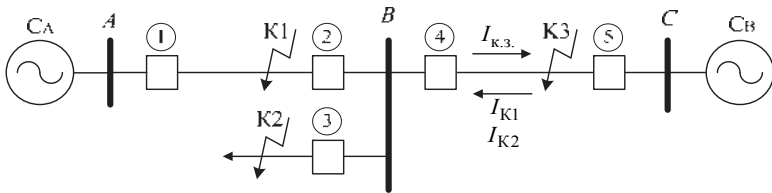


Рис. 2. Условия согласования защит в сети с двусторонним питанием

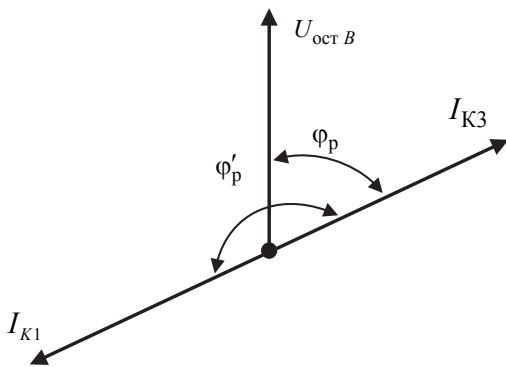


Рис. 3. Влияние места к.з. на угол между током к.з. через защиту и напряжением на шинах

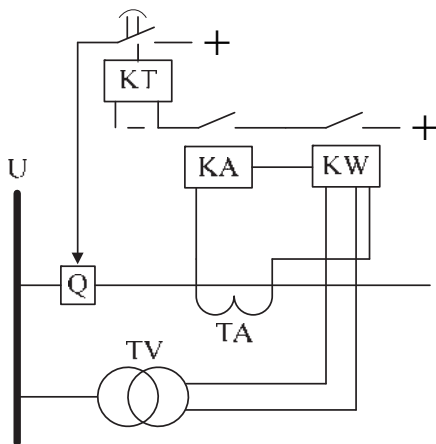


Рис. 4. Схема направленной токовой защиты

Такое реле называют реле направления мощности (KW). Его контакты включаются по схеме «И» с контактами реле тока (рис. 4).

Направленной необходимо выполнять защиту (на рис. 2 защита 4), если она не согласована с защитами «за спиной» (защиты 2 и 3). Мгновенную токовую отсечку (МТО) защиты 4 делают направленной, если ее ток срабатывания не отстроен от тока через защиту при к.з. на шинах В. Максимальную токовую защиту (МТЗ) комплекта 4 надо делать направленной, если она не отстроена по времени от МТЗ 2 и 3. Токтовую отсечку с выдержкой времени (ТОВВ) комплекта 4 необходимо сделать направленной, если она не отстроена по току от токовых отсечек защит 2 и 3, с которыми она согласована по времени.

1.3.2. ПРИНЦИП ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Реле направления мощности (РНМ) реагирует на три величины: напряжение \dot{U}_p и ток \dot{I}_p , подводимые к нему, и угол между ними φ_p .

В настоящее время существует большое число способов построения реле направления мощности. Однако широкое распространение получили два способа реализации:

- непосредственное реагирование на угол между двумя электрическими величинами (индукционное реле);
- сравнение времени совпадения по знаку двух электрических величин с заданным значением (временнй импульсная схема).

Индукционное реле направления мощности типа РБМ

Вращающий момент в индукционной системе пропорционален произведению двух магнитных потоков и синуса угла между ними ψ .

$$M_{вр} = k\Phi_I\Phi_U \sin \psi. \quad (1)$$

В качестве подвижного ротора в реле используется цилиндрический барабан (в отличие от диска в индукционном счетчике). Барабан вращается вокруг центральной оси, этому вращению препятствует пружина (рис. 5). Поток Φ_I создается рабочей обмоткой, подключенной к трансформатору тока (рис. 6). Поток Φ_U создается током I_U , протекающим по поляризирующей обмотке. γ_n – угол полного сопротивления поляризирующей обмотки.

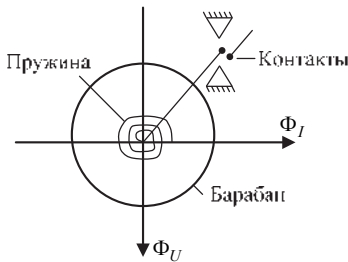


Рис. 5. Принцип действия реле

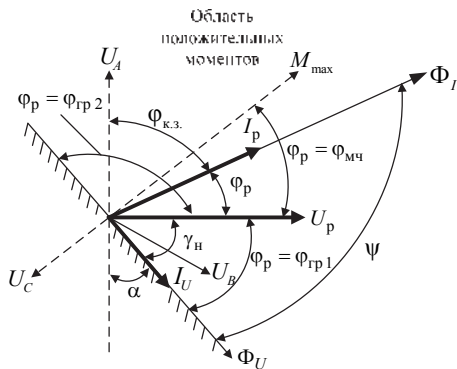


Рис. 6. Векторная диаграмма, характеризующая работу реле

$\Phi_I = k'I_p$; $\Phi_U = k''U_p$. Введем понятие внутреннего угла реле α как дополняющего угол полного сопротивления поляризующей обмотки до 90° : $\alpha = 90^\circ - \gamma_H$. Преобразуем выражение (1):

$$M_{вр} = k_1 U_p I_p \sin(\gamma_H^\circ + \varphi_p) = k_1 U_p I_p \cos(\varphi_p + \alpha). \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает следующее.

- С изменением φ_p момент меняется по величине и по знаку. Диапазон положительных моментов (область срабатывания) составляет 180° и находится между углами φ_p , определяющими границу срабатывания, когда

$$\cos(\varphi_p + \alpha) = 0,$$

$$\varphi_p + \alpha = 90^\circ; \quad \varphi_p + \alpha = -90^\circ,$$

$$\varphi_{гр1} = 90^\circ - \alpha; \quad \varphi_{гр2} = -90^\circ - \alpha.$$

На рис. 6 граница срабатывания заштрихована.

- Максимальный момент имеет место при

$$\cos(\varphi_p + \alpha) = 1; \quad \varphi_p + \alpha = 0; \quad \varphi_p = \varphi_{мч} = -\alpha.$$

Угол $\varphi_p = \varphi_{мч}$ называют углом максимальной чувствительности. Нужно стремиться, чтобы при к.з. в расчетной точке обеспечивалось условие $\varphi_p \cong \varphi_{мч}$. Этот угол регулируется добавлением в цепь поляризованной обмотки дополнительного активного сопротивления $R_{доп}$ или дополнительного емкостного сопротивления $X_{C доп}$.

Для направленных токовых защит от междуфазных коротких замыканий используются РНМ типа РБМ-171 с углами максимальной чувствительности, равными -30° и -45° , включаемые по девяностоградусной схеме.

Для ТНЗНП используется РНМ типа РБМ-178 с $\varphi_{мч} = 70^\circ$.

Для оценки работы реле применяют два типа характеристик:

- угловые, представляющие зависимость $S_{ср} = f(\varphi_p)$ (рис. 7);
- вольт-амперные, дающие зависимость $U_{ср} = f(I_p)$ (рис. 8).

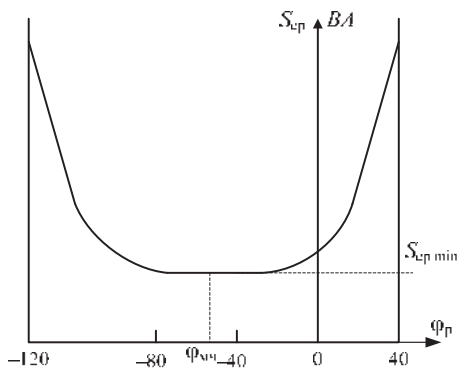


Рис. 7. Угловая характеристика РБМ

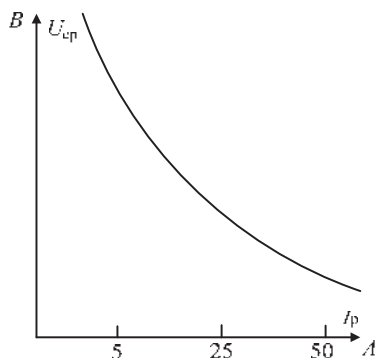


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика РБМ $\varphi_p = \varphi_{мч}$

Угловые характеристики, снятые при $I_{ном}$ и $U_{ном}$, позволяют определить угол максимальной чувствительности реле и минимальную мощность срабатывания $S_{ср min}$. Так, для реле РБМ-171 $S_{ср min} = 3...4 \text{ В} \cdot \text{А}$, а для реле РБМ-178 $S_{ср min} = 1...3 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Вольт-амперные характеристики позволяют определить $U_{ср min}$ при нахождении мертвой зоны по напряжению при близких междуфазных к.з.

Коэффициент чувствительности для индукционных реле направления мощности находится через мощность срабатывания:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р к.з.}} U_{\text{р к.з.}}}{S_{\text{ср min}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{р к.з.}}$ – ток в реле при расчетном к.з.; $U_{\text{р к.з.}}$ – напряжение на поляризирующей обмотке реле при к.з. в расчетной точке.

Реле на базе полупроводниковых усилителей-ограничителей (РМ-11; РМ-12)

Принцип действия реле (рис. 9) основан на сравнении времени совпадения и несовпадения по знаку мгновенных значений напряжений, повторяющих измеряемые напряжения $U_{\text{р}}$ и ток $I_{\text{р}}$.

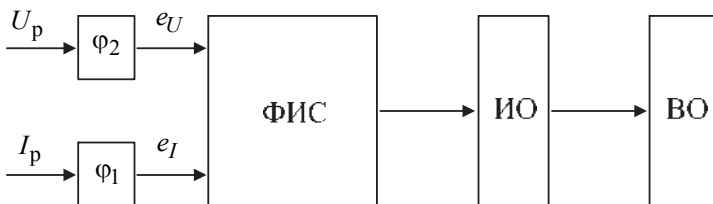


Рис. 9. Принципиальная блок-схема реле РМ-11

На рис. 9 φ_1 и φ_2 – фазоповоротные устройства, используемые для получения напряжений e_U и e_I и регулирования угла максимальной чувствительности; ФИС – формирователь прямоугольных импульсов в момент совпадения по знаку мгновенных значений e_U и e_I ; ИО – интегрирующее устройство, выдающее сигнал, зависящий от длительности совпадения по знаку мгновенных значений e_U и e_I ; ВО – выходной орган, формирующий сигнал на отключение при заданной величине сигнала на выходе ИО.

Подробнее с работой и характеристиками реле РМ-11 можно ознакомиться в лаборатории [П6]. Характеристики срабатывания реле приведены на рис. 10, а и б.

Указанные реле имеют целый ряд преимуществ по сравнению с индукционными:

- меньшую потребляемую мощность по цепям тока и напряжения;

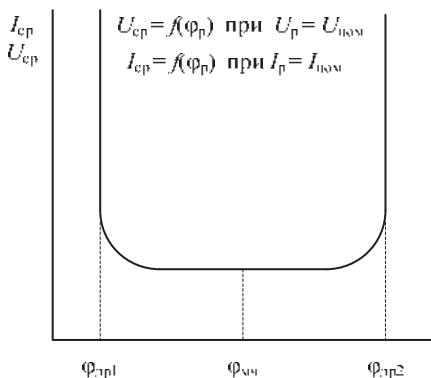


Рис. 10, а. Угловая характеристика РМ-10

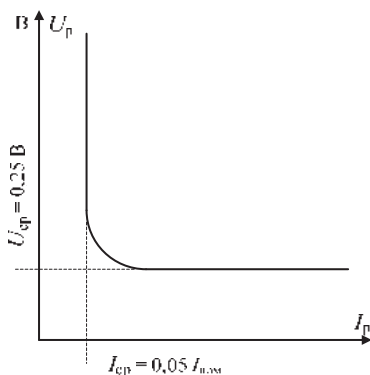


Рис. 10, б. Вольт-амперная характеристика Р-10 $\varphi_p = \varphi_{мч}$

- меньшие габариты;
- устойчивость к погрешностям трансформаторов тока до 50 %.

Углы максимальной чувствительности такие же, как и у индукционных реле.

По этому же принципу строят органы направления мощности (ОНМ) в современных микропроцессорных шкафах. Независимость друг от друга параметров срабатывания позволяет определять коэффициенты чувствительности отдельно по току и напряжению.

1.3.3. СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ МЕРТВОЙ ЗОНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Как показано в разделе 1.3.2, для срабатывания реле направления мощности необходимо, чтобы I_p и U_p превышали некоторые минимальные значения. Для защиты, реагирующей на междуфазные к.з., проблемы с током I_p , как правило, не возникает, но остаточное напряжение в месте установки защиты при близком к.з. может быть близким к нулю, и это может привести к отказу срабатывания РНМ и блокированию защиты.

Включение поляризующей обмотки на напряжение неповрежденной фазы

Как известно, трехфазные к.з. по статистике бывают достаточно редко. Следовательно, при несимметричных к.з. для питания поляризую-

шей обмотки могут быть использованы напряжения неповрежденных фаз. Так, при двухфазном к.з. напряжение между здоровой и одной из поврежденных фаз не может быть меньше, чем $1,5 U_{\phi}$. На рис. 11 показана векторная диаграмма при двухфазном к.з. между фазами B и C .

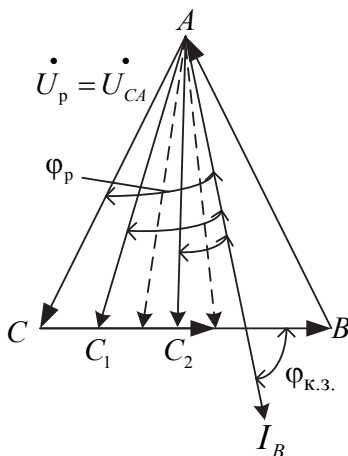


Рис. 11. Остаточные напряжения при двухфазном к.з.

При к.з., близком к месту установки защиты, напряжение U_{BC} стремится к нулю, а напряжения U_{CA} и U_{AB} с линейного значения изменяются только до $1,5U_{\phi}$. Поэтому на практике принято включать обмотки реле направления мощности в направленных токовых защитах от междуфазных к.з. по девяностоградусной схеме (табл. 1).

Таблица 1

Схема включения реле по девяностоградусной схеме

Реле	1	2	3
I_p	I_A	I_B	I_C
U_p	U_{BC}	U_{CA}	U_{AB}

Как показывает анализ, оптимальны в этом случае реле мощности с углом максимальной чувствительности $\varphi_{мч} = -30^\circ(-45^\circ)$ (пример, см. рис. 6). Именно такие реле выпускает наша промышленность.

Применение реле направления мощности блокирующего типа

При близких трехфазных к.з. избежать мертвой зоны у реле направления мощности не удастся. Поэтому стремятся хотя бы одну из ступеней такой защиты сделать ненаправленной. Если по условию чувствительности или быстродействию это недопустимо, целесообразно применять реле мощности блокирующего типа. В защите, показанной на рис. 4, РНМ при к.з. на защищаемом участке замыкает свои контакты и разрешает реле тока действовать на пуск реле времени.

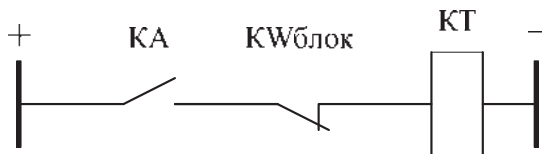


Рис. 12. Схема МТЗ с блокирующим РНМ

Такое РНМ называется «разрешающим». Чтобы сделать его блокирующим, надо поменять полярность его токовой обмотки (тогда области положительных и отрицательных моментов на рис. 6 меняются местами), а вместо замыкающих контактов реле использовать размыкающие (рис. 12). Такое реле направления мощности не сработает на защищаемом участке и не помешает токовому реле действовать на отключение. При к.з. «за спиной» РНМ сработает и заблокирует защиту.

1.3.4. ВЛИЯНИЕ ТОКОВ НЕПОВРЕЖДЕННЫХ ФАЗ НА ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

При к.з. на землю в здоровых фазах неповрежденных линий могут возникнуть токи, способные вызвать неселективное срабатывание РНМ. Токи в неповрежденных фазах обусловлены тем, что токи нулевой и прямой (обратной) последовательностей распределяются по разным схемам замещения. В качестве примера рассмотрим однофазное к.з. в фазе *A* на линии 3 (рис. 13). На поврежденной линии Л3 ток течет только в фазе *A*, так как $|I_I| = |I_{II}| = |I_0|$ (рис. 14). За счет разного соотношения сопротивлений прямой и нулевой последовательностей в системах *C'* и *C''* равенство токов прямой и нулевой последовательностей нарушается и появляются токи в неповрежденных фазах *B* и *C* в линиях Л1 и Л2.

В линии Л1 $I'_I > I'_0$ и токи в неповрежденных фазах противоположны по фазе току в поврежденной фазе I'_A (рис. 15, *a*). В линии Л2

$I'_1 < I'_0$ и токи в неповрежденных фазах совпадают по фазе с током поврежденной фазы I''_A (рис. 15, б).

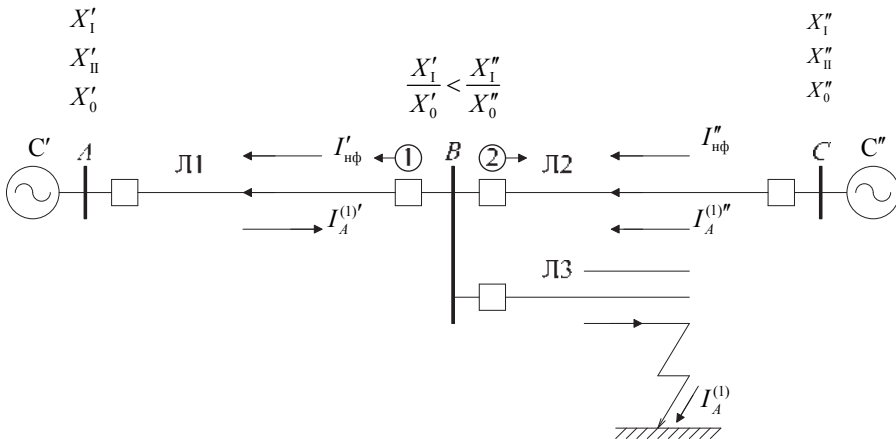


Рис. 13. Распределение токов по фазам при однофазном к.з. в фазе А

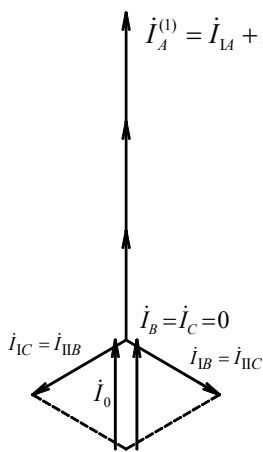


Рис. 14. Токи в фазах поврежденной линии 3

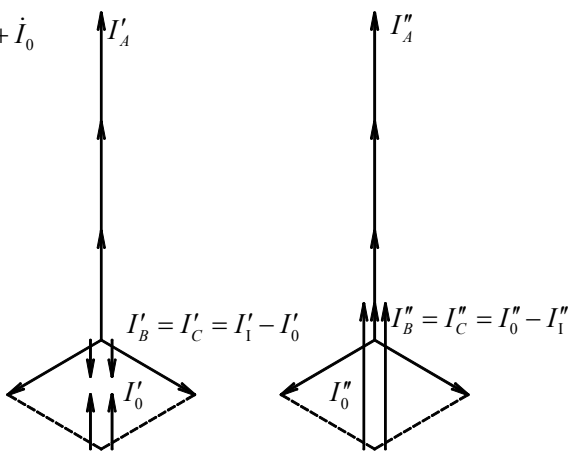


Рис. 15. Токи в фазах неповрежденных линий:
а – в линии 1, где $I'_0 < I'_1$; б – в линии 2, где $I''_0 > I''_1$

Проанализируем, как поведет себя реле направления мощности в защите 2, установленное в фазе C , по которой течет ток $I''_{\text{нф}C}$ при коротком замыкании на ЛЗ (рис.16). Проведем границу зоны срабатывания РНМ в фазе A перпендикулярно вектору $I_A^{(1)''}$. Зона срабатывания этого реле находится по другую сторону границы относительно вектора этого тока, так как в защите 2 в поврежденной фазе РНМ блокирует защиту. Аналогично определим зону действия РНМ, установленного в фазе C линии 2 (эти построения выполнены пунктирно).

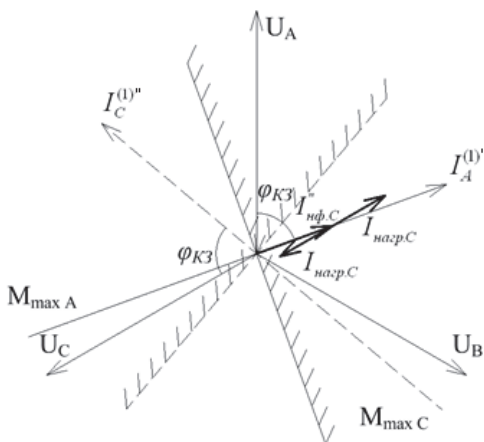


Рис. 16. Влияние токов неповрежденных фаз на РНМ

Из рис. 16 видно, что вектор тока неповрежденной фазы C (изображен жирно) попадает в область срабатывания РНМ, установленного в данной фазе. В этом случае ток нагрузки в фазе C (изображен совпадающим по фазе с напряжением фазы C) может арифметически складываться с током неповрежденной фазы, обусловленным током нулевой последовательности.

Таким образом, рассмотренный анализ показал, что при к.з. на землю РНМ в здоровых фазах неповрежденных линий могут ложно сработать при к.з. «за спиной».

Существует два способа исключения такой ситуации.

1. Токи срабатывания пусковых органов (реле тока) помимо традиционных способов отстройки (возврат при самозапуске и т. д.) необхо-

димо отстраивать еще и от максимально возможных токов в неповрежденных фазах при к.з. на землю на смежном участке.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{сз} = \frac{K_{отс} K_{сзп}}{K_B} I_{раб. max} , \\ I_{сз} = K_{отс} I_{нф} = K_{отс} \left(|I_{0 нф}| + |I_{нагр}| \right). \end{array} \right.$$

Однако следует отметить, что расчет этих токов – нелегкая задача. При этом схема включения контактов реле тока и РНМ должна быть пофазной (рис. 17).

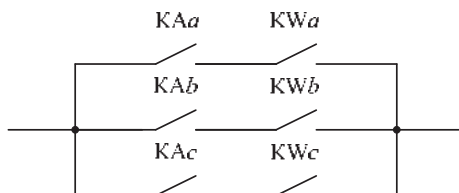


Рис. 17. Схема включения контактов реле

2. Поскольку основная причина появления токов в неповрежденных фазах – токи нулевой последовательности, целесообразно защиту от к.з. на землю возложить на ТНЗНП, а защиту от междуфазных к.з. по факту срабатывания пусковых органов ТНЗНП блокировать. Так, в частности, поступают при выполнении поперечной дифференциальной токовой направленной защиты (см. раздел 4.2.2).

1.4. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ К.З. В СЕТЯХ 110 – 220 кВ

В сетях 110–220 кВ на линиях с двусторонним питанием, как правило, применяют более совершенные дистанционные защиты. Однако существует целый ряд случаев, когда токовые защиты в сетях данных напряжений считаются целесообразными к применению как более простые, более надежные и дешевые.

1.4.1. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ РАДИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

В таких сетях напряжением 35–110–220 кВ для защиты от междофазных к.з. обычно используют ступенчатые токовые защиты. Классический пример – трехступенчатая защита: МТО, ТОВВ и МТЗ. Токовая отсечка с выдержкой времени согласуется по току и времени с мгновенными отсечками смежных участков, а если такое согласование не обеспечивает требуемого коэффициента чувствительности $K_{\text{ч}} = 1,3$ в конце линии, то – со вторыми (ТОВВ) ступенями смежных линий.

На тупиковых линиях, питающих только понижающие трансформаторные подстанции, защиту стремятся сделать двухступенчатой (МТО и МТЗ). В этом случае (рис. 18) токовую отсечку без выдержки времени делают без мертвой зоны.

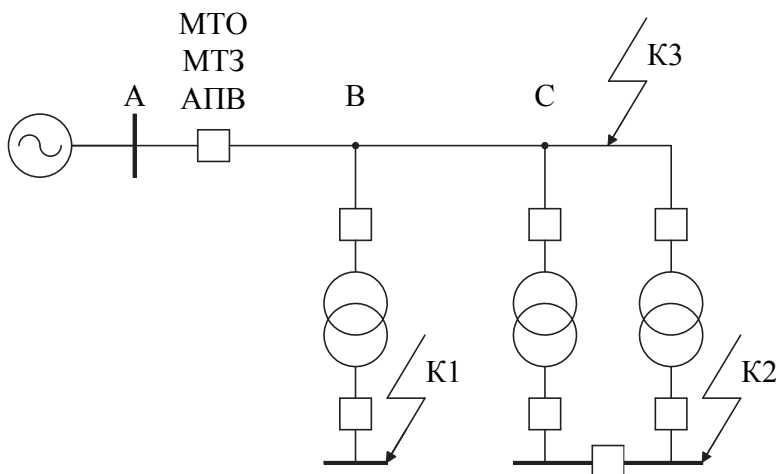


Рис. 18. Тупиковая линия, питающая понижающие трансформаторные подстанции

Ее ток срабатывания отстраивается от максимального тока к.з., протекающего через защиту при к.з. в точках К1 и К2. В точке К3 должен быть обеспечен $K_{\text{ч}}$ не менее 1,3. Тогда нет необходимости иметь отсечку с выдержкой времени. Второй ступенью является резервная защита – МТЗ. Однако при к.з. на выводах трансформаторов МТО будет неселективно отключать головной выключатель. Но при этом

одновременно сработает дифференциальная защита трансформатора, отключив свой выключатель, что приведет к тому, что АПВ на головном выключателе будет успешным. Такое выполнение защиты исключает длительное снижение напряжения на шинах системы, связанных с к.з. на линии. Вероятность же к.з. в трансформаторах, приводящих к неселективным отключениям, несоизмеримо мала по сравнению с к.з. на самой линии.

Точно так же выполняется защита линий, когда на понижающих трансформаторных подстанциях на стороне высшего напряжения отсутствуют выключатели (рис. 19). В этом случае используются короткозамыкатели QN и отделители QR. Это простейшие устройства, представляющие разъединители с приводами. При к.з. в трансформаторе от его защиты включится короткозамыкатель и устроит металлическое к.з. на стороне высшего напряжения, на которое среагирует защита линии и отключит головной выключатель. В бестоковую паузу произойдет отключение отделителя, что обеспечит успешность последующего АПВ.

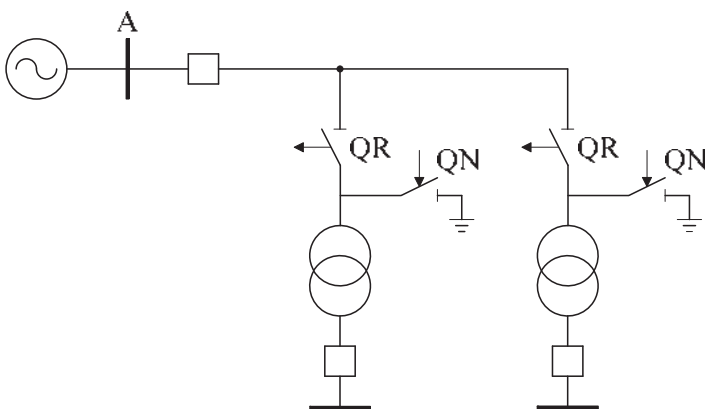


Рис. 19. Линия без выключателей на понижающих подстанциях

На коротких линиях и мощных трансформаторах выполнение токовой отсечки затруднительно из-за малой разницы между токами к.з. в линии и за трансформаторами. Напряжение же на шинах изменяется от нуля при близких к.з. до значения, равного произведению тока к.з. на сопротивление защищаемого элемента. В этом случае целесообразно применять комбинированную отсечку по току и напряжению. Ток сра-

батывания токового органа выбирается из условия требуемого коэффициента чувствительности $K_{\text{ч}} \approx 1,5$ при двухфазном к.з. в конце линии в минимальном режиме:

$$I_{\text{co}} = \frac{I_{\text{к.з. min}}^{(2)}}{K_{\text{ч}}}. \quad (4)$$

Кроме того, ток срабатывания отсечки должен быть надежно отстроен от максимального тока самозапуска. Напряжение срабатывания отсечки по напряжению согласуется с током срабатывания токовой отсечки:

$$U_{\text{co}} \leq \frac{\sqrt{3} I_{\text{co}} (Z_{\text{Л}} + Z_{\text{T}})}{K_{\text{отс}}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,15$ – коэффициент отстройки.

Реле минимального напряжения включается на линейные напряжения всех фаз, что позволяет осуществить пуск защиты при любом междуфазном к.з. (рис. 20).

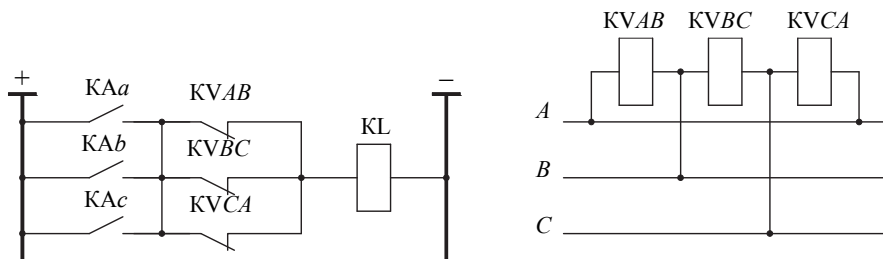


Рис. 20. Схема комбинированной отсечки по току и напряжению:

a – оперативные цепи; *б* – цепи напряжения

Для надежного функционирования комбинированной отсечки необходимо, чтобы коэффициент чувствительности по напряжению при к.з. в конце линии был примерно 1,4–1,5:

$$K_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{co}}}{\sqrt{3} I_{\text{к.з. max}}^{(3)} X_{\text{Л}}}. \quad (4)$$

1.4.2. ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ В КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

В соответствии с рекомендацией ПУЭ (п. 3.2.112) в кольцевой сети с одним источником питания (рис. 21) на приемных концах питающих линий Л1 и Л3 для защиты от междуфазных к.з. следует устанавливать токовые направленные защиты без выдержки времени. Это касается комплектов 2 и 5. В самом деле, ток через эти комплекты может протекать в направлении их действия (от шин в линию) только при к.з. на самой защищаемой линии. При к.з. на шинах подстанции *A* ток по кольцу вообще не циркулирует. Значит, ток срабатывания этих комплектов не нужно отстраивать от к.з. на шинах *A*. Но зато при к.з. на самой линии вблизи шин *A* защита способна сработать только после отключения выключателя Q1. В этом режиме и рекомендуется выбирать ток срабатывания, задавшись $K_{\text{ч}} = 1,5$. Ток срабатывания комплекта 2 находится исходя из минимального тока к.з. вблизи шин подстанции *A* в каскадном режиме, после отключения выключателя Q1:

$$I_{\text{сз } 2} = \frac{I_{\text{к.з. min}}^{(2)}}{K_{\text{ч}}}. \quad (7)$$

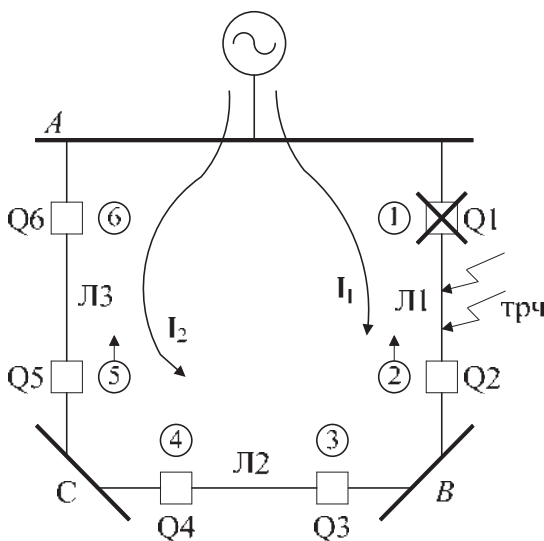


Рис. 21. Кольцевая сеть с одним источником питания

Однако условие (7) не исключает, что в замкнутом режиме работы кольца к.з. на линии AB защита 2 будет отключать только тогда, когда точка к.з. выйдет за пределы зоны действия первой ступени защиты 1. Это означает, что к.з. в замкнутом кольце (именно в этом режиме будет наблюдаться наибольшая посадка напряжения на подстанции A) начнет устраняться только после срабатывания второй ступени защиты 1. Это приведет к длительной посадке напряжения. Для исключения такого развития событий необходимо так выбрать ток срабатывания защиты 2, чтобы обеспечить в точке равной чувствительности первой ступени комплекта 1 и защиты 2 коэффициент чувствительности не менее чем 1,5. Если защита 1 токовая ступенчатая, то эту задачу можно решить только графоаналитическим способом. Для этого, перемещая точку к.з. от шин подстанции A до подстанции B , находят токи через комплекты защит 1 и 2 (рис. 22). Затем графически находят точку на линии, где первая ступень защиты 1 отключает к.з. с требуемым коэффициентом чувствительности, и находят ток, протекающий через защиту 2. Искомый ток срабатывания определяется как

$$I_{сз\ 2} = \frac{I_{расч\ 2}}{K_{\chi}} . \quad (8)$$

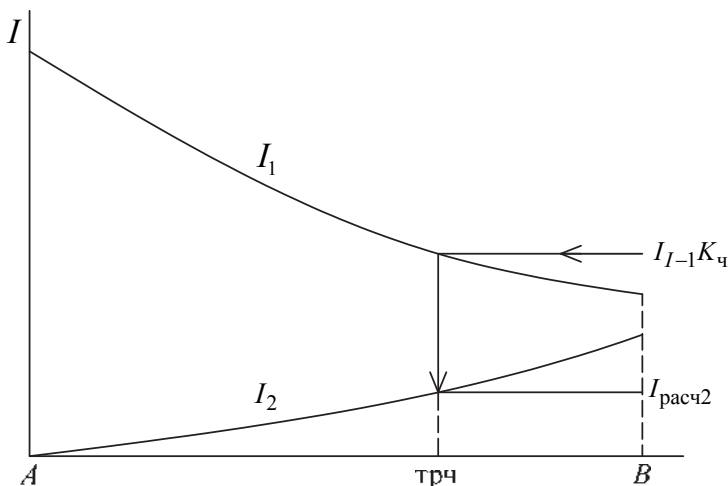


Рис. 22. Графоаналитический способ определения тока срабатывания защиты 2

Проще эту задачу решить, если защита 1 – дистанционная. Тогда точку равной чувствительности можно найти через

$$Z_{сз I-1} : Z_{A \text{трч}} = Z_{сз I-1} / K_{\text{ч}}.$$

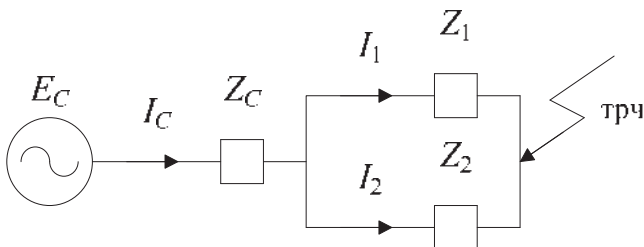


Рис. 23. Схема замещения при расчете токов к.з. в замкнутом кольце

Затем для этой точки рассчитывается ток, протекающий через защиту 2 – $I_{\text{расч } 2}$, а далее необходимо воспользоваться выражением (8). Однако не следует забывать, что токи I_1 и I_2 созданы ЭДС одного источника, имеющего свое сопротивление Z_C . Поэтому сначала находится эквивалентное сопротивление для найденной точки равной чувствительности, затем ток I_C и только потом определяются токи I_1 и I_2 путем его распределения по ветвям схемы (рис. 23).

2. ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ ЛЭП

Дистанционные защиты – это защиты, измерительным органом в которых является реле сопротивления, реагирующее на $Z_p = U_p / I_p$. Оно реагирует сразу на три параметра: напряжение в месте установки U_p , ток, протекающий через защиту, I_p и угол между этими величинами φ_p . Благодаря этому дистанционная защита имеет целый ряд преимуществ перед токовыми.

1. Зона действия первой ступени ДЗ стабильна, составляет 85 % от длины защищаемой линии и не зависит от вида к.з. и режима работы системы, так как реле сопротивления реагирует на сопротивление от места установки защиты до точки короткого замыкания.

2. Характеристика срабатывания реле сопротивления имеет направленный характер, что позволяет использовать ДЗ в сетях с двусторонним питанием.

3. Форму характеристики можно подобрать так, что, обеспечивая надежное срабатывание защиты в режиме к.з., реле сопротивления не придет в действие в рабочем режиме.

2.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Характеристика срабатывания реле сопротивления – это геометрическое место точек на комплексной плоскости, ограничивающее область, при попадании в которую конца вектора измеряемого сопротивления происходит срабатывание реле. Характеристики реле сопротивления стремятся делать такими, чтобы реле сработало при к.з. в любой точке защищаемого объекта, в том числе и через дугу, и не сработало при к.з. «за спиной» и в рабочем режиме.

Электрическая дуга обладает активным сопротивлением, величину которого можно найти по эмпирической формуле [11]:

$$R_d = \frac{1,05L_d}{I_d}, \quad (9)$$

где L_d – длина дуги [м]; I_d – ток, протекающий через дугу [кА].

Следовательно, характеристика срабатывания должна охватывать не только сопротивление защищаемой линии, но и добавленное к ней сопротивление дуги. Однако на линии с двусторонним питанием дуга подпитывается сразу от обоих источников (рис. 24).

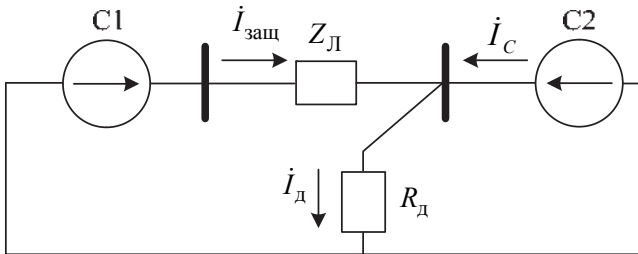


Рис. 24. Подпитка дуги от второго источника

Измеряемое защитой линии сопротивление с учетом сопротивления дуги:

$$Z_p = Z_L + \frac{\dot{I}_d}{\dot{I}_p} R_d = Z_L + R_d \frac{1}{\dot{K}_T}, \quad (10)$$

где $\dot{K}_T = \dot{I}_p / \dot{I}_d$ – комплексный коэффициент токораспределения.

При к.з. в конце защищаемого участка в общем случае угол между I_p и I_d может существенно отличаться от нуля (при нарушении синхронной работы – от 0° до 360°). Это значит, что вектор R_d будет описывать окружность. В итоге зона защиты линии Z_L может быть представлена в виде фигуры, показанной на рис. 25.

К сожалению, на протяжении многих лет все реле сопротивления строились на базе схем сравнения двух электрических величин по модулю и по фазе. Все они имели характеристики срабатывания в виде окружности или в лучшем случае в виде эллипса (рис. 26). Способы получения таких характеристик описаны в литературе, в том числе и пособии Л.В. Багинского [п9], и рассматриваются в курсе «Элементы

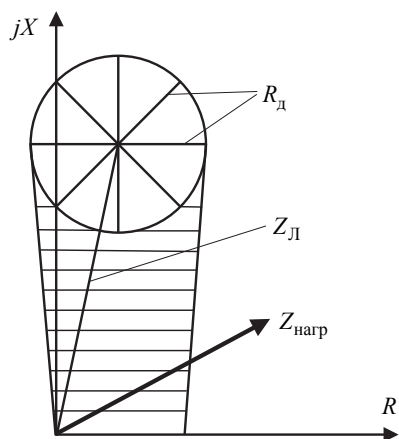


Рис. 25. Зона необходимого обхвата дистанционной защиты

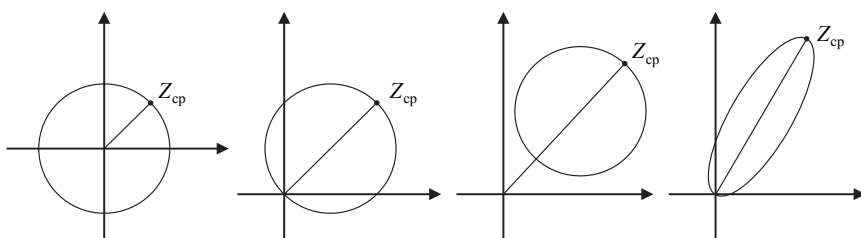


Рис. 26. Реле сопротивления с круговыми характеристиками

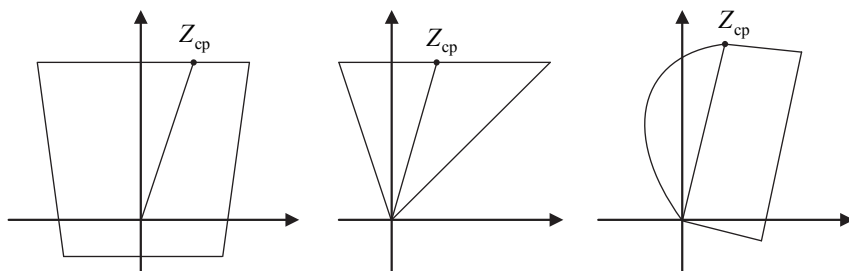


Рис. 27. Реле сопротивления со сложными характеристиками

автоматических устройств». Эти реле не в состоянии одновременно удовлетворять всем предъявляемым к ним требованиям. Только с началом широкого использования в релейной защите микроэлектроники, а далее и микропроцессорной техники удалось получить реле с характеристиками, удовлетворяющими требованиям к дистанционным защитам (рис. 27).

Однако первые попытки создать реле сопротивления с так называемыми «сложными» характеристиками оказались недостаточно удачными. Характеристики не меняли своей формы, а с изменением уставки срабатывания ($Z_{ср}$) меняли только размер. Это не позволяло во многих случаях полностью реализовать основные требования к дистанционным защитам. В настоящее время на базе микропроцессорных терминалов удалось получить реле сопротивления с универсальными характеристиками. Примером таких реле являются реле сопротивления в микропроцессорных шкафах типа ШЭ2607-011(021), выпускаемых отечественной фирмой «Экра».

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ШКАФОВ ШЭ2607-011(021) ФИРМЫ «ЭКРА»

В настоящее время в отечественных энергосистемах применяются микропроцессорные защиты разных фирм, в том числе и зарубежных. Но наибольшее распространение для защиты электрических сетей напряжением 110 кВ и выше, трансформаторов, блоков, сборных шин нашли шкафы Чебоксарской фирмы «Экра», на которые в дальнейшем будем ориентироваться.

Характеристики срабатывания ступеней дистанционных защит шкафов ШЭ2607-011(021) показаны на рис. 28.

Характеристики срабатывания реле этих шкафов типа REL заимствованы у защит международной фирмы ABB. На рис. 28 изображены характеристики пяти ступеней ДЗ. В нашей традиционной отечественной практике используется три ступени (I, II и III). Четвертая ступень может быть использована в дополнение ко второй ступени, с большей выдержкой времени. Пятая – может быть использована как первая дистанционная ступень от к.з. на землю (в дополнение к ТНЗНП).

Форма характеристик всех ступеней – это параллелограмм с наклоном его вертикальных осей под углом ϕ_1 . Для придания направленности

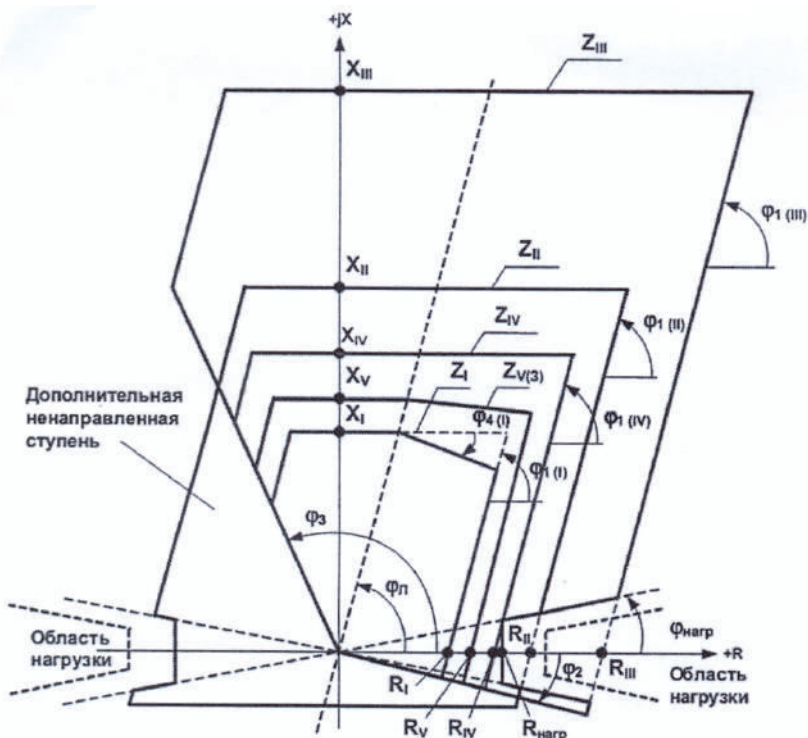


Рис. 28. Характеристики срабатывания реле сопротивления ступеней ДЗ

характеристикам проведено их урезание лучами под углами φ_2 и φ_3 . В итоге характеристики приобретают форму пятиугольника (релейщики называют ее «топориком»).

В каждой из этих характеристик подлежат регулировке пять параметров:

X_y – уставка по реактивной оси;

R_y – уставка по активной оси;

φ_1 – угол наклона вертикальных граней параллелограмма;

φ_2, φ_3 – углы секущих линий.

Характеристика первой ступени позволяет менять угол наклона верхней грани φ_4 .

Кроме того, имеется возможность вырезать сектор из характеристик ступеней, если не удалось какие-то из них отстроить от сопротивления рабочего режима $Z_{\text{раб}}$. Для этого регулируют параметры $R_{\text{нагр}}$ и $\Phi_{\text{нагр}}$.

Диапазоны изменения всех параметров приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Диапазоны изменения параметров характеристик срабатывания

Ступени	Диапазон изменения параметров						
	$R_y, R_{\text{нагр}}$ (Ом на фазу)	X_y (Ом на фазу)	Φ_1°	Φ_3°	Φ_3°	Φ_5°	$\Phi_{\text{нагр}}^\circ$
I	0,2...100 ($I_{\text{ном}} = 5 \text{ A}$)	0,2...100 ($I_{\text{ном}} = 5 \text{ A}$)	45...89	-89...0	91...179	-45...0	5...60
II						—	
III						—	
IV						—	
V	($I_{\text{ном}} = 1 \text{ A}$)	($I_{\text{ном}} = 1 \text{ A}$)				—	

Также в комплект защиты входит ненаправленная ступень. Уставки ее соответствуют уставкам второй ступени, но она не имеет выхода на отключение, а используется только для подхвата первой ступени при близких к.з. с целью исключения мертвой зоны. Ее характеристика заходит в III и IV квадранты на $0,1X_{y \text{ II}}$. Коэффициенты возврата всех ступеней $K_{\text{в}} = 1,05$. Ток точной работы реле $I_{\text{тр}} = 0,1I_{\text{ном}}$. Минимальное напряжение, при котором обеспечивается точная работа реле, составляет 0,5 В.

2.3. РАСЧЕТ УСТАВОК СТУПЕНЕЙ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТИПА REL [П.13]

2.3.1. УСЛОВИЯ ВЫБОРА УСТАВОК ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТИПА REL

Эти условия определены методическими указаниями по расчету и выбору уставок ОАО «Энергосетьпроект» [11].

Угол Φ_1 для всех ступеней ДЗ может быть рекомендован равным углу полного сопротивления защищаемой линии ($\Phi_1 = \Phi_{\text{Л}}$). Угол Φ_3

для всех ступеней может быть принят $\varphi_3 = 115^\circ$, угол $\varphi_2 = -15^\circ$. В случае, если в используемой версии шкафа отсутствует блок отстройки от $Z_{\text{нагр}}$, при необходимости для третьей ступени защиты угол φ_2 может быть принят больше $\varphi_{\text{раб}}$ по условию (25), которое будет рассмотрено далее.

Угол наклона верхней грани реле первой ступени φ_4 принимается равным:

$$\varphi_4 = 90^\circ - \varphi_1. \quad (11)$$

Расчет уставок по реактивному и активному сопротивлениям проводится независимо.

Уставка по реактивному сопротивлению выбирается по условию

$$X_y = K Z_{\text{к.з. расч}} \sin \varphi_{\text{к.з. расч}}, \quad (12)$$

где $Z_{\text{к.з. расч}}$, $\varphi_{\text{к.з. расч}}$ – модуль и угол полного сопротивления контура при междуфазном к.з. в расчетной точке; $K = 1,25$ – рекомендуемое значение коэффициента чувствительности по реактивной составляющей при выборе уставки третьей ступени по условию чувствительности в зоне дальнего резервирования; $K = 0,85$ – рекомендуемое значение коэффициента отстройки для определения первой ступени по условию отстройки от к.з. в конце линии; $K = 0,8$ – рекомендуемое значение коэффициента отстройки от к.з. вне защищаемой линии при выборе уставки второй ступени.

Коэффициент чувствительности второй ступени при к.з. в конце линии находится по выражению

$$K_{\text{ч II}} = \frac{X_{y \text{ II}}}{Z_{\text{к.з. расч}} \sin \varphi_{\text{к.з. расч}}}. \quad (13)$$

Значение коэффициента чувствительности, найденное по выражению (13), не должно быть менее 1,25.

Уставки ступеней по активной оси R_y выбираются по условию обеспечения достаточной чувствительности к короткому замыканию, сопровождающемуся дугой предельно возможной длины:

$$R_y \geq K_{\text{ч}} \left[\frac{Z_{\text{к.з.}} \sin(\varphi_1 - \varphi_{\text{к.з.}})}{\sin \varphi_1} + 0,52 \frac{L_{\text{д}}}{I_{\text{защ min}}^{(2)}} \right], \quad (14)$$

где $K_{\text{ч}} = 1,1$ – коэффициент чувствительности; $I_{\text{защ min}}^{(2)}$ – ток через защиту при двухфазном к.з. в расчетной точке.

Второе слагаемое в выражении (14) получено из формулы (9) с учетом того, что при принятом способе включения реле сопротивления на разность токов двух фаз при двухфазном к.з. действие тока удваивается (рис. 29).

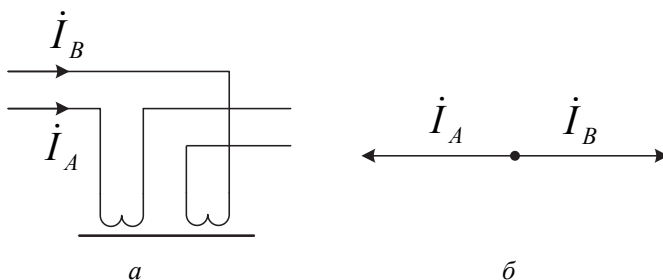


Рис. 29. Способ формирования расчетного сопротивления:

a – схема включения обмоток; b – векторная диаграмма токов

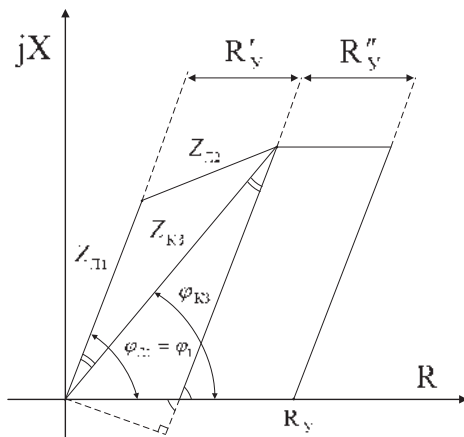


Рис. 30. Составляющие расчетного сопротивления

Первое слагаемое в выражении (14) появляется при расчете уставки третьей ступени, когда угол полного сопротивления смежного участка меньше угла φ_1 (рис. 30). Эта слагаемая может получиться отрицательной, если $\varphi_{Л2} > \varphi_{Л1}$, тогда с целью запаса ею можно пренебречь.

Длину дуги в выражении (14) следует принимать с учетом напряжения сети (расстояния между фазами) и длительности ее горения. К последнему вернемся при рассмотрении условий выбора уставок ступеней.

2.3.2. РАСЧЕТ УСТАВОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ДЗ

Уставка по реактивной оси выбирается по условию отстройки от к.з. в конце линии в соответствии с выражением (12):

$$X_{yI} \leq 0,85 Z_{Л} \sin \varphi_{Л} \leq 0,85 X_{Л}.$$

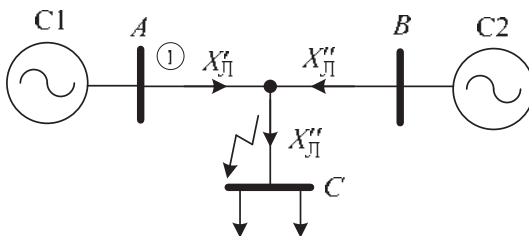


Рис. 31. Трехконцевая схема

Если линия многоконцевая (рис. 31), то отстройку необходимо обеспечить от к.з. на всех концах линии с учетом коэффициента токораспределения. Так, при к.з. на шинах С надо обеспечить:

$$X_{yI} \leq 0,85 \left(X'_{Л} + \frac{X''_{Л}}{K_{T \max}} \right).$$

Уставка по активному сопротивлению определяется по выражению (14). При этом $I_{\text{защ min}}^{(2)}$ можно принять равным току, протекающему через защиту по поврежденной фазе при к.з. на противоположной стороне от места установки защиты, когда он минимален. Длину дуги при расчете первой ступени можно принять равной междуфазному расстоянию (для сети 110 кВ — $l_{\text{мф}} \approx 4$ м; для сети 220 кВ — $l_{\text{мф}} \approx 5,5$ м и т. д.).

Рассчитанные уставки следует пересчитать ко вторичным цепям через коэффициенты трансформации ТТ и ТН.

$$\begin{cases} X_{I \text{ вт}} \leq X_{yI} \frac{K_I}{K_U}, \\ R_{I \text{ вт}} \geq R_{yI} \frac{K_I}{K_U}. \end{cases} \quad (15)$$

Уставку реле необходимо привести в соответствие с табл. 2.

Недостатком первой ступени является ее неустойчивое срабатывание при близком к.з., при котором реле находится на грани срабатывания. В ДЗ прежних поколений отключение этих к.з. возлагалось на вторую ступень с выдержкой времени, характеристика которой смещалась в III и IV квадранты. В данном шкафу для этого используется дополнительная ненаправленная ступень, которая сама не имеет выхода на отключение, а используется для подхвата первой ступени при близком к.з. (рис. 32).

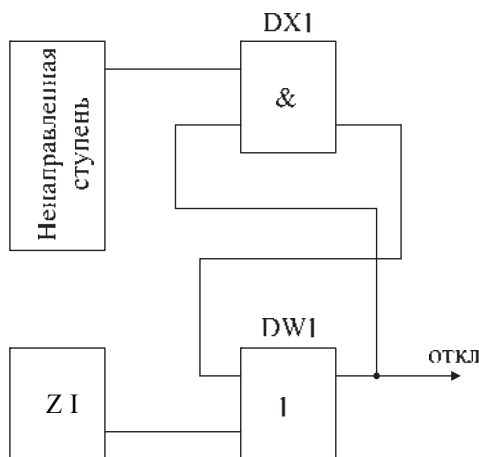


Рис. 32. Схема подхвата первой ступени

В этой схеме достаточно кратковременного срабатывания первой ступени, чтобы элемент логики «ИЛИ» DW1 встал на самоудерживание и выдавал сигнал на отключение до тех пор, пока остается в рабочем состоянии ненаправленная ступень.

2.3.3. РАСЧЕТ УСТАВОК ВТОРОЙ СТУПЕНИ ДЗ

Задача второй ступени – защитить всю линии с коэффициентом чувствительности не менее 1,25. Уставка по реактивной оси должна быть согласована с защитами смежных участков, желательно с быстродействующими.

Согласование уставки по реактивной оси с первыми ступенями защит линии, примыкающих к приемной подстанции

$$\begin{aligned} X_{II-1} &\leq 0,8Z_{\text{расч}} \sin \varphi_{\text{расч}} = 0,8 \left(Z_{Л1} + \frac{0,9Z_{I-2}}{K_{T \max}} \right) \sin \varphi_{\text{расч}} = \\ &= 0,8 \left(Z_{Л1} \sin \varphi_{Л1} + \frac{0,9Z_{I-2}}{K_{T \max}} \sin \varphi_{Л2} \right) = 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{0,9X_{I-2}}{K_{T \max}} \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где X_{I-2} – уставка по реактивной оси защиты смежной линии; $K_{T \max}$ – максимально возможное значение коэффициента токораспределения.

Отстройка уставки по реактивной оси от к.з. за трансформатором приемной подстанции

По аналогии с выражением (16) имеем

$$X_{II-1} \leq 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{X_{T \min}}{K_{T \max}} \right), \quad (17)$$

где $X_{T \min}$ – минимально возможное сопротивление трансформатора с учетом РПН.

Выдержку времени второй ступени при согласовании ее с быстродействующими ступенями принимают ступени селективности. При наличии УРОВ $t_{II} = \Delta t + t_{\text{УРОВ}} = 0,4 + 0,2 = 0,6$ с.

Выбор уставки второй ступени по активной оси

Уставка по активной оси второй ступени выбирается аналогично R_I по выражению (14) при к.з. в конце защищаемого участка. Однако за время срабатывания второй ступени дуга за счет электродинамических сил и силы ветра увеличивает свою длину и L_d можно принять равной $2l_{\text{мф}}$.

Чувствительность второй ступени по реактивной оси проверяется с помощью коэффициента чувствительности по выражению (13):

$$K_{\text{ч II}} = \frac{X_{\text{II}}}{Z_{\text{к.з. расч}} \sin \varphi_{\text{к.з. расч}}} = \frac{X_{\text{II}}}{Z_{\text{Л1}} \sin \varphi_{\text{Л1}}} = \frac{X_{\text{II}}}{X_{\text{Л1}}}.$$

Если чувствительность не удовлетворяет требованиям ПУЭ, то согласование следует проводить со второй ступенью смежного участка. При этом время срабатывания принимается на ступень селективности больше времени той ступени, с которой защита согласована, а $L_{\text{д}} \approx 3l_{\text{мф}}$.

2.3.4. РАСЧЕТ УСТАВОК ВТОРЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

При наличии двухцепных линий (рис. 33) появятся новые условия выбора уставок вторых ступеней по реактивной оси.

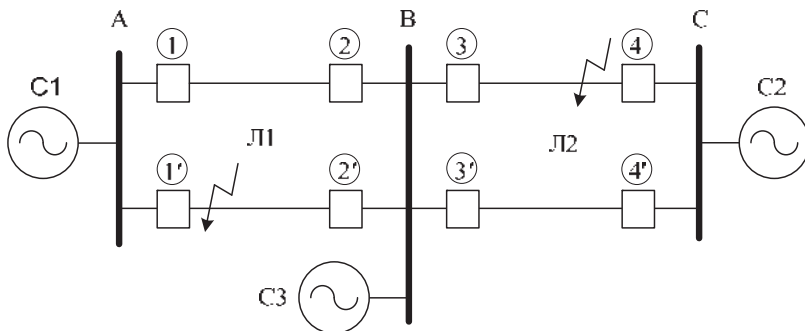


Рис. 33. Участок сети с двухцепными линиями

Согласование с первой ступенью защиты параллельных линий на противоположном конце

Это согласование проводится в каскадном режиме, после отключения выключателя первой ступени защиты 1' :

$$X_{\text{II-1}} \leq 0,8 \left(X_{\text{Л1}} + \frac{0,9 X_{\text{Л-2'}}}{K_{\text{T max}}} \right). \quad (18)$$

При наличии смежной двухцепной линии необходимо провести согласование с первыми ступенями защит 3 и 3'

Это согласование целесообразно обеспечить путем отстройки X_{II-1} от к.з. на шинах подстанции C в двухцепном режиме Л2 и одноцепном Л1, так как это обеспечит максимальное значение K_T .

$$X_{II-1} \leq 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{0,5 X_{Л2}}{K_{T \max}} \right). \quad (19)$$

Условие (19) позволяет не только согласовать вторую ступень защиты 1 с первой ступенью защиты 3 (3'), но и исключить возможность срабатывания второй ступени защиты 1 при к.з. на шинах C . Это к.з. при отсутствии дифференциальной защиты шин (ДЗШ) на подстанции C или ее отказе должно устраняться вторыми ступенями защиты 3 и 3'.

Однако это условие может привести к значительному заглублению защиты. Если не обеспечивается требуемый K_q , то согласование с первыми ступенями защит 3(3') можно провести в режиме каскадного отключения, после отключения выключателя 4 его первой ступенью защиты, предварительно доказав, что K_q в точке равной чувствительности первых ступеней защит 3 и 4 не ниже 1,5 (при наличии на приемном конце ДЗ это достигается автоматически). Тогда

$$X_{II-1} \leq \frac{0,8}{K_B} \left(X_{Л1} + \frac{0,9 X_{I-3}}{K_{T \max}} \right). \quad (20)$$

В выражение (20) вводится коэффициент возврата реле сопротивления K_B , так как при невыполнении условия (19) вторая ступень защиты 1 запустится до отключения выключателя 4. Одновременно отказ от условия (19) потребует обязательной установки ДЗШ на подстанции C .

Если вторая ступень защиты 1 по времени согласована со вторыми ступенями (по другим условиям выбора уставки), то необходимо ее согласовать со вторыми ступенями защит 3(3'):

$$X_{II-1} \leq 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{0,9 X_{II-3}}{2 K_{T \max}} \right), \quad (21)$$

где $K'_T = I_{\text{защ } 1} / I_{\text{защ } 3} = 2$ – коэффициент токораспределения, который учитывает, что при протекании тока к.з. через защиты 3(3') в защите 1 ток удваивается.

2.3.5. СОГЛАСОВАНИЕ УСТАВКИ ВТОРОЙ СТУПЕНИ С ЗАЩИТАМИ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ ЗАМКНУТОГО КОЛЬЦА

Согласование можно провести по выражению (19), приняв вместо $[0,5X_{\text{Л2}}]$ эквивалентное сопротивление кольца X''' при к.з. на шинах $C(D)$. Так, при к.з. на подстанции C : $X''' = X' // X''$ (рис. 34).

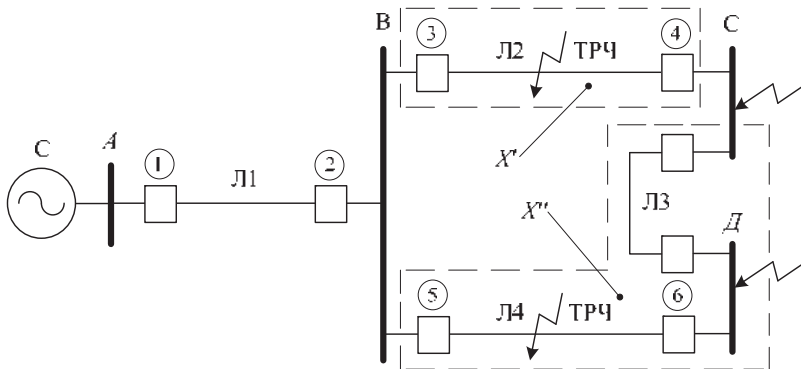


Рис. 34. Согласование второй ступени с защитами кольца

Однако если обеспечить коэффициент чувствительности первых ступеней защит 3 и 4 (5 и 6) в точке равной чувствительности не ниже чем 1,5, то согласование второй ступени защиты 1 с первыми ступенями защит 3 и 5 можно провести в каскадном режиме по выражению (20).

2.3.6. СОГЛАСОВАНИЕ ВТОРОЙ СТУПЕНИ С ЗАЩИТОЙ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ПРИЕМНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Рекомендуется, как и применительно к трансформаторам, уставку второй ступени комплекта 1 отстроить от к.з. на сторонах смежных напряжений по выражению (17) в точках К1 и К2 (рис. 35) но поскольку на подстанциях обычно не менее двух автотрансформаторов и в нормальном режиме они работают параллельно на сторонах среднего и высшего напряжения, расчетное выражение при к.з. в точке К1 имеет вид

$$X_{II-1} \leq 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{X_{АТ\ B-C}}{2K_{T\ max}} \right). \quad (22)$$

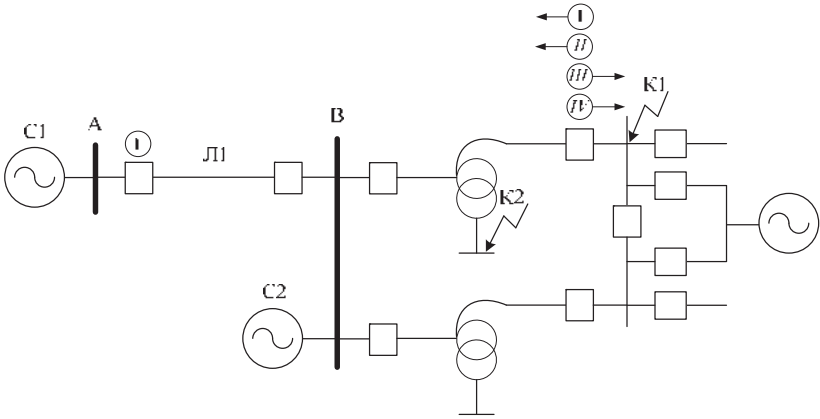


Рис. 35. Схема сети с автотрансформатором

Из-за малой величины сопротивления мощных автотрансформаторов условие (22) обычно дает расчетное значение, которое не удовлетворяет требованию чувствительности. Отказаться от этого условия – значит «запустить» защиту в сеть смежного напряжения. Тогда ее придется согласовывать с защитой этой сети.

Для облегчения этой задачи на сторонах среднего и высшего напряжения АТ предусматриваются ступенчатые дистанционные защиты. Первая и вторая ступени этих защит направлены в сторону автотрансформатора, третья и четвертая – в сторону сети. В данном случае нас интересует третья ступень ДЗ на стороне высшего напряжения. Ее сопротивление срабатывания $X_{III\ AT\ B}$ согласовано с первыми ступенями всех отходящих линий и имеет выдержку времени, равную ступени селективности. С этой защитой и необходимо согласовывать сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1, пересчитав его к стороне среднего напряжения:

$$X_{II-1} \leq 0,8 \left(X_{Л1} + \frac{X_{АТ\ B-C} / 2 + 0,9 X_{III\ AT\ B} / K'_T}{K_{T\ max}} \right), \quad (23)$$

где $K'_T = 2$ (см. разд. 2.3.4).

В этом случае выдержка времени второй ступени защиты 1 должна быть на ступень селективности больше выдержек времени третьей ступени АТ, т. е. $2\Delta t$.

После окончательного выбора уставок второй ступени по реактивному и активному сопротивлениям производится пересчет уставок через коэффициенты трансформации по выражениям (15) и приведение их в соответствие с табл. 2.

2.3.7. РАСЧЕТ УСТАВОК ТРЕТЬЕЙ СТУПЕНИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Третья ступень предназначена для отключения к.з. в зонах ближнего и дальнего резервирования. Уставку по реактивной оси X_{III-1} выбирают из условия отключения к.з. в любой точке, находящейся в зоне дальнего резервирования защиты по выражению (12), приняв $K_q = 1,25$.

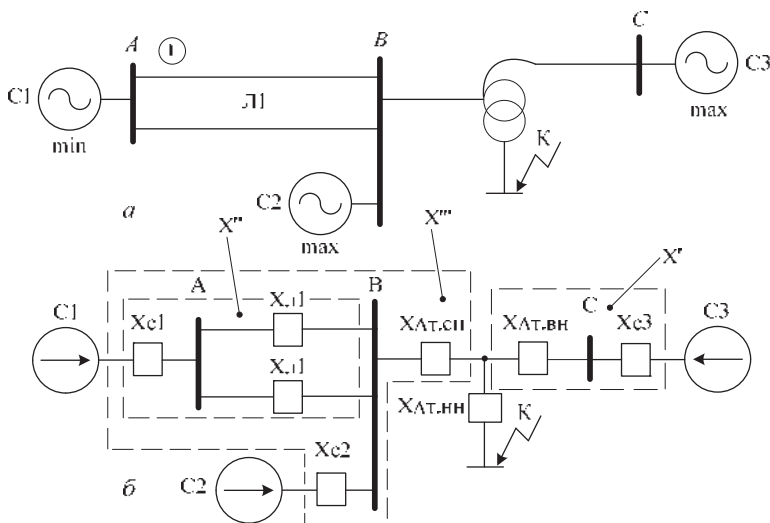


Рис. 36. Схема участка сети (а); ее схема замещения (б)

Режим работы сети выбирается такой, чтобы измеряемое сопротивление в расчетном режиме оказалось максимальным. Так, для участка сети на рис. 36 точка к.з. на стороне низшего напряжения автотрансформатора входит в зону дальнего резервирования защиты 1. Наибольшим замер при к.з. в точке К будет:

- при работе С2 и С3 в максимальном режиме;
- работе С1 в минимальном режиме;
- наличии параллельно работающей линии Л1.

Исходя из требуемого коэффициента чувствительности третьей ступени защиты 1 к к.з. в данной точке уставку по реактивной оси находим по выражению

$$X_{III-1} \geq 1,25 \left(X_{Л1} + \frac{X_{АТ СН} + X_{АТ НН} / K_{T1}}{K_{T2} \cdot K_{T3}} \right), \quad (23)$$

где $K_{T1} = X' / (X' + X''')$; $K_{T2} = X_{C2} / (X_{C2} + X'')$; $K_{T3} = 0,5$ – за счет параллельной линии.

$$X' = X_{АТ ВН} + X_{C3}; \quad X'' = X_{C1} + X_{Л1} / 2; \quad X''' = \frac{X'' \cdot X_{C2}}{X'' + X_{C2}} + X_{АТ СН}.$$

Из всех найденных значений X_{III-1} за расчетное принимается максимальное.

Уставка по активной оси R_{III-1} выбирается по условию (14), где $I_{\text{защ min}}^{(2)}$ – ток, протекающий через защиту при расчетном к.з. при определении X_{III-1} . Длину дуги можно принять с учетом ее наибольшего удлинения $L_d = (5 - 6)l_{\text{мф}}$, где $l_{\text{мф}}$ – расстояние между фазами в расчетной точке к.з. Найденные уставки пересчитываются ко вторичным цепям и сопоставляются с табл. 2. Если вторичное сопротивление срабатывания превысило 100 Ом, то уставка $X_{y III}$ принимается 100 Ом. Но в этом случае необходимо найти такой режим каскадного действия, когда данная защита способна обеспечить отключение к.з. с $K_q \geq 1,25$ (например, после отключения АТ со стороны высшего напряжения).

2.3.8. ОТСТРОЙКА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ

Выбранная уставка третьей ступени по активной оси R_y может не обеспечить отстройку защиты от сопротивления замеряемого реле в рабочем режиме с учетом самозапуска (рис. 37).

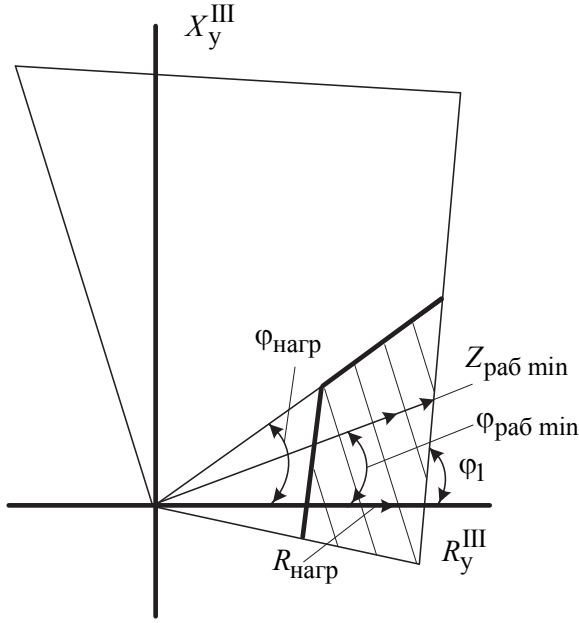


Рис. 37. Отстройка дистанционной защиты от рабочего режима

$$Z_{\text{раб min}} = \frac{U_{\text{раб min}}^2}{S_{\text{раб max}} K_{\text{сзп}}}, \quad \varphi_p = \varphi_{\text{сзп}} = \varphi_{\text{раб min}}. \quad (25)$$

Для обеспечения отстройки уставка должна быть выбрана по условию

$$R'_y \leq 0,8 Z_{\text{раб min}} \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_{\text{сзп}})}{\sin \varphi_1}. \quad (26)$$

Если уставка выбрана по условию (14), а $R_y > R'_y$ по выражению (26), то вводится блок-программа отстройки от режима нагрузки с параметрами:

$$R_{\text{нагр}} = R'_y; \quad \varphi_{\text{нагр}} = \varphi_{\text{сзп}} + 7^\circ.$$

На рис. 37 это показано вырезанием части характеристики срабатывания (заштрихованная область). Это коснется всех ступеней защиты, характеристики которых накроем заштрихованная область.

2.4. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для реле сопротивления, имеющего на входе две электрические величины, возникает проблема со способом его подключения к цепям тока и напряжения. Критерием при выборе схемы подключения являются обеспечение независимости измеряемого сопротивления Z_p от вида к.з. и пропорциональность его расстоянию от места к.з. до места подключения защиты.

2.4.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, РЕАГИРУЮЩЕГО НА МЕЖДУФАЗНЫЕ К.З.

Для данных видов повреждений целесообразна схема включения реле на разность напряжений двух фаз (линейное напряжение) и разность токов этих же фаз (табл. 3).

Таблица 3

Схема включения реле сопротивления

№ реле	I_p	U_p
1	$\dot{I}_A - \dot{I}_B$	\dot{U}_{AB}
2	$\dot{I}_B - \dot{I}_C$	\dot{U}_{BC}
3	$\dot{I}_C - \dot{I}_A$	\dot{U}_{CA}

На рис. 38 показаны диаграммы токов и напряжений в реле при трехфазном и двухфазном к.з. на расстоянии $l_{к.з.}$ от места установки защиты. При трехфазном к.з. напряжение на всех фазах в месте установки защиты равно

$$U_{защ} = \sqrt{3} \cdot I_{к.з.}^{(3)} Z_{к.з. I},$$

где $Z_{к.з. I}$ – сопротивление прямой последовательности участка линии до точки к.з.

Ток в защите, равный разности токов двух фаз: $I_{защ} = \sqrt{3} \cdot I_{к.з.}^{(3)}$.

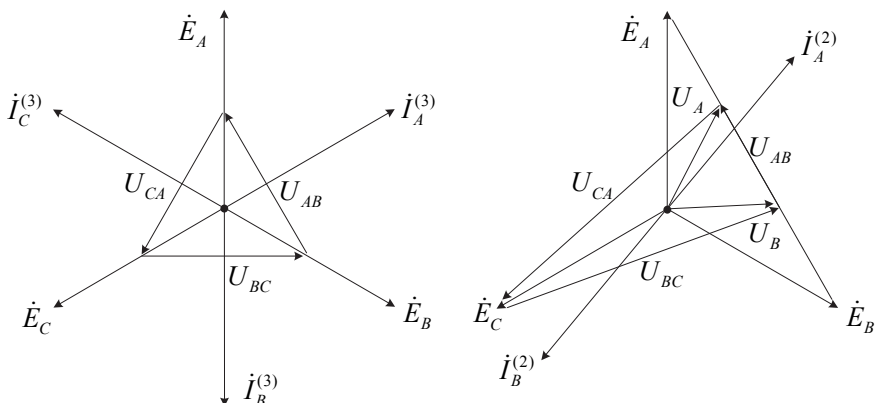


Рис. 38. Векторные диаграммы токов и напряжений:

a – трехфазное к.з.; *б* – двухфазное к.з. *AB*

Тогда измеряемое защитой сопротивление

$$Z_{\text{защ}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.з.}}^{(3)}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.з.}}^{(3)}} Z_{\text{к.з. I}} = l_{\text{к.з.}} Z_{\text{уд I}}. \quad (27)$$

При двухфазном к.з. *AB* напряжение между поврежденными фазами в месте установки защиты равно $U_{\text{защ AB}} = 2I_{\text{к.з.}}^{(2)} Z_{\text{к.з. I}}$. Разность токов этих фаз равна

$$I_A - I_B = I_{\text{защ}} = 2I_{\text{к.з.}}^{(2)},$$

тогда

$$Z_{\text{защ AB}}^{(2)} = \frac{2I_{\text{к.з.}}^{(2)}}{2I_{\text{к.з.}}^{(2)}} Z_{\text{к.з. I}} = l_{\text{к.з.}} Z_{\text{уд I}}. \quad (28)$$

Таким образом, при трехфазных и двухфазных к.з. измеряемое защитой сопротивление равно сопротивлению прямой последовательности линии от места установки защиты до точки к.з.

Однако следует заметить, что при двухфазном к.з. подобным образом ведет себя реле, включенное на токи и напряжения поврежденных фаз. На двух других реле напряжение значительно больше, а ток –

меньше. Значит, чувствительность защит этих фаз будет намного ниже. Следовательно, необходимо три реле.

Пользуясь методом симметричных составляющих, можно проанализировать поведение защиты при данной схеме включения при двухфазных к.з. на землю. Рассмотрим замыкание фаз A и B на землю в точке, сопротивление прямой последовательности до которой равно $Z_{к.з. I}$, нулевой – $Z_{к.з. 0}$. Тогда

$$\begin{aligned} Z_{\text{защ } AB}^{(1,1)} &= \frac{\dot{U}_{\Phi A}^{(1,1)} - \dot{U}_{\Phi B}^{(1,1)}}{\dot{I}_A^{(1,1)} - \dot{I}_B^{(1,1)}} = \\ &= \frac{\dot{I}_{AI}^{(1,1)} \cdot Z_{к.з. I} + \dot{I}_{AII}^{(1,1)} \cdot Z_{к.з. I} + \dot{I}_0^{(1,1)} Z_{к.з. 0} -}{\dot{I}_A^{(1,1)} - \dot{I}_B^{(1,1)}} \\ &\quad \frac{\dot{I}_{BI}^{(1,1)} Z_{к.з. I} - \dot{I}_{BII}^{(1,1)} Z_{к.з. I} - \dot{I}_0^{(1,1)} \cdot Z_{к.з. 0}}{.} \end{aligned}$$

Добавив в числитель дважды слагаемое $\left[\dot{I}_0^{(1,1)} Z_{к.з. I} \right]$ с «+» и с «-», получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{защ } AB}^{(1,1)} &= \\ &= \frac{\left(\dot{I}_{AI}^{(1,1)} + \dot{I}_{AII}^{(1,1)} + \dot{I}_0^{(1,1)} \right) Z_{к.з. I} - \left(\dot{I}_{BI}^{(1,1)} + \dot{I}_{BII}^{(1,1)} + \dot{I}_0^{(1,1)} \right) Z_{к.з. I}}{\dot{I}_A^{(1,1)} - \dot{I}_B^{(1,1)}} = Z_{к.з. I} = \\ &= l_{к.з.} \cdot Z_{уд I}. \end{aligned} \tag{29}$$

Таким образом, и при двухфазном к.з. на землю защита, включенная на токи и напряжение поврежденных фаз, реагирует на сопротивление прямой последовательности линии до точки к.з.

2.4.2. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, РЕАГИРУЮЩЕГО НА ОДНОФАЗНОЕ К.З.

При однофазном к.з. в контур короткого замыкания входит только ЭДС одной фазы, значит, ранее рассмотренная схема в принципе непригодна для защиты, реагирующей на однофазное к.з.

В данном случае должны использоваться только фазные напряжения и токи. Рассмотрим защиту с включением реле на напряжение и токи одноименных фаз. Пусть к.з. произошло в фазе A , тогда защита измерит

$$Z_{\text{защ } A}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{\Phi A}^{(1)}}{\dot{I}_A^{(1)}} = \frac{\dot{U}_{AI}^{(1)} + \dot{U}_{AII}^{(1)} + \dot{U}_0^{(1)}}{\dot{I}_A^{(1)}} = \frac{\dot{I}_A^{(1)} Z_{\text{к.з. I}} + \dot{I}_{AII}^{(1)} Z_{\text{к.з. I}} + \dot{I}_0^{(1)} Z_{\text{к.з. 0}}}{\dot{I}_A^{(1)}}.$$

Добавив в числитель дважды слагаемое $\left[\dot{I}_0^{(1)} Z_{\text{к.з. I}} \right]$ с «+» и с «-», получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{защ } A}^{(1)} &= \frac{\left(\dot{I}_{AI}^{(1)} + \dot{I}_{AII}^{(1)} + \dot{I}_{A0}^{(1)} \right) Z_{\text{к.з. I}} + \dot{I}_0^{(1)} Z_{\text{к.з. 0}} - \dot{I}_0^{(1)} Z_{\text{к.з. I}}}{\dot{I}_A^{(1)}} = \\ &= Z_{\text{к.з. I}} \frac{\dot{I}_A^{(1)} + \dot{I}_0^{(1)} \frac{Z_{\text{к.з. 0}} - Z_{\text{к.з. I}}}{Z_{\text{к.з. I}}}}{\dot{I}_A^{(1)}}. \end{aligned} \quad (30)$$

Из выражения (30) видно, что данная схема включения реле не обеспечивает стабильную зону защиты при однофазных к.з. Эта зона зависит от соотношения сопротивлений линии прямой и нулевой последовательности и от доли тока нулевой последовательности в токе поврежденной фазы.

Для устранения этого недостатка еще в 1931 году была предложена схема включения реле сопротивления на ток и напряжение фазы с компенсацией током нулевой последовательности (рис. 39). По дополнительной обмотке ω_K протекает утроенный ток нулевой последовательности линии $3I_0$.

Сопротивление, замеренное защитой, включенной по схеме рис. 38, при однофазном к.з. в фазе A :

$$Z_{\text{заш } A}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{\Phi A}}{\dot{I}_A + K \cdot \dot{I}_0} = \frac{\dot{I}_A + \frac{Z_{\text{к.з. } 0} - Z_{\text{к.з. } I}}{Z_{\text{к.з. } I}} \dot{I}_0}{\dot{I}_A + K \cdot \dot{I}_0} Z_{\text{к.з. } I}, \quad (31)$$

где $K = \frac{\omega_K}{\omega_\Phi}$ – коэффициент компенсации. Приняв $K = \frac{Z_{\text{к.з. } 0} - Z_{\text{к.з. } I}}{3Z_{\text{к.з. } I}}$, получим

$$Z_{\text{заш } A}^{(1)} = Z_{\text{к.з. } I}. \quad (32)$$

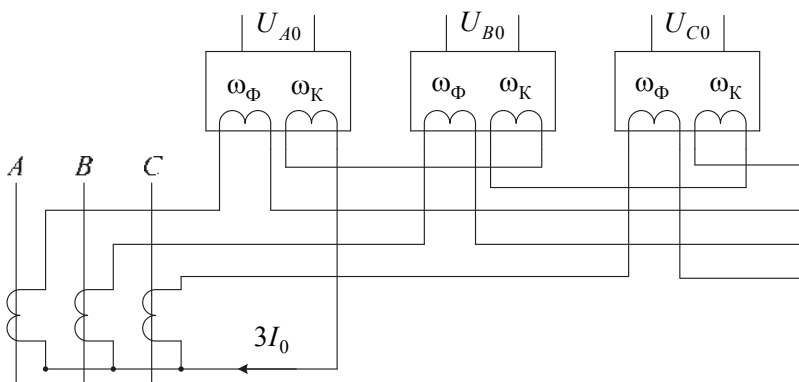


Рис. 39. Схема включения реле сопротивления с компенсацией током нулевой последовательности

Из выражения (32) следует, что при данной схеме включения измеряемое схемой сопротивление равно сопротивлению прямой последовательности линии от места установки защиты до точки к.з., как и при междуфазных к.з., когда реле включено на разность напряжений и токов двух одноименных фаз.

В отечественной практике такая схема не нашла широкого применения, поскольку дистанционные защиты используются для защиты от междуфазных к.з. Функция защиты от к.з. на землю возложена на ТНЗНП.

В последнее время с применением защит на базе микропроцессорных терминалов появились дистанционные защиты от к.з. на землю.

Так, в последней версии защиты линий фирмы «Экра» имеется пятая ступень дистанционной защиты, предназначенная для выполнения функции первой ступени защиты линий от к.з. на землю. Эта ступень включается по схеме рис. 39, что позволяет длину защищаемой зоны первой ступенью от однофазных к.з. иметь равную 0,85 от длины защищаемой линии, приняв уставку по оси X этой ступени, равную $0.85Z_{\text{ЛЛ}}$.

Однако этого можно достичь, если соотношение между сопротивлениями линии прямой и нулевой последовательности остается неизменным. К сожалению, это условие не выполняется на двухцепных линиях. За счет взаимоиндукции, как будет показано в разделе 3.6, индуктивное сопротивление линии нулевой последовательности меняется в зависимости от режима работы. Так, в двухцепном режиме работы сопротивление нулевой последовательности линии увеличивается до $X'_{0L} = X_{0L} + X_M$, где X_{0L} – сопротивление нулевой последовательности в одноцепном режиме, X_M – индуктивное сопротивление взаимоиндукции. Наоборот, в режиме отключенной и заземленной второй цепи индуктивное сопротивление нулевой последовательности умень-

шается до величины $X''_{0L} = X_{0L} - \frac{X_M^2}{X_{0L}}$. Значит, если уставку выбрать

исходя из одноцепного режима $X_V = 0,85X_{\text{ЛЛ}}$, то в двухцепном режиме работы зона защиты сократится, а в ремонтном режиме – увеличится, т. е. выйдет за пределы защищаемой линии. В [12] показано, что обеспечить постоянство зоны защиты можно, вводя в логику реле дополнительный корректирующий коэффициент, равный отношению тока нулевой последовательности параллельной линии I_{0p} к току ну-

левой последовательности защищаемой линии $\left(K_p = \frac{I_{0p}}{I_0} \right)$. Однако

там же доказано, что введение этого коэффициента может привести к неселективному срабатыванию защиты при к.з. на землю на параллельной линии. Кроме того, не всегда можно получить информацию о токе в параллельной линии (например, когда она отключена и заземлена). Поэтому в последней версии защиты ВЛ фирма «Экра» не предусмотрела возможность ввода в логику защиты информации о токе I_{0p} . Следовательно, коэффициент компенсации K , рассчитанный для из

одного из возможных режимов, должен корректироваться в других режимах. В [п13] (см. приложение) показано, что в большинстве случаев целесообразно менять коэффициент компенсации только в ремонтном режиме (отключение и заземление одной из цепей). Большое влияние на чувствительность данной защиты оказывают сопротивление контура заземления опоры и переходное сопротивление в месте падения провода на грунт.

Фирма «Экра» в настоящее время предлагает использовать пятую ступень в основном только для определения места замыкания на землю.

2.5. ТОК ТОЧНОЙ РАБОТЫ

Рассчитывая параметры срабатывания дистанционных защит, обычно не задумываются о величине тока, протекающего через реле в режиме срабатывания при к.з. Полагают, что срабатывание всегда происходит при одном и том же соотношении U_p и I_p , т. е. в момент срабатывания $Z_{cp} = U_p / I_p = \text{const}$. Однако реально сам реагирующий элемент, на базе которого строится схема реле, имеет ограниченную чувствительность. Это проявляется при малых подводимых к нему величинах. Сопротивление срабатывания реле начинает уменьшаться (рис. 40).

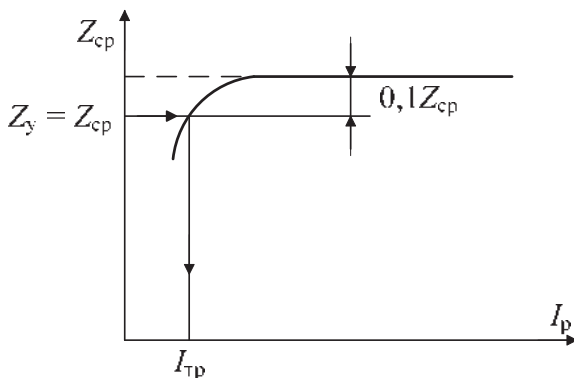


Рис. 40. Зависимость сопротивления срабатывания от тока в реле

Для контроля работы реле сопротивления при малых токах вводится понятие — ток точной работы ($I_{тр}$). $I_{тр}$ — это такой ток, при кото-

ром $Z_{\text{ср}}$ уменьшается по отношению к выставленной уставке на 10 % (рис. 40). Заводы-изготовители задают этот ток. ПУЭ требует расчета коэффициента чувствительности по току точной работы, который определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{ч тр}} = \frac{I_{\text{р min}}}{I_{\text{тр}}}. \quad (33)$$

где $I_{\text{р min}}$ – минимально возможное значение тока в реле при к.з. в конце зоны действия защиты; $I_{\text{тр}}$ – ток точной работы, задаваемый для данного реле заводом-изготовителем.

При к.з. в конце защищаемого участка значение $K_{\text{ч тр}}$ не должно быть ниже чем 1,3, а при к.з. в конце зоны дальнего резервирования (для резервных ступеней) не ниже 1,1.

2.6. ПОВЕДЕНИЕ ДЗ ПРИ КАЧАНИЯХ И АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

В нормальном режиме две параллельно работающие электроэнергетические системы (ЭЭС) имеют одинаковую частоту, а угол δ между их ЭДС определяется величиной передаваемой активной мощности по линии связи между ними:

$$P = \frac{E_1 E_2}{\sum X} \sin \delta.$$

Однако при появлении в результате аварии дефицита активной мощности в одной из них частота в этой системе может снизиться, что приведет к нарушению синхронной работы систем. В линии связи возникает асинхронный режим (АР). Векторы ЭДС по разные стороны линии начинают вращаться с разными скоростями, что приводит к периодическому изменению угла δ (рис. 41) с частотой скольжения $f_S = f_1 - f_2$. Период скольжения $T_S = 1 / f_S$ обычно находится в диапазоне 1...2 с. По линии начинает циркулировать уравнивающий ток I_y :

$$i_y = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{Z_{\Sigma}}, \quad (34)$$

где $Z_{\Sigma} = Z_{C1} + Z_{Л} + Z_{C2}$ – суммарное сопротивление контура; E_1 , E_2 – фазные ЭДС источников.

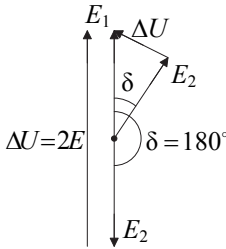


Рис. 41. Изменение угла δ в асинхронном режиме

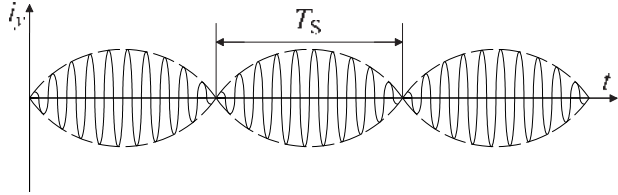


Рис. 42. Изменение мгновенных значений уравнительного тока в асинхронном режиме

Максимальное значение уравнительного тока имеет место при $\delta = 180^\circ$. Примем, что ЭДС систем равны $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = \dot{E}$. Тогда максимальная разность ЭДС будет равна $\Delta U = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 2\dot{E}$. Закон изменения мгновенных значений уравнительного тока (рис. 42):

$$i_y(t) = \frac{E_m (\sin \omega_1 t - \sin \omega_2 t)}{Z_{\Sigma}} = \frac{2E_m \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t}{Z_{\Sigma}}. \quad (35)$$

На рис. 43 показано распределение напряжений в сети в момент, когда ЭДС систем находятся в противофазе. Как видно из этого рисунка, в таком режиме имеется точка в сети, в которой напряжение равно нулю. Она называется центром (точкой) качания – «ц». ДЗ линий, в зоны действия которых попал центр качания в момент, когда $\delta = 180^\circ$, воспринимают его как точку к.з.

Так как защита 1 замеряет сопротивление от места установки защиты до центра качания – $Z_{ц1}$, то это позволяет первой ступени ДЗ подействовать на отключение защищаемой линии, если точка «ц» попала в ее зону действия.

Но проведенный анализ далеко не полный. По равенству нулю напряжения в точке «ц» можно судить о срабатывании только первой мгновенной ступени, поскольку это состояние весьма кратковременно.

Чтобы судить о возможности срабатывания второй ступени защиты, необходимо иметь информацию о времени существования такого режима, когда $Z_p < Z_{сз}^{\text{II}}$. Кроме того, остается неясным, как поведет себя ДЗ в так называемом режиме качания, когда в результате возмущения в системе угол δ не выходит за пределы $\delta_{\text{кр}}$, при котором нарушается динамическая устойчивость, а колеблется вокруг угла, соответствующего устойчивой работе системы.

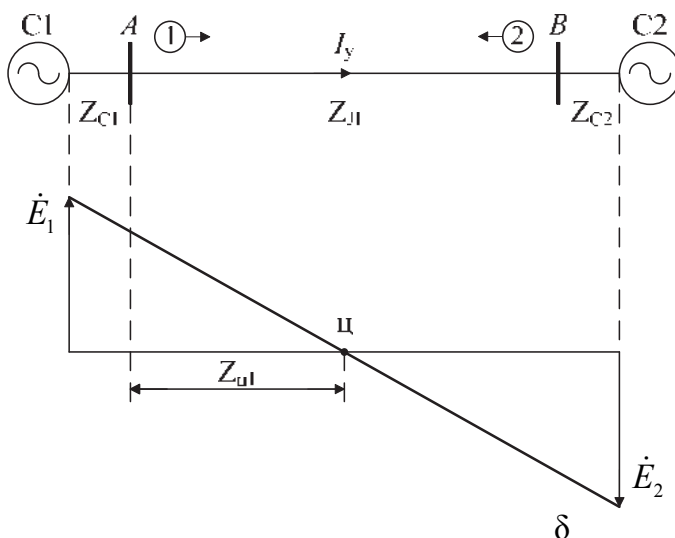


Рис. 43. Распределение напряжений при $\delta = 180^\circ$

Для решения этих задач найдем закономерность изменения измеряемого сопротивления Z_p в функции угла δ . Рассмотрим эту задачу применительно к комплекту защиты 1 на линии Л2 для участка сети, показанного на рис. 44.

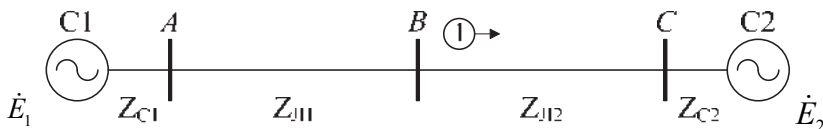


Рис. 44. Участок электрической сети, связывающий две ЭЭС

Напряжение в месте установки защиты 1 определим по второму закону Кирхгофа, приняв за точку отсчета ЭДС E_1 :

$$\dot{U}_p = \dot{E}_1 - \dot{I}_y (Z_{C1} + Z_{Л1}). \quad (36)$$

Приняв, что $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = \dot{E}$, получим уравнильный ток через защиту

$$\dot{I}_p = \dot{I}_y = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{Z_\Sigma} = \frac{E(1 - e^{-j\delta})}{Z_\Sigma}. \quad (37)$$

Разделив обе части уравнения (36) на выражение (37) и проводя некоторые алгебраические и тригонометрические преобразования, получим выражение, описывающее закон изменения Z_p в функции от угла δ :

$$Z_p = \underbrace{(0,5\dot{Z}_\Sigma - \dot{Z}_{C1} - \dot{Z}_{Л1})}_1 - \underbrace{j0,5\dot{Z}_\Sigma \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2}}_2. \quad (38)$$

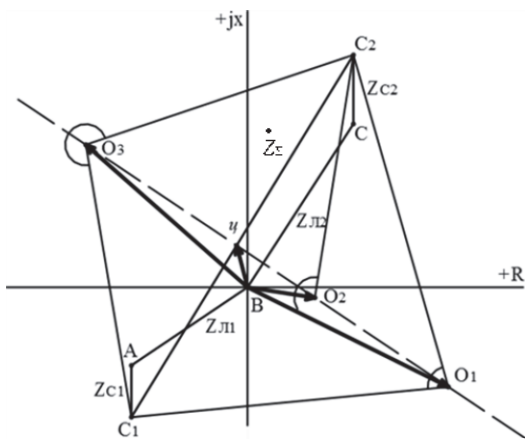


Рис. 45. Изменение вектора Z_p в асинхронном режиме

Выражение (38) состоит из двух слагаемых: первое слагаемое – независимое от угла δ , представляет собой сопротивление от места

установки защиты (шины подстанции B) до центра качания (середины вектора \dot{Z}_Σ); второе слагаемое меняется с изменением угла δ по функции $\operatorname{ctg} \frac{\delta}{2}$ и повернуто относительно \dot{Z}_Σ на угол 90° . Геометрическое представление функции $Z_p(\delta)$ показано на рис. 45.

Здесь место установки защиты (подстанция B) находится в начале координат плоскости комплексных чисел. Там же определяется начало вектора замеренного сопротивления Z_p . Конец этого вектора (точка O) при изменении угла δ скользит по прямой, перпендикулярной вектору \dot{Z}_Σ , и пересекает его в середине, т. е. в точке «ц» (на рисунке это пунктирная линия). Угол δ образуется у точки O лучами, соединяющими эту точку с точками C_1 и C_2 . При изменении угла δ от 0 до 360° угол $\frac{\delta}{2}$ изменяется от 0 до 180° , $\operatorname{ctg} \frac{\delta}{2}$ — от $+\infty$ до $-\infty$, т. е. за каждый период скольжения точка O проходит по этой прямой от $+\infty$ до $-\infty$.

2.6.1. ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

На рис. 46 на комплексную плоскость, где демонстрируется характер изменения вектора Z_p , замеряемого защитой 2 (см. рис. 43) в режиме асинхронного хода (АХ), помещены характеристики срабатывания первой и второй ступени этой защиты. Углы δ , при которых вектор Z_p входит в область срабатывания, находятся между лучами, соединяющими C_1 и C_2 с точкой пересечения годографа вектора с характеристиками срабатывания.

Вектор замеряемого сопротивления каждый период частоты скольжения пересекает характеристику срабатывания реле. Внутри характеристики первой ступени он находится между углами δ_{I-1} и δ_{I-2} . Этого достаточно для срабатывания быстродействующей ступени.

Внутри характеристики срабатывания второй ступени он находится между углами δ_{II-1} и δ_{II-2} . Время его нахождения там можно определить, зная угловую частоту скольжения:

$$t_2 = \frac{\delta_{II-2} - \delta_{II-1}}{\omega_S}. \quad (39)$$

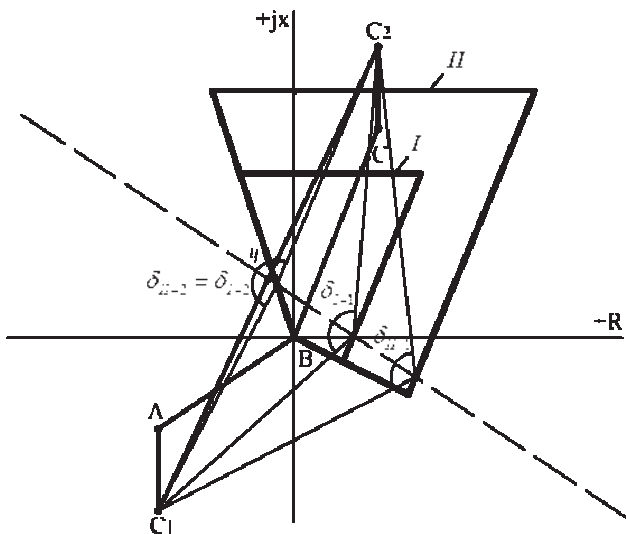


Рис. 46. Поведение реле первой и второй ступени в асинхронном режиме

Чтобы выяснить поведение второй ступени, необходимо сравнить время, найденное по выражению (39), со временем срабатывания второй ступени t_{II} . Вторая ступень срабатывает, если $t_2 \geq t_{II}$. Аналогичный анализ можно провести и для третьей ступени. Однако если учесть, что третья ступень на линиях такого напряжения имеет время срабатывания более (1,5...2) с, срабатывание ее в асинхронном режиме маловероятно.

При синхронных качаниях первая ступень может сработать, если критический угол $\delta_{кр} \geq \delta_{I-1}$. (Напоминание: $\delta_{кр}$ – это такой угол, при достижении которого еще не нарушается динамическая устойчивость, т. е. качание не переходит в асинхронный режим, а угол δ , достигнув $\delta_{кр}$, снова уменьшается) Вторая ступень в этом режиме тоже может сработать, если $\delta_{кр} > \delta_{II-1}$, так как скорость изменения угла в области его максимальных значений может быть весьма мала.

2.6.2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БЛОКИРОВКИ ДЗ ПРИ КАЧАНИЯХ И АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

Предыдущий анализ показал, что какая-то из защит участка сети связи ЭЭС работает при асинхронном режиме и может сработать при качаниях, хотя защищаемая линия исправна. Поэтому в каждом комплекте ДЗ имеется специальный блок – блокировка от качаний (БК), который предотвращает излишнее срабатывание ДЗ в этих режимах.

Основные требования к БК:

1) не допустить излишнего срабатывания ДЗ в асинхронных режимах и качаниях;

2) не препятствовать срабатыванию ДЗ при возникновении к.з., в том числе и в асинхронном режиме. Асинхронный режим – это очень тяжелый режим, и не всегда оборудование может его выдержать, что может повлечь к.з.

Главной функцией БК является способность отличить к.з. от асинхронного режима и качания. Для этого необходимо использовать устойчивые признаки отличия. В настоящее время в релейной защите используют два характерных признака отличия.

1. Асинхронный режим и качания – это симметричные режимы. Большинство же к.з. несимметричные, даже симметричное к.з. часто начинается с несимметричного. Значит, к.з. можно выявить по появлению хотя бы кратковременной несимметрии (тока или напряжения обратной последовательности).

2. Скорости процесса при к.з. и асинхронном режиме различные. К.з. – это электромагнитный процесс, а асинхронный режим – электромеханический. Ток к.з. нарастает очень быстро (за миллисекунды), качания же развиваются на несколько порядков медленнее. Поэтому к.з. можно выявить по скорости изменения тока обратной последовательности $\left(\frac{di_2}{dt}\right)$ или при симметричном к.з. по скорости изменения

тока прямой последовательности $\left(\frac{di_1}{dt}\right)$.

В защитах предыдущих поколений использовался первый признак, в современных, прежде всего микропроцессорных, используется второй, как более надежный и чувствительный.

В наших отечественных защитах БК действует по следующему принципу: разрешает действие ДЗ (вводит ее в работу) при выявлении

нии признака к.з. При этом чувствительность реагирующего органа БК делают намного выше чувствительности измерительных органов самой ДЗ.

Однако существует целый ряд ситуаций, когда этот принцип может привести к ложному срабатыванию ДЗ.

Так, затянувшееся внешнее к.з. может привести к нарушению динамической устойчивости и появлению асинхронного режима на линии связи систем. Запущенная в режиме предшествующего ему к.з. БК не предотвратит неселективного отключения линии дистанционной защитой. Чтобы этого избежать, необходимо ограничить время, на которое БК запускает ДЗ. Оно должно быть согласовано со временем срабатывания ее последней резервной ступени.

Но это в свою очередь может привести к отказу защиты этой линии, если в АХ возникает к.з. Чтобы избежать последнего, в современных шкафах ДЗ выполняют две блокировки от качания: чувствительную, которая способна запускаться при внешних к.з., и грубую, которая срабатывает только при близких к.з. (в зоне действия первой и второй ступени ДЗ). В этой ситуации грубая блокировка еще не израсходует своего ресурса и повторно введет в действие ДЗ.

Другая причина, которая может привести к ложному действию ДЗ, – это несинхронное АПВ (НАПВ) на линии с двусторонним питанием. НАПВ не осуществляет контроля синхронизма систем при повторном включении линии связи. Так, если АПВ оказалось успешным, но векторы ЭДС систем к моменту их включения на параллельную работу разошлись на угол 180° , то это приведет к появлению скачка уравнительного тока (признак к.з.), а сам факт наличия $\delta = 180^\circ$ говорит о появлении АХ. Избежать неселективного отключения линии удастся поочередным включением выключателей по разные стороны ВЛ. Сначала включается выключатель с одной стороны, который устанавливает факт устранения к.з. Если это включение оказалось успешным и линия осталась под напряжением, то ДЗ этого комплекта выводится из работы на время полного завершения АПВ. На противоположном конце линии после осуществления контроля наличия напряжения на линии ДЗ выводится из работы на заданное время. Затем осуществляется включение выключателя. Защита этой линии на время включения возлагается на ТНЗНП.

3. ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ТНЗНП)

В сетях с эффективно заземленной нейтралью (110 кВ и выше) защита от к.з. на землю возлагается на токовую направленную защиту нулевой последовательности. Этому способствуют два основных фактора.

1. Принятый способ включения реле сопротивления на разность напряжений и разность токов фаз обеспечивает стабильность зон действия дистанционных защит при междофазных к.з., но не может обеспечить приемлемую их чувствительность к однофазным к.з.

2. Токовые защиты нулевой последовательности имеют ряд существенных преимуществ по отношению к защитам (как токовым, так и дистанционным), включенным на токи фаз.

Если первый фактор в настоящее время пытаются устранить включением первых ступеней дистанционных защит на токи и напряжения фаз с компенсацией токов нулевой последовательности, то второй фактор настолько весомый, что ТНЗНП применяют не только в сетях 110–220 кВ, где они часто совместно с ДЗ выполняют роль основных защит ВЛ, но и на более высоких напряжениях, вплоть до 750 кВ, где они выполняют роль резервных защит.

3.1. ПРЕИМУЩЕСТВА ТОКОВЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В СЕТЯХ С ЭФФЕКТИВНО ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПЕРЕД ЗАЩИТАМИ, РЕАГИРУЮЩИМИ НА ТОКИ ФАЗ

1. В сетях этого класса напряжений вторичные обмотки трансформаторов тока включаются по схеме полная звезда, обратный провод в которой является фильтром токов нулевой последовательности. Следовательно, для выполнения ТНЗНП не требуются дополнительные источники тока (рис. 47).

ТНЗНП выполняется в виде ступенчатой защиты, но в отличие от защиты, реагирующей на токи фаз, для каждой ступени требуется не три реагирующих органа, а всего один.

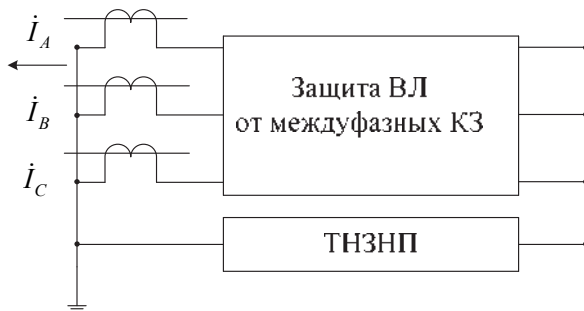


Рис. 47. Подключение ТНЗНП в обратный провод схемы полная звезда

2. Токовые отсечки нулевой последовательности имеют бо́льшую зону действия, чем токовые отсечки, реагирующие на токи фаз, так как сопротивление ВЛ нулевой последовательности (НП) в 2...5 раз превышает сопротивление прямой последовательности и зависимость тока $3I_0$ при удалении точки к.з. носит более крутой характер, чем зависимость $I^{(3)}$ (рис. 48).

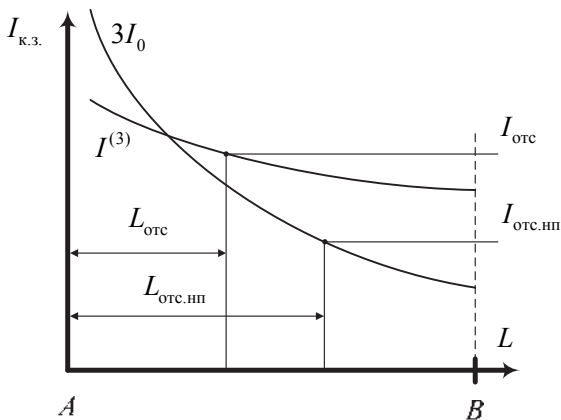


Рис. 48. Зависимость токов к.з.

3. Резервную ступень ТНЗНП не надо отстраивать от рабочих токов, в том числе и от токов самозапуска, так как они не содержат токов нулевой последовательности. Ее отстраивают только от токов небалан-

са, обусловленных погрешностями ТТ, которые в установившемся режиме не превышают 10 % от первичного тока. Следовательно, чувствительность резервных ступеней ТНЗНП намного выше, чем у защит, реагирующих на токи фаз.

4. Выдержки времени резервных защит нулевой последовательности обычно на несколько ступеней селективности Δt меньше, чем выдержки времени резервных защит от междуфазных к.з. Известно, что время срабатывания резервных защит увеличивается по мере перемещения по схеме от потребителя к источнику. Но токи нулевой последовательности появляются только в сети 110 кВ и выше. Значит, первым элементом, с которого начинает нарастать время срабатывания резервной защиты нулевой последовательности, является трансформатор, который осуществляет питание сети с изолированной нейтралью. Выдержка времени защиты от междуфазных к.з. у него уже включает в себя несколько ступеней селективности (рис. 49).

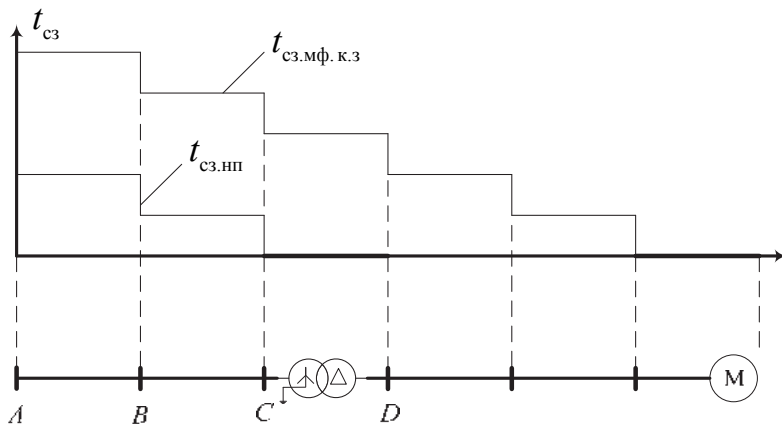


Рис. 49. Выдержки времени резервных защит

5. Существенным недостатком всех направленных защит, реагирующих на междуфазные к.з. (в том числе и дистанционных), является возникновение мертвой зоны по напряжению при близких к.з. ТНЗНП лишена этого недостатка, так как напряжение нулевой последовательности в месте к.з. имеет максимальную величину. Зона нечувствительности органов направления мощности находится в электрически удаленных от защиты участках сети, т. е. там же, где и зона нечувствительности токовых органов.

3.2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УСТАВОК ТНЗНП

По построению защита нулевой последовательности – это ступенчатая защита, такая же, как токовая или дистанционная от междуфазных к.з. Обычно в типовых панелях она четырехступенчатая. Здесь используются две токовые отсечки с выдержкой времени – с минимальной, равной ступени селективности, и с большей выдержкой, согласованной с выдержкой времени вторых ступеней смежных участков.

Идеология расчета уставок остается прежней. Разница лишь в том, что приходится иметь дело не с токами фаз, как при трех-двухфазных к.з., а с токами нулевой последовательности. Известно, что токи нулевой последовательности распределяются по сети при к.з. совсем не так, как токи трехфазного к.з. Если ток трехфазного (двухфазного) к.з. течет от источника к точке к.з., то источниками тока нулевой последовательности являются все заземленные в сети нейтрали. Поэтому по отношению к токам нулевой последовательности участок сети с одним источником питания может превратиться в сеть с многосторонним питанием (рис. 50).

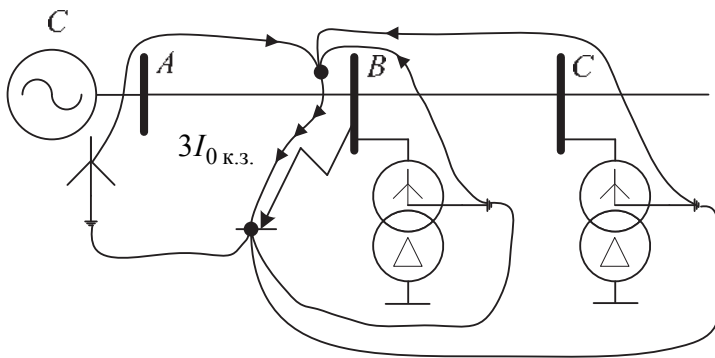


Рис. 50. Распределение токов нулевой последовательности при к.з. на землю

Это приводит к тому, что схемы замещения прямой и нулевой последовательности существенно различаются. Схемы замещения сети, показанной на рис. 50, применительно к к.з. на землю на шинах подстанции *В* изображены на рис. 51.

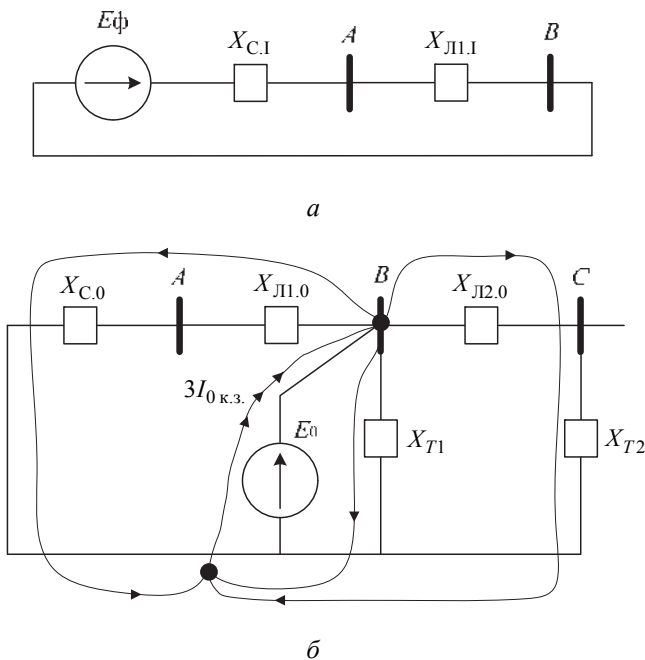


Рис. 51. Схемы замещения прямой (а), нулевой (б) последовательности для схемы сети рис. 50

Из сказанного следует, что сопротивление нулевой последовательности, а значит, и величина тока нулевой последовательности в интересующей нас цепи зависят не только от режима работы источников питания, как это имеет место при расчете токов междуфазных к.з., но и от количества и места заземленных нейтралей элементов сети.

Следует обратить внимание на то, что в схеме сети (рис. 50) токи $3I_0$ направляются к точке к.з., а в схеме замещения нулевой последовательности принято токи направлять от точки к.з. к заземленным нейтралям сети (рис. 51, б).

Третьим фактором, влияющим на величину расчетного тока нулевой последовательности, является вид к.з. на землю.

3.3. ВЛИЯНИЕ ВИДА К.З. НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Речь идет о сравнении величин токов нулевой последовательности при однофазном ($K^{(1)}$) и двухфазном к.з. на землю ($K^{(1,1)}$). Как известно, расчет этих токов ведется методом симметричных составляющих.

Для этого составляются комплексные схемы замещения прямой последовательности, в которые вводится дополнительное сопротивление ΔX , зависящее от вида к.з. На рис. 52 показаны комплексные схемы замещения прямой последовательности при расчете $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$.

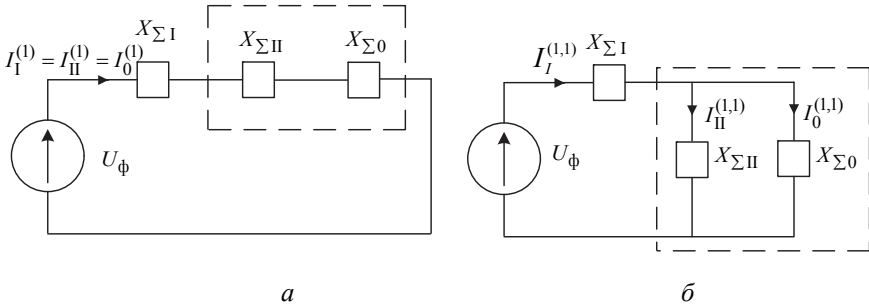


Рис. 52. Комплексные схемы замещения прямой последовательности для $K^{(1)}$ (а) и $K^{(1,1)}$ (б)

Приняв $X_{\Sigma I} = X_{\Sigma II}$ и воспользовавшись приведенными схемами, получаем выражения для определения токов нулевой последовательности в месте к.з.:

$$I_I^{(1)} = I_{II}^{(1)} = I_0^{(1)} = \frac{U_\phi}{2X_{\Sigma I} + X_{\Sigma 0}}.$$

$$3I_0^{(1)} = \frac{3U_\phi}{2X_{\Sigma I} + X_{\Sigma 0}}. \quad (40)$$

$$I_I^{(1,1)} = \frac{U_\phi}{X_{\Sigma I} + X_{\Sigma I}X_{\Sigma 0} / (X_{\Sigma I} + X_{\Sigma 0})}.$$

$$3I_0^{(1,1)} = \frac{3U_\Phi}{X_{\Sigma I} + X_{\Sigma 0} X_{\Sigma I} / (X_{\Sigma 0} + X_{\Sigma I})} \times \\ \times \frac{X_{\Sigma I}}{X_{\Sigma I} + X_{\Sigma 0}} = \frac{3U_\Phi}{X_{\Sigma I} + 2X_{\Sigma 0}}. \quad (41)$$

Сопоставив выражения (40) и (41), можно сделать вывод, что если $X_{\Sigma 0} > X_{\Sigma I}$, то $3I_0^{(1)} > 3I_0^{(1,1)}$. Таким образом, определив $X_{\Sigma I}$ и $X_{\Sigma 0}$ для выбранной точки к.з., можно узнать, какой вид к.з. является расчетным.

3.4. РАСЧЕТ ТОКА НЕБАЛАНСА ФИЛЬТРА ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Как отмечалось ранее, фильтром токов нулевой последовательности является обратный провод схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока полная звезда. Ток в этом проводе равен геометрической сумме вторичных токов трех фаз.

$$I_{\text{обр}} = \dot{I}_{\text{вт}A} + \dot{I}_{\text{вт}B} + \dot{I}_{\text{вт}C} = \underbrace{\frac{\dot{I}_A}{K_I} + \frac{\dot{I}_B}{K_I} + \frac{\dot{I}_C}{K_I}}_1 - \underbrace{\dot{I}_{\mu A} - \dot{I}_{\mu B} - \dot{I}_{\mu C}}_2.$$

При отсутствии в первичном токе нулевой последовательности (трехфазного и двухфазного к.з.) сумма первой группы слагаемых будет равна нулю. Значит, ток в этой цепи ($I_{\text{нб}}$) может появиться только за счет неравенства нулю второй группы слагаемых, т. е.

$$I_{\text{нб}} = \dot{I}_{\mu A} + \dot{I}_{\mu B} + \dot{I}_{\mu C}, \quad (42)$$

$I_{\text{нб}}$ – ток небаланса, обусловленный разными погрешностями трансформаторов тока в разных фазах.

При расчете уставок ТНЗНП появляется потребность находить максимально возможные значения $I_{\text{нб}}$ в различных симметричных режимах, таких как асинхронный режим, режим внешнего трехфазного к.з., режим самозапуска.

Методика его расчета изложена в руководящих указаниях (РУ) по релейной защите [8]. Ток небаланса определяется по выражению

$$I_{\text{нб}} = K_{\text{нб}} K_a I_{\text{расч}}, \quad (43)$$

где $I_{\text{расч}}$ – симметричный ток, протекающий через фильтр, при котором рассматривается $I_{\text{нб}}$; K_a – коэффициент, учитывающий увеличение тока небаланса в переходном режиме: $K_a = 2$ – при времени действия защиты до 0,1 с; $K_a = 1,5$ – при времени действия защиты до 0,3 с; $K_a = 1$ – при времени действия защиты 0,5...0,6 с; $K_{\text{нб}}$ – коэффициент небаланса, зависящий от кратности расчетного тока по отношению к номинальному току ТТ. $K_k = I_{\text{расч}} / I_{\text{ном ТТ}}$ – коэффициент кратности расчетного тока.

РУ рекомендуют применять: $K_{\text{нб}} = 0,05$ при $K_k \leq (2...3)$; $K_{\text{нб}} = 0,1$ при больших кратностях, но при условии, что K_k не превышает $(0,7...0,8) K_{\text{пред}}$, где $K_{\text{пред}}$ – предельная кратность, найденная по кривой предельной кратности (десятипроцентной погрешности) для используемого ТТ (рис. 53); $Z_{\text{нагр}}$ – расчетная нагрузка трансформатора тока.

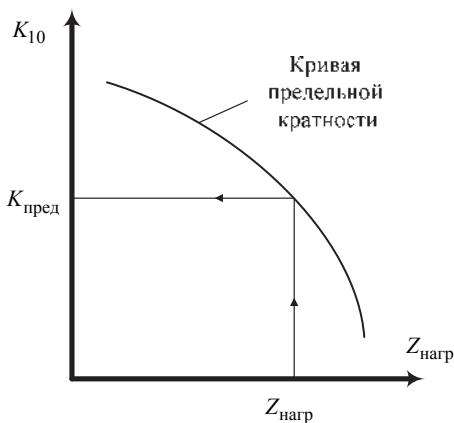


Рис. 53. Нахождение предельной кратности

Если кратность расчетного тока превышает предельную кратность, то руководящие указания по релейной защите приводят методику для расчета максимально возможного тока небаланса [8].

3.5. РАСЧЕТ ТОКОВ СРАБАТЫВАНИЯ СТУПЕНЕЙ ТНЗНП ДЛЯ ОДНОЦЕПНЫХ ВЛ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ [п2]

В большинстве случаев на линиях с двусторонним питанием ТНЗНП выполняется четырехступенчатой. Токи срабатывания каждой ступени рассчитываются по нескольким условиям. За расчетное значение принимается условие с бóльшим током срабатывания.

3.5.1. РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

Первая ступень – это токовая отсечка нулевой последовательности без выдержки времени, ток срабатывания которой выбирается по условиям:

- 1) отстройки от максимального тока через защиту $3I_{0 \text{ max защ}}$ при к.з. на землю на шинах противоположной подстанции (рис. 54);
- 2) отстройки от тока нулевой последовательности через защиту при неполнофазном режиме работы защищаемой линии – $3I_{0 \text{ нф max}}$.

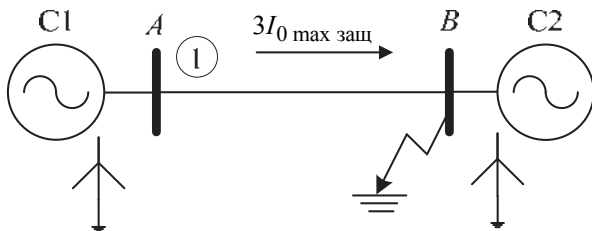


Рис. 54. Схема сети

Расчетным в обоих случаях является следующее выражение:

$$I_{I-1} \geq K_{\text{отс}} 3I_{0 \text{ max защ}}, \quad (44)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$ – коэффициент отстройки.

При выборе по первому условию следует рассмотреть максимальный режим работы системы 1 и минимальный – системы 2. То же

самое должно относиться к числу заземленных нейтралей. Расчетный вид к.з. сопровождается наибольшим током нулевой последовательности.

Неполнофазный режим работы системы может возникнуть по двум причинам.

1. При неодновременном включении фаз выключателя. Это может привести к срабатыванию защиты, если время ее срабатывания меньше времени разновременности включения фаз $t_{в \text{ фаз}}$. Анализ показывает, что это может быть только при наличии у выключателей пофазного привода.

2. В цикле однофазного АПВ (ОАПВ). При наличии ОАПВ длительности неполнофазного режима бывает достаточно, чтобы привести к срабатыванию не только первую, но и вторую и даже третью ступени ТНЗНП.

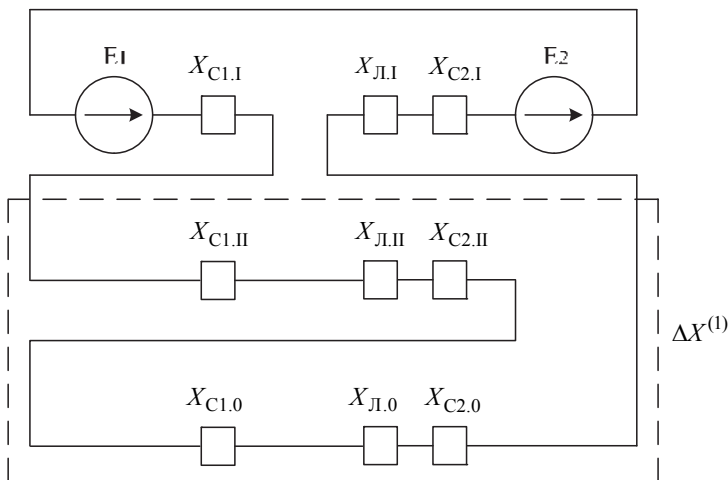


Рис. 55. Комплексная схема замещения прямой последовательности при расчете неполнофазного режима (работа одной фазы)

Утроенный ток нулевой последовательности в неполнофазном режиме $3I_{0 \text{ нф}}$ находится методом симметричных составляющих при наличии продольной несимметрии. В комплексную схему замещения прямой последовательности в место обрыва добавляется сопротивление ΔX , зависящее от количества оборванных фаз. На рис. 55 показана

схема для расчета $3I_{0\text{нф}}$ при работе одной фазы (обрыве двух фаз) – $\Delta X^{(1)} = X_{\Sigma\Pi} + X_{\Sigma 0}$. При работе двух фаз (обрыве одной фазы) – $\Delta X^{(1,1)} = X_{\Sigma\Pi} // X_{\Sigma 0}$.

Наибольшее значение ток нулевой последовательности будет иметь при угле δ между ЭДС систем 180° . Тогда применительно к схеме рис. 55

$$I_I = I_{\Pi} = I_0 = \frac{2E_\Phi}{X_{\Sigma I} + X_{\Sigma\Pi} + X_{\Sigma 0}}, \quad 3I_{0\text{нф}} = 3I_0. \quad (44)$$

3.5.2. ПРОВЕРКА ПОВЕДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ В РЕЖИМЕ ОПРОБОВАНИЯ СБОРНЫХ ШИН НА ПРОТИВОПОЛОЖНОМ КОНЦЕ ВЛ

При к.з. на шинах подстанции *В* (рис. 54) первая ступень защиты ВЛ на подстанции *А* не сработает (см. предыдущий раздел). При этом сработает дифференциальная защита шин на подстанции *В* и отключит все присоединения. Затем осуществляется АПВ шин. Если АПВ шин осуществляется выключателем ВЛ *АВ* со стороны подстанции *В*, то может оказаться, что при неуспешном АПВ ток $3I_0$ по линии превысит ток срабатывания первой ступени ВЛ на подстанции *А* и вызовет ее срабатывание. Однако при неуспешном АПВ шин вновь сработает ДЗШ и отключит выключатель, которым производилось опробование. Значит, последующее АПВ ВЛ на подстанции *А* будет успешным, т. е. никаких негативных последствий ложное срабатывание первой ступени ТНЗНП не вызовет и дополнительное заглубление этой ступени делать не требуется. Но возможность появления такой ситуации должна быть известна диспетчеру.

3.5.3. РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ВТОРОЙ СТУПЕНИ

Вторая ступень – это токовая отсечка нулевой последовательности с минимальной выдержкой времени, которая согласуется с быстродействующими ступенями защит смежных элементов.

Ток срабатывания выбирается по условиям:

- 1) отстройки от тока $3I_0$ при к.з. на землю в конце зоны действия первых ступеней ТНЗНП смежных участков;
- 2) отстройки от тока $3I_0$, протекающего через защиту при к.з. на землю за автотрансформатором, подключенным к шинам противоположной подстанции;

3) отстройки от тока $3I_0$, протекающего через защиту в неполнофазном режиме, возникающем в цикле ОАПВ на защищаемой или смежной линии.

Последнее условие может оказаться расчетным, если время неполнофазного режима в цикле ОАПВ превышает время срабатывания второй ступени. Расчет ведется по выражению (44) при $K_{отс} = 1,2$.

Выбор тока срабатывания по первому и второму условию рассмотрим на примере схемы на рис. 56.

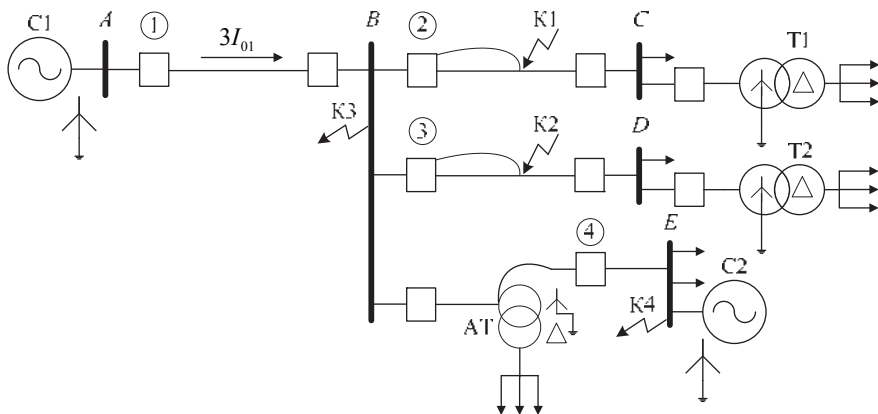


Рис. 56. Схема участка электрической сети

При к.з. в конце зоны действия первой ступени защиты 2 через нее течет ток $3I_{02} = I_{I-2}$. Тогда ток через защиту 1 найдется через коэффициент токораспределения $K_T = \frac{3I_{01}}{3I_{02}}$, а ток срабатывания второй ступени защиты 1 как

$$I_{II-1} = K_{отс} K_T I_{I-2}, \quad (46)$$

где $K_{отс} = 1,1$ – коэффициент отстройки.

Аналогично найдется ток срабатывания I_{II-1} по согласованию с первой ступенью защиты 3. Коэффициенты токораспределения находятся исходя из схемы замещения нулевой последовательности (рис. 57). Так, при согласовании с первой ступенью защиты 2

$$K_T = \frac{3I_{01}}{3I_{02}} = \frac{X''}{X' + X''},$$

где

$$X' = X_{C10} + X_{Л10};$$

$$X'' = (X_{Л30} + X_{T2}) // \left(X_{ATC} + \frac{(X_{ATB} + X_{C20})X_{ATH}}{X_{ATB} + X_{C20} + X_{ATH}} \right).$$

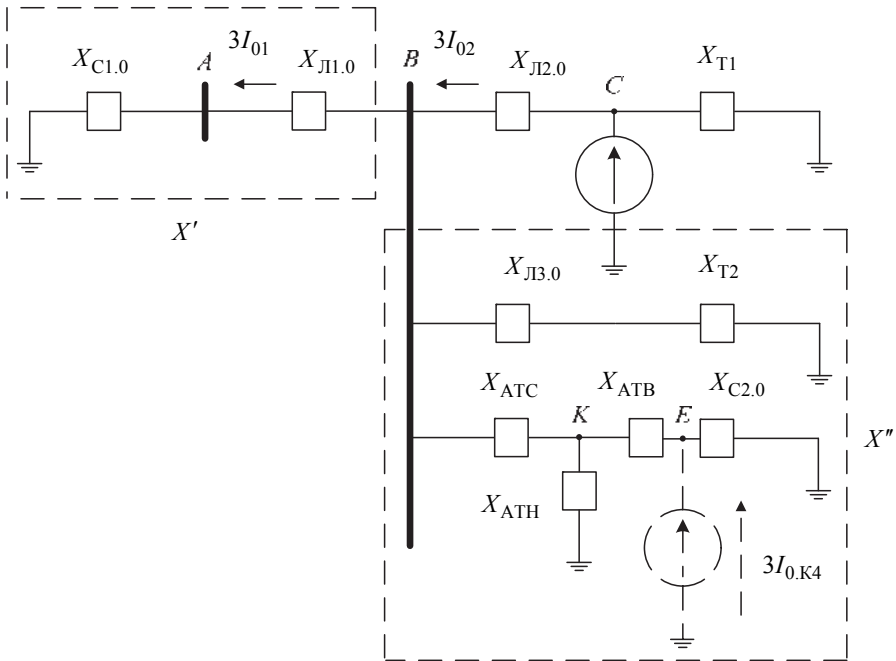


Рис. 57. Схема замещения нулевой последовательности участка сети для схемы рис. 56

При расчете коэффициентов токораспределения режим работы сети и режим заземления нейтралей выбираются такими, чтобы обеспечить их максимальные значения.

Второе условие обеспечивает отстройку второй степени от к.з. на землю на стороне высшего напряжения в точке К4. Для этого находят-

ся ток нулевой последовательности в данной точке к.з. и распределяется по схеме замещения нулевой последовательности до защищаемого комплекта $3I_{01}$. Условие выбора тока срабатывания:

$$I_{II-1} = K_{отс} K_T 3I_{0 \text{ К4}}, \quad (47)$$

где $K_{отс} = 1,2$ для сетей 110–220 кВ; коэффициент токораспределения

$$K_T = \frac{3I_{01}}{3I_{0 \text{ К4}}}.$$

При расчете ручным способом коэффициент токораспределения находится как произведение K_T для всех точек разветвления. Применительно к схеме рис. 57 – это точки Е, К, В: $K_T = K_{TE} K_{TK} K_{TV}$. В качестве расчетного режима работы сети принимается режим, обеспечивающий наибольшие значения K_T .

Коэффициент чувствительности второй ступени определяется при к.з. на шинах приемной подстанции (точка КЗ):

$$K_{ч \text{ II}} = \frac{3I_{01 \text{ к.з. В}}}{I_{II-1}}, \quad (48)$$

где $3I_{01 \text{ к.з. В}}$ – минимальное значение тока $3I_0$, протекающего через защиту при к.з. на шинах В. Нормированное значение $K_{ч}$ не менее 1,3. Однако если вторая ступень его не обеспечивает, то ее оставляют для согласования с ней защит смежных участков, а требуемой чувствительности добиваются у третьей ступени.

3.5.4. РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ТРЕТЬЕЙ СТУПЕНИ

Третья ступень – это токовая отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени $(2-3)\Delta t$, которая согласуется с отсечками, имеющими выдержку времени.

Ток срабатывания выбирается из следующих условий:

- 1) согласования со вторыми (третьими) ступенями защит смежных участков;
- 2) согласования с защитами автотрансформатора на приемном конце со стороны смежного напряжения;
- 3) отстройки от тока небаланса в асинхронном режиме;
- 4) отстройки от тока НП в неполнофазном режиме в цикле ОАПВ.

Первое условие реализуется по выражению (46) с заменой индексов. Если не обеспечивается чувствительность третьей ступени при согласовании ее со второй ступенью смежной ВЛ, то производится согласование с третьей ступенью.

Второе условие реализуется по выражению (46) путем согласования с токовыми отсечками НП АТ на стороне смежного напряжения, направленными в сторону этой сети. Применительно к шкафам ШЭ2607-071 фирмы «Экра» – это третья, четвертая и пятая ступени. Третья ступень согласована с быстродействующими отсечками НП ВЛ, четвертая – со вторыми или третьими ступенями ВЛ. Если не удастся обеспечить приемлемую чувствительность при согласовании с третьими ступенями, то проводится согласование с четвертыми.

Отстройку от тока небаланса в асинхронном режиме следует проводить в том случае, если выдержка времени $t_{III} < 1,5$ с, так как период асинхронного режима обычно не превышает $(1 \dots 1,5)$ с (рис. 58).

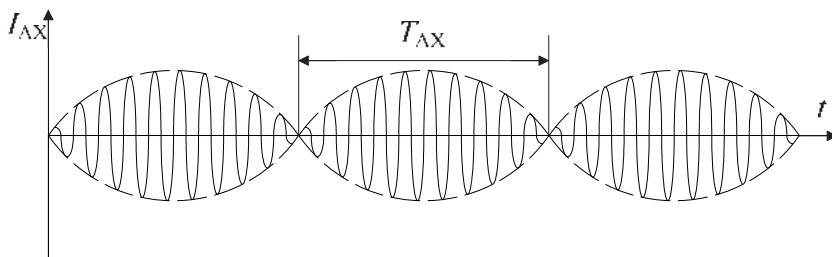


Рис. 58. Ток асинхронного режима

Ток срабатывания определяется по выражению

$$I_{III} = K_{отс} I_{нб}, \quad (49)$$

где $K_{отс} = 1,25$ – коэффициент отстройки.

Ток небаланса $I_{нб}$ определяется по выражению (43), принимая

$$I_{расч} = I_{АХ} = \frac{2E_{\phi}}{X_{CII} + X_{CIII} + X_{ЛП}}. \quad (50)$$

В ряде случаев, если условие (49) явилось расчетным при выборе уставки третьей ступени и это условие не удовлетворяет требованию чувствительности, бывает целесообразным увеличить выдержку вре-

мени третьей ступени до 1,5 с и от выбора уставки по выражению (49) отказаться.

Отстройка от тока $3I_0$ в неполнофазном режиме проводится по выражению (44), если время срабатывания третьей ступени не превышает времени неполнофазного режима в цикле ОАПВ.

Чувствительность третьей ступени оценивается при однофазном к.з. на шинах противоположной подстанции по выражению (48). Нормативное минимальное значение $K_{\text{ч}}$ – не менее 1,5. При наличии надежно действующей резервной ступени – 1,3.

3.5.5. РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ РЕЗЕРВНОЙ СТУПЕНИ

На линиях с двусторонним питанием это обычно четвертая ступень – максимальная токовая защита нулевой последовательности (МТЗНП). Хотя на линиях с односторонним питанием резервной может быть третья или даже вторая ступень.

Ток срабатывания резервной ступени выбирается из следующих условий.

1. Отстройки от тока небаланса в нулевом проводе при внешних междуфазных к.з. Как правило, это к.з. между тремя фазами за трансформаторами или автотрансформаторами на стороне низшего напряжения (в сети с изолированной нейтралью) как на подстанции, где установлена защита, так и на подстанции противоположного конца ВЛ. Расчетное выражение для определения тока небаланса – (43), тока срабатывания – (49).

2. Проверки по условию возврата защиты после отключения внешнего к.з. и протекания через защиту тока самозапуска:

$$I_{\text{IV}} = \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{в}}} I_{\text{нб сзп}}, \quad (51)$$

где $I_{\text{нб сзп}}$ – ток небаланса, найденный по выражению (43) при $I_{\text{расч}} = I_{\text{сзп}}$.

Руководящие указания по релейной защите рекомендуют принимать ток срабатывания резервных ступеней ТНЗНП не менее 60 А. Нормативное значение $K_{\text{ч}}$ для резервной ступени при однофазном к.з. на шинах противоположной подстанции около 1,5, а в конце зоны резервирования не менее 1,2.

Выдержки времени резервных ступеней согласуются между собой по ступенчатому принципу. В случаях когда выбранный ток срабатывания по условию отстройки от тока небаланса при к.з. за трансформатором не обеспечивает требуемой чувствительности, допустимо согласовывать время срабатывания защиты с защитами, действующими при междуфазных к.з. за трансформатором, и от $I_{нб}$ в этом режиме не отстраиваться.

3.6. РАСЧЕТ ТНЗНП ПРИ НАЛИЧИИ ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЙ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ

Известно, что в цепях переменного тока существует два фактора, препятствующих протеканию тока. Это активное сопротивление проводника $R = \rho \cdot l / S$, в котором энергия источника расходуется на нагрев, и ЭДС самоиндукции, которая наводится в проводнике переменным магнитным полем, создаваемым самим током:

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = jI\omega L = jIX_L.$$

Эту ЭДС в расчетах заменяют падением напряжения от тока в фиктивном (индуктивном) сопротивлении.

В нормальном режиме векторы токов фаз представляют симметричную звезду, что обеспечивает отсутствие результирующего магнитного поля. Иными словами, токи фаз мало влияют на сопротивление друг друга. Удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности воздушной линии $X_{ЛЛ} \approx 0,4$ Ом/км.

При появлении в фазах токов нулевой последовательности (совпадающих по фазе) создается результирующее магнитное поле, что ведет к увеличению ЭДС электромагнитной индукции, а значит, и индуктивного сопротивления $X_{Л0} \approx (2...5)X_{ЛЛ}$.

При близком расположении двух линий (например, на одной опоре) потоки, создаваемые токами нулевой последовательности каждой линии, могут создавать ЭДС взаимной индукции, а значит, влиять на индуктивное сопротивление друг друга. Рассмотрим схему замещения нулевой последовательности при наличии индуктивной связи двух ВЛ.

3.6.1. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДВУХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Рассмотрим две линии, каждая из которых обладает индуктивностью L_0 и взаимоиנדукцией M (рис. 59).

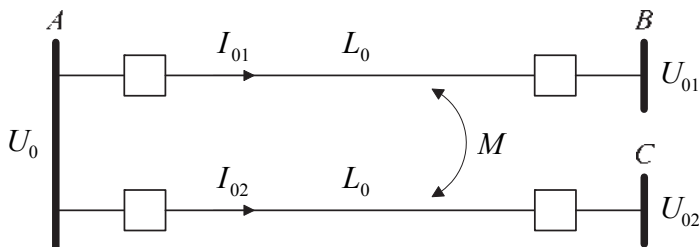


Рис. 59. Схема двухцепной ВЛ, обладающей взаимоиנדукцией

По каждой из линий течет ток нулевой последовательности I_{01} и I_{02} , $x_0 = \omega L_0$, $x_M = \omega M$.

Составим уравнения, связывающие напряжения подстанций A , B и C :

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= I_{01}X_0 + I_{02}X_M + U_{01} \\ U_0 &= I_{02}X_0 + I_{01}X_M + U_{02} \end{aligned} \right\} \pm I_{01}X_M, \pm I_{02}X_M.$$

Добавляем слагаемые и приводим подобные. Получаем уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= (I_{01} + I_{02})X_M + I_{01}(X_0 - X_M) + U_{01}, \\ U_0 &= (I_{01} + I_{02})X_M + I_{02}(X_0 - X_M) + U_{02}. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

Уравнениям (52) соответствует схема замещения, показанная на рис. 60.

Для случая, когда на обоих концах линии объединены и связаны две энергосистемы, схема нулевой последовательности приобретает вид, показанный на рис. 61.

Исходя из схемы рис. 61 сопротивления нулевой последовательности двухцепной ВЛ со взаимоиנדукцией определяется как

$$X'_{0Л} = X_M + \frac{X_{0Л} - X_M}{2} = \frac{X_{0Л} + X_M}{2}. \quad (53)$$

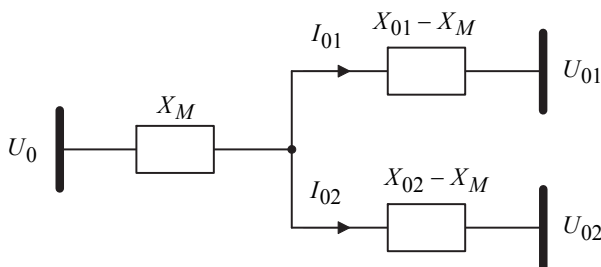


Рис. 60. Схема замещения нулевой последовательности линии со взаимной индукцией

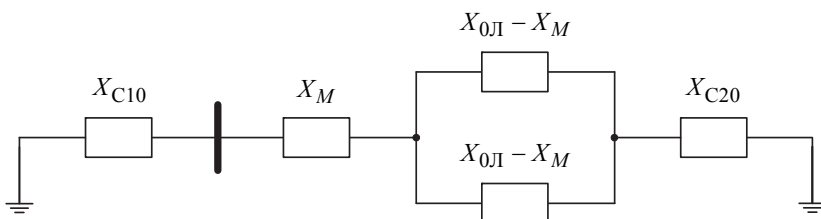


Рис. 61. Схема замещения двухцепной ВЛ со взаимной индукцией в сквозном режиме

Из выражения (53) следует, что взаимная индукция увеличивает сопротивление НП двухцепной линии. При ее отсутствии сопротивление двухцепной ВЛ в сквозном режиме равно $X''_{0Л} = X_{0Л} / 2$.

Рассмотрим схемы замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ при наличии к.з. на одной из линий (рис. 62). На рисунке

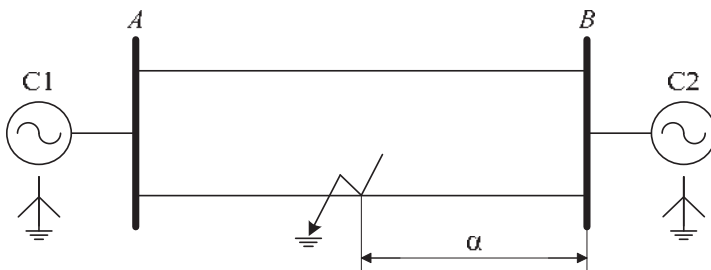


Рис. 62. к.з. на одной линии

α характеризует расстояние от подстанции B до точки к.з. в долях от общей длины линии. Схема замещения нулевой последовательности для этого режима показана на рис. 63.

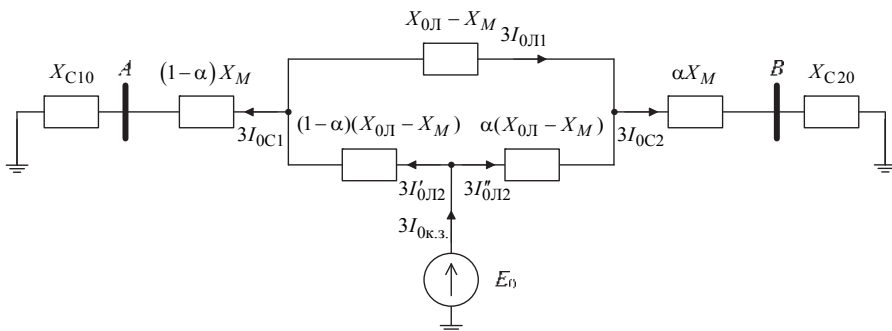


Рис. 63. Схема замещения нулевой последовательности для схемы рис. 62

Поскольку защита ступенчатая, возможен режим к.з., когда с одной из сторон выключатель уже отключен (каскадный режим) (рис. 64).

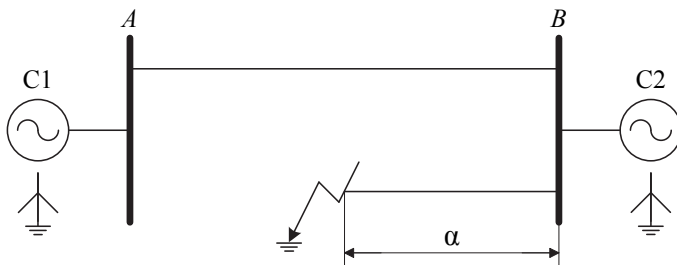


Рис. 64. к.з. в режиме каскадного отключения

Схема замещения нулевой последовательности для каскадного режима показана на рис. 65. Здесь α — расстояние от подстанции B до точки к.з. в долях от длины ВЛ.

Представляет также интерес ремонтный режим работы двухцепной ВЛ, когда одна из параллельных ВЛ отключена и заземлена с обеих сторон (рис. 66).

Найдем сопротивление линии нулевой последовательности при к.з. на землю в ремонтном режиме. Обозначив падение напряжения нулевой последовательности на участке AB через U_0 , составим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= I_{0I} X_{0Л} - I_3 X_M, \\ 0 &= I_3 X_{0Л} - I_{0I} X_M. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Из второго уравнения (54) находим I_3 :

$$I_3 = I_{0I} \frac{X_M}{X_{0Л}}.$$

Подставив в первое уравнение I_3 , получим

$$U_0 = I_{0I} \left(X_{0Л} - \frac{X_M^2}{X_{0Л}} \right). \quad (55)$$

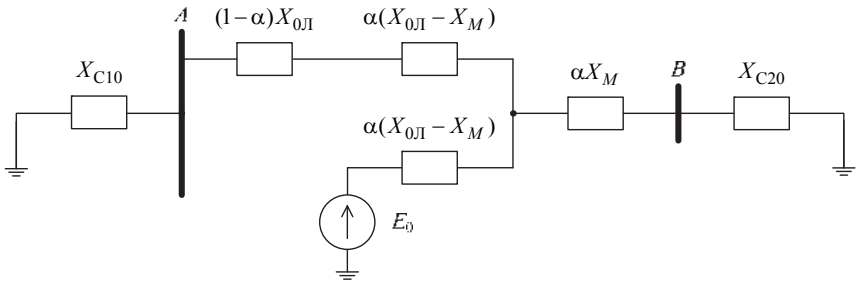


Рис. 65. Схема замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ с взаимоиндукцией в режиме каскадного отключения

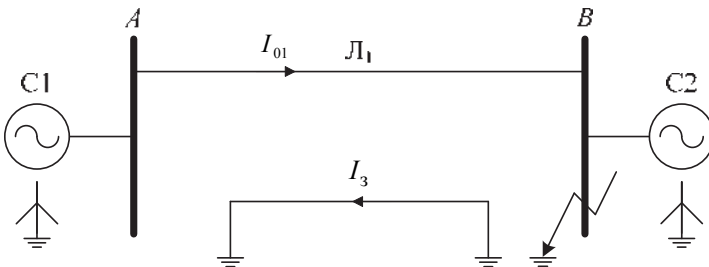


Рис. 66. Схема двухцепной ВЛ в ремонтном режиме

Поделив на ток, протекающий по ВЛ, найдем сопротивление нулевой последовательности линии в ремонтном режиме

$$X_{0Л}''' = \frac{U_0}{I_0} = X_{0Л} - \frac{X_M^2}{X_{0Л}}. \quad (56)$$

Анализ показывает, что в данном режиме сопротивление НП двухцепной ВЛ минимально.

Приняв

$$X_{0Л} = 3X_{ЛЛ} = 1,2 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, \quad X_M = 2X_{ЛЛ} = 0,8 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, \quad X_{ЛЛ} = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}},$$

получим: $X'_{0Л} = 3X_{ЛЛ} = 1,2 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ – одна линия отключена (не заземлена); $X''_{0Л} = \frac{X_{0Л} + X_M}{2} = 1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ – обе линии в работе; $X''_{0Л} = X_{0Л} - \frac{X_M^2}{X_{0Л}} = 1,2 - \frac{0,8^2}{1,2} = 0,67 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ – одна линия отключена и заземлена.

3.6.2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТНЗНП ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ

Особенности расчета двухцепных ВЛ определяются рассмотренными ранее схемами замещения нулевой последовательности со взаимной индукцией. Они в основном сводятся к следующему.

1. При необходимости определить наибольший ток нулевой последовательности, протекающий по линии, имеющей параллельную ветвь, следует рассматривать режим ее работы с отключенной и заземленной параллельной ветвью.

2. Ток нулевой последовательности в линии при каскадном отключении к.з. в параллельной цепи зависит не только от места к.з., но и от соотношения сопротивления НП сети и сопротивления взаимной индукции двухцепной ВЛ.

Так, из схемы замещения, показанной на рис. 67, видно, что при увеличении α (т. е. удалении точки к.з. от шин В) ток $3I_{02}$ уменьшается, а характер изменения тока $3I_{01}$ будет определяться еще и коэффициентом токораспределения $K_T = 3I_{01} / 3I_{02}$, т. е. $3I_{01} = 3I_{02} K_T$.

Его значение с учетом α будет определяться как

$$K_T = \frac{\alpha X_M + X_{C20}}{X_{C10} + X_{C20} + X_0}. \quad (57)$$

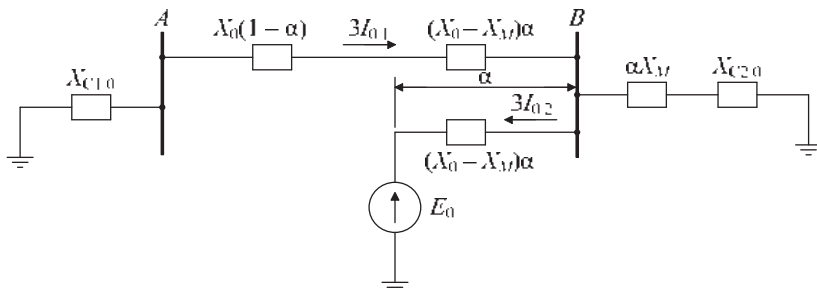


Рис. 67. Схема замещения нулевой последовательности при каскадном отключении к.з. на параллельной ВЛ

Из выражения (57) следует, что с увеличением α коэффициент токораспределения растет и может оказаться, что с увеличением α ток $3I_{01}$ будет возрастать.

3. Как следует из предыдущего пункта, коэффициент токораспределения – величина переменная. Это значит, что согласование ступеней защит часто приходится проводить графоаналитическим методом.

3.6.3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

При реализации основного условия отстройки от тока $3I_{0 \text{ защ max}}$ по выражению (44) при к.з. на шинах противоположной подстанции необходимо рассматривать режим, когда параллельная линия отключена и заземлена.

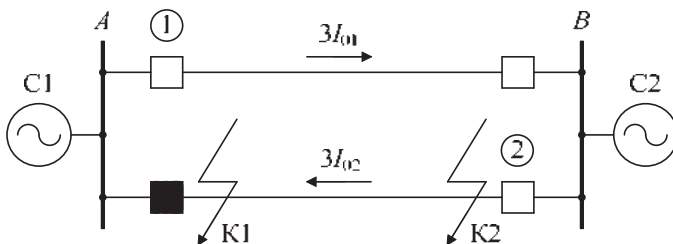


Рис. 68. к.з. на параллельной линии в каскадном режиме

Вторым условием является отстройка от тока $3I_{0 \text{ защ max}}$ при к.з. на параллельной линии вблизи шин, где установлена защита ($\alpha = 1$)

в режиме каскадного отключения (рис. 68). Как следует из предыдущего раздела, это условие может оказаться расчетным.

Надо также заметить, что на величину тока $3I_{0 \text{ защ max}}$ может влиять режим работы других двухцепных ВЛ со стороны подстанции A . Они должны быть в ремонтном режиме, т. е. одна из параллельных ВЛ отключена и заземлена.

3.6.4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ВТОРОЙ СТУПЕНИ

Согласование второй ступени с первой ступенью параллельной ВЛ в каскадном режиме (рис. 68)

Сложность согласования второй ступени защиты 1 с первой ступенью защиты 2 определяется переменной величиной K_T при перемещении точки к.з. от шин B (точка К2) к шинам A (точка К1). Характер зависимостей токов $3I_{01}$ и $3I_{02}$ от места к.з. показан на рис.69.

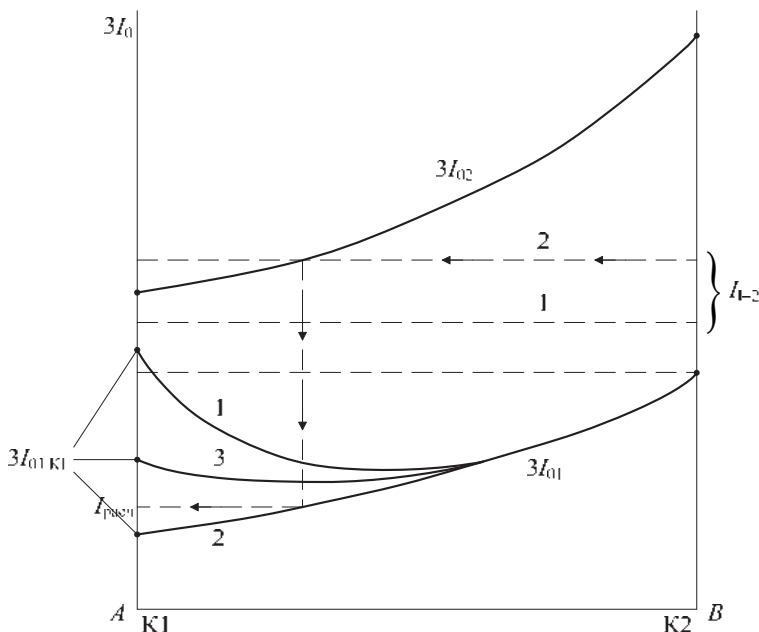


Рис. 69. Зависимость токов нулевой последовательности в защитах 1 и 2 при перемещении точки к.з. в каскадном режиме

Согласование I_{II-1} с I_{I-2} зависит от двух факторов:

- от того, имеет или не имеет мертвую зону в каскадном режиме первая ступень защиты 2;
- от характера зависимости тока $3I_{01}$ от места к.з. (типы зависимостей 1, 2 или 3 приведены на рис. 69).

Если мгновенная отсечка I_{I-2} не имеет мертвой зоны (горизонтальная линия, характеризующая ток срабатывания $I_{I-2} - 1$), то согласование производится аналитически по выражению (46). При этом $K_T = 3I_{01K1} / 3I_{02K1}$, $K_{отс} = 1,1$.

Если току срабатывания I_{I-2} соответствует линия 2, то порядок расчета зависит от характера кривой $3I_{01}$. Для выяснения этого необходимо определить токи $3I_{01}$ и $3I_{02}$ при к.з. в точке К2 (ранее при расчете I_{I-1} величины данных токов уже были определены при к.з. в точке К1).

Если оказалось, что $3I_{01K1} > 3I_{01K2}$, то расчет также ведется аналитически:

$$I_{II-1} = K_{отс} 3I_{01K1}, \quad (58)$$

где $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

Если $3I_{01K1} < 3I_{01K2}$, то расчет следует вести графоаналитическим способом (см. пунктирные стрелки на рис. 69). В этом случае

$$I_{II-1} = K_{отс} I_{расч}, \quad (59)$$

где $K_{отс} = 1,1$ – коэффициент отстройки.

Если по условию (59) оказалось, что $I_{расч} < 3I_{01K1}$ (характеристика 3), то ток срабатывания следует принять $I_{II-1} = 3I_{01K1} K_{отс}$, где $K_{отс} = 1,2$.

Следует обратить внимание, что если характер зависимости соответствует кривой 1 и I_{II-1} выбран по условию (58), то ток срабатывания второй ступени защиты 1 (I_{II-1}) отличается от тока срабатывания первой ступени (I_{I-1}) только величиной $K_{отс}$ (1,2 вместо 1,3), что заранее не обеспечивает ее чувствительность. Это в свою очередь приведет к тому, что на параллельной линии по согласованию со второй

ступенью не удастся повысить чувствительность и третьей ступени, т. е. сам принцип согласования защит параллельных линий в режиме каскадного отключения может не позволить получить чувствительную токовую защиту нулевой последовательности. К этой проблеме вернемся позже при рассмотрении поперечной направленной токовой защиты нулевой последовательности.

Согласование второй ступени ВЛ с первой ступенью смежной двухцепной линии

Из-за непостоянства коэффициента токораспределения это согласование приходится проводить графоаналитическим способом (рис. 70). Причем если рассчитываются защиты двухцепной ЛЭП, то за расчетный следует принять режим, когда параллельная линия отключена и заземлена. Ток срабатывания определяется по выражению (59), при $K_{отс} = 1,1$. Однако если удастся доказать, что в точке равной чувствительности первых ступеней комплектов 2 и 3 $K_{\text{ч}} > 1,3$, то согласование можно проводить аналитически по условию (46), рассчитав коэффициент токораспределения $K_T = 3I_{01} / 3I_{02}$ при к.з. вблизи шин подстанции С, при отключенном ближайшем выключателе. Вариантом, когда необходимо определять $K_{\text{ч}}$ в точке равной чувствительности, является

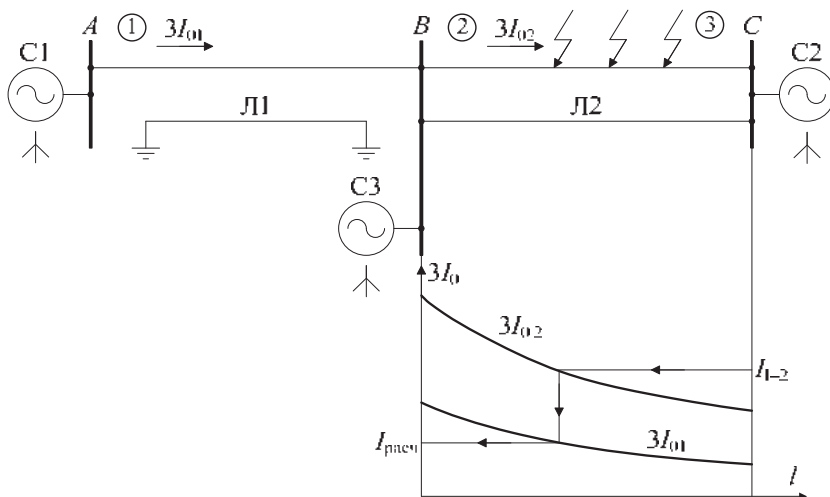


Рис. 70. Согласование второй ступени графоаналитическим способом

использование поперечной дифференциальной направленной токовой защиты на приемном конце двухцепной линии с односторонним питанием.

3.6.5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ТРЕТЬЕЙ СТУПЕНИ

Расчет тока срабатывания третьей ступени двухцепной ВЛ ведется практически так же, как второй (см. разд. 3.6.4) с заменой индексов I на II и II на III. Однако при согласовании второй ступени с первой в каскадном режиме увеличивается вероятность того, что расчет придется вести аналитически, так как вероятность появления мертвой зоны у второй ступени комплекта 2 (рис. 69) значительно меньше.

При согласовании второй ступени с первой ступенью смежной двухцепной линии может оказаться, что вторая ступень защиты 2, с которой согласуется третья ступень защиты 1, выходит за пределы смежного участка (подстанции С на рис. 70). Тогда расчетное условие согласования принимает следующий вид:

$$I_{III-1} = K_{отс} I_{II-2} K_{T1} K_{T2}, \quad (60)$$

где $K_{T2} = 2$ – за счет подпитки от параллельной линии Л2.

Однако если это условие не обеспечит достаточной чувствительности третьей ступени защиты 1, то РУ допускают проводить согласование при работе Л1 только в двухцепном режиме.

3.7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТНЗНП РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Распределительные сети – это радиальные сети с односторонним питанием или кольцевые сети с одним источником питания. В основном ТНЗНП в таких сетях выполняются трехступенчатыми. Но имеются некоторые особенности, о которых дальше пойдет речь.

3.7.1. РАСЧЕТ ТНЗНП ТУПИКОВЫХ ВЛ

Тупиковая линия питает понижающую трансформаторную подстанцию (рис. 71). Защиты обычно выполняются двухступенчатыми.

Первая ступень – ненаправленная ТНЗНП без выдержки времени. При наличии у выключателя трехфазного привода ток ее срабатывания выбирается из двух условий.

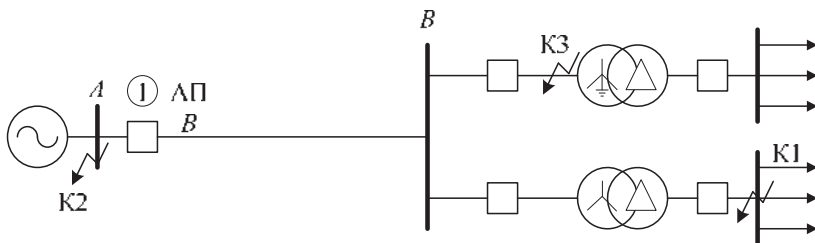


Рис. 71. Защита тупиковой ВЛ

1. Ток срабатывания отстраивается от тока небаланса при трехфазном к.з. за понижающим трансформатором (точка К1).

$$I_{1-1} = K_{отс} I_{нб \max}, K_{отс} = 1,25.$$

2. Ток срабатывания отстраивается от тока $3I_0$, протекающего через защиту при к.з. на землю на шинах питающей подстанции (точка К2).

$$I_{1-1} = K_{отс} 3I_{0 \text{ защ}}, K_{отс} = 1,3.$$

Вторая ступень с целью повышения чувствительности делается направленной, благодаря чему второе условие исчезает из расчетных.

Если выключатели имеют пофазный привод, то появляются еще два условия выбора тока срабатывания:

1) отстройка от тока $3I_0$ при одновременном выключении фаз в режиме самозапуска;

2) отстройка от тока $3I_0$ в броске тока намагничивания трансформаторов с заземленной нейтралью [8].

Следует напомнить, что обе отсечки являются неселективными, т. е. они отключают ВЛ при к.з. на выводах трансформатора (точка К3). Однако это неселективное отключение будет исправлено АПВ линии.

3.7.2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ

Расчет защит кольцевой сети с одним источником питания (рис. 72) не отличается от расчета сети с двусторонним питанием.

Исключением являются защиты на приемных концах питающих ВЛ (2, 5). Защиты данных комплектов выполняются двухступенчатыми

и направленными. Первая ступень – направленная токовая отсечка без выдержки времени. Ток срабатывания ее выбирается по условиям:

1) отстройки от тока небаланса фильтра при трехфазном к.з. на шинах той подстанции, на которой она установлена. Для комплекта 2 (рис. 72) это к.з. на шинах подстанции *B* (точка К1) при разомкнутом кольце (отключена линия *AC*):

$$I_{1-2} = K_{отс} I_{нб},$$

где $K_{отс} = 1,25$;

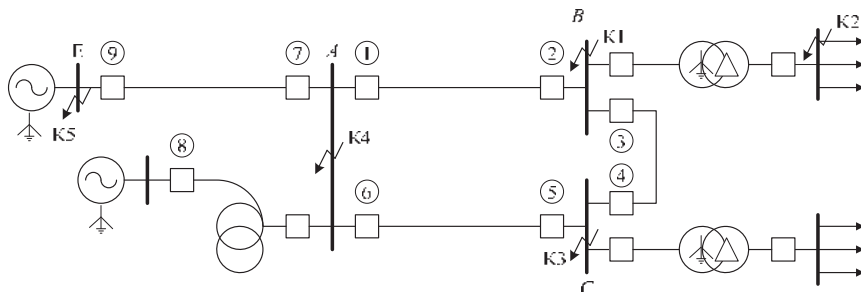


Рис. 72. Схема кольцевой сети

2) отстройки от тока $3I_0$ через защиту при к.з. на землю на шинах подстанции *A* (точка К4) в режиме, когда он максимален (кольцо разомкнуто и минимальное число нейтралей в системе).

$$I_{1-2} = K_{отс} 3I_{0 \text{ защ}},$$

где $K_{отс} = 1,3$.

Поскольку первая ступень отстроена от к.з. на противоположном конце ВЛ, необходима вторая ступень – это отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени. Ток срабатывания выбирается по условиям:

1) отстройки от тока $I_{нб}$ при трехфазном к.з. за понижающим трансформатором приемной подстанции, где установлена защита. Для комплекта 2 это точка К2. Режим системы максимальный, кольцо разомкнуто;

2) согласования с токами срабатывания третьих ступеней всех защит ВЛ, отходящих от подстанции *A* и четвертой ступени защиты

автотрансформатора 8, направленной в сеть смежного напряжения. Применительно к комплекту 2 по согласованию с защитой 7 (рис. 72) расчетное выражение имеет вид

$$I_{II-2} = K_{отс} I_{III-7} K_T,$$

где $K_{отс} = 1,1$.

$K_T = 3I_{02} / 3I_{07}$ – при к.з. на шинах системы (точка К5) в режиме, когда K_T максимальный. Аналогично проводится согласование с защитами других присоединений, в том числе и с защитой 8 автотрансформатора. Выдержка времени принимается на ступень селективности больше, чем максимальная выдержка из тех защит, с которыми проводилось согласование.

Чувствительность защиты оценивается при однофазном к.з. на защищаемом участке вблизи шин подстанции А. Нормированное значение $K_{\text{ч}} \approx 1,5$. Допустимо оценивать $K_{\text{ч}}$ в режиме каскадного отключения (после отключения выключателя 1).

Если позволяет чувствительность, целесообразно согласование вторых ступеней защит 2 и 5 проводить не с третьими, а со вторыми или даже с первыми ступенями защит присоединений к подстанции А. Это связано с тем, что время срабатывания этих защит определяет время срабатывания резервных защит межсистемных связей. Так, выдержки времени меняются в порядке возрастания:

$$t_2 \rightarrow t_4 \rightarrow t_6 \rightarrow t_8(t_9),$$

$$t_5 \rightarrow t_3 \rightarrow t_1 \rightarrow t_9(t_8).$$

3.7.3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗАЩИТ ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Это воздушные линии с одно-, двух- или многосторонним питанием, имеющие ответвления в виде трансформаторных отпайек. Общей особенностью расчета ТНЗНП этих линий является необходимость отстройки чувствительных ступеней защиты от токов небаланса при трехфазных к.з. за трансформаторными отпайками.

Если по условиям защиты от перенапряжений имеются трансформаторные отпайки с заземленными нейтралями, то при расчете уставок первой – третьей ступеней число заземленных нейтралей следует принимать минимальное и, наоборот, при расчете чувствительности – максимальное.

При наличии выключателей с пофазным приводом и наличии трансформаторных отпаяк с заземленными нейтральными при определении токов срабатывания первых ступеней появляются два дополнительных условия.

1. Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности броска намагничивания трансформаторных ответвлений с заземленными нейтральными.

2. Отстройка от кратковременно появляющегося утроенного тока нулевой последовательности при неодновременном замыкании фаз выключателя в период существующего самозапуска электродвигателя.

3.8. ПРИМЕНЕНИЕ ОРГАНОВ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В ТНЗНП

3.8.1. ОРГАНЫ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Как отмечалось ранее, потребность в направленности действия токовых защит нулевой последовательности появляется даже чаще, чем у защит, реагирующих на фазные токи. Поэтому во всех типовых шкафах

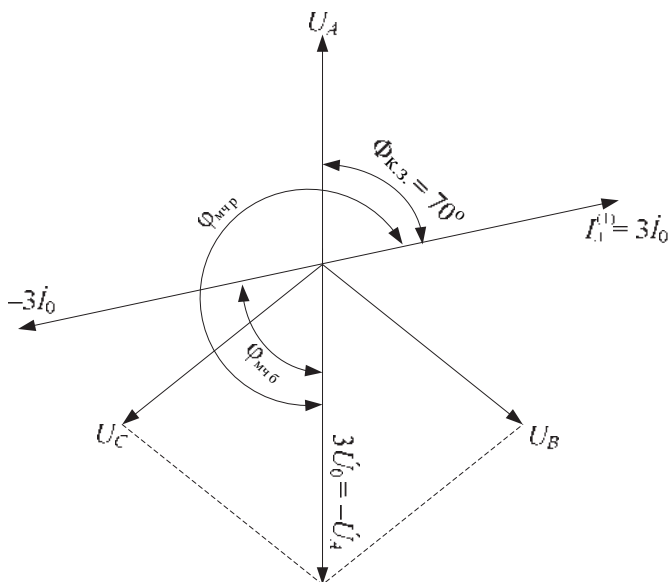


Рис. 73. Упрощенная векторная диаграмма токов и напряжений при однофазном к.з.

(панелях) токовые защиты нулевой последовательности снабжаются двумя органами направления мощности: разрешающим (ОНМр) и блокирующим (ОНМб). Представляется возможным любую ступень защиты сделать направленной. Один ОНМ используется при необходимости для придания направленности как одной, так и сразу нескольким ступеням защиты. В шкафах фирмы «Экра» ШЭ2607-011(021) ОНМр используется для всех ступеней, ОНМб – для третьей и четвертой ступеней. Вопрос о направленности каждой ступени решается отдельно. Направленной ступень делается тогда, когда не удастся обеспечить приемлемую чувствительность и быстродействие.

ОНМ включают на ток $3I_0$ и напряжение $3U_0$. Упрощенная векторная диаграмма токов и напряжений при однофазном к.з. в фазе A показана на рис. 73 (принято, что к.з. находится вблизи места установки защиты).

Приняв $\varphi_{к.з.} \approx 70^\circ$, можно сделать вывод, что угол максимальной чувствительности для реле мощности разрешающего типа целесообразно иметь $\varphi_{мчр} \approx 250^\circ$ и $\varphi_{мчб} \approx 70^\circ$. Такими они и приняты в типовых шкафах РЗ.

3.8.2. КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ ОНМ

Вопрос о необходимости использовать ОНМ для каждой ступени решается отдельно. Обычно расчет уставок всех ступеней начинается исходя из того, что ступень направленная и к.з. «за спиной» не могут привести к ее ложному срабатыванию. И только выбрав уставки срабатывания всех ступеней защиты, решают вопрос о необходимости использования ОНМ.

Рассмотрим вопрос о необходимости выполнения направленности ступеней защит на примере схемы сети рис. 74. Здесь все защиты комплекта 1, установленного на подстанции A , обозначены индексом 1, комплекта 2 на подстанции B – индексом 2, а все защиты других присоединений, отходящих от подстанции A , условно обозначены индексом 3.

Первую ступень комплекта 1 не нужно делать направленной, если ее ток срабатывания больше тока $3I_{01}$ при к.з. на шинах подстанции A :

$$I_{1-1} \geq K_{отс} 3I_{01K1}. \quad (61)$$

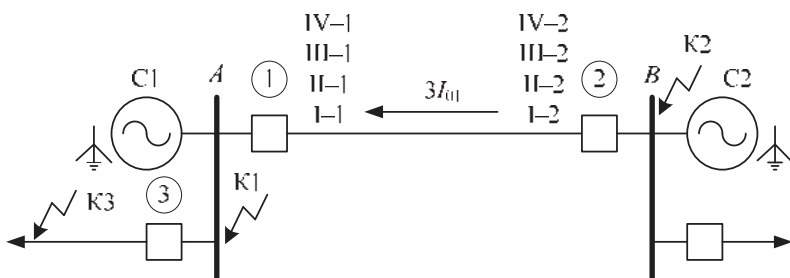


Рис. 74. Схема электрической сети

Нетрудно заметить, что условие (61) – это одно из условий выбора тока срабатывания первой ступени комплекта 2. Значит, условие (61) можно заменить условием

$$I_{I-1} \geq I_{I-2}. \quad (62)$$

Вторая ступень комплекта 1 не нуждается в ОНМ, если ее ток срабатывания отстроен от к.з. в конце зоны срабатывания первой ступени защиты 3:

$$I_{II-1} \geq K_{отс} K_{T \max} I_{I-3}. \quad (63)$$

Но условие (63) является условием выбора тока срабатывания второй ступени защиты 2. Значит, условие (63) можно заменить следующим:

$$I_{II-1} \geq I_{II-2}. \quad (64)$$

Аналогично можно сформулировать условие отсутствия ОНМ для третьей ступени защиты 1:

$$I_{III-1} \geq I_{III-2}. \quad (65)$$

Но следует заметить, что условия (64) и (65) можно использовать, если $t_{II-1} = t_{II-2}$ и $t_{III-1} = t_{III-2}$.

Если эти условия не выполняются, то условие выбора направленности отсечек с выдержкой времени можно сформулировать так: токовую отсекку с выдержкой времени можно сделать ненаправленной, если она не чувствует к.з. в конце зоны действия токовых отсечек, установленных на присоединениях «за спиной», с которой она согласована по времени.

Вопрос о направленности резервных ступеней решается сопоставлением выдержек времени резервных защит линии, установленных с разных сторон. Таким образом, четвертую степень защиты 1 не следует делать направленной, если $t_{IV-1} \geq t_{IV-2}$.

3.8.3. ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОНМ

Современные реле направления мощности РМ-12, ОНМ в шкафах ШДЭ2802, ШЭ2607 строятся на базе схем сравнения времени совпадения и несовпадения по знаку двух величин (см. разд. 3.2). Вольт-амперная характеристика срабатывания таких реле показана на рис. 75.

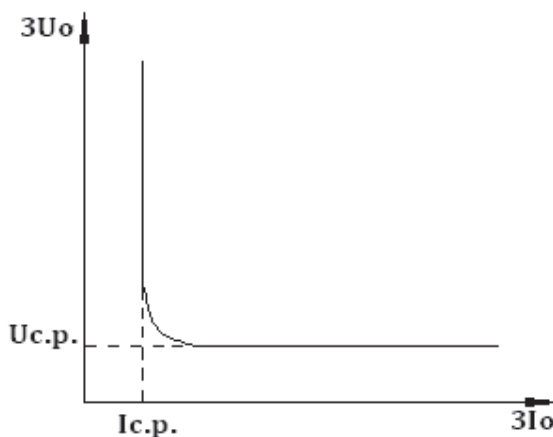


Рис. 75. Вольт-амперная характеристика ОНМ

Из характеристики следует, что ток и напряжение срабатывания не зависят друг от друга, и это позволяет уставки $I_{ср}$ и $U_{ср}$ рассчитывать независимо. В шкафах ШЭ2607 фирмы «Экра» диапазоны регулирования уставок задаются:

$$I_{ср} = (0,04...0,5)I_{ном}; \quad U_{ср} = (0,5...5) [В],$$

где $I_{ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Параметры срабатывания реле отстраиваются от небалансов фильтров в рабочем режиме.

Первичный ток срабатывания ОНМ находится так:

$$I_{\text{ср м}} = \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{в}}} (I_{\text{нб}} + 3I_{0 \text{ несим}}), \quad (66)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,25$ – коэффициент отстройки; $K_{\text{в}} = 0,9$ – коэффициент возврата; $I_{\text{нб}} = K_{\text{нб}} I_{\text{раб max}}$ – ток небаланса; $K_{\text{нб}} = 0,05$ – коэффициент небаланса; $3I_{0 \text{ несим}}$ – ток нулевой последовательности в линии, обусловленный несимметрией в системе.

Вторичный ток срабатывания реле: $I_{\text{ср вт}} = I_{\text{ср м}} / K_I$.

Первичное напряжение срабатывания ОНМ находится как

$$U_{\text{ср м}} = \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{в}}} (U_{\text{нб}} + 3U_{0 \text{ несим}}), \quad (67)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,25$ – коэффициент отстройки; $K_{\text{в}} = 0,9$ – коэффициент возврата; $U_{\text{нб}} = K_U (1,5 \dots 2)$ – напряжение небаланса; $3U_{0 \text{ несим}}$ – напряжение нулевой последовательности, обусловленное несимметрией в системе.

Вторичное напряжение срабатывания реле: $U_{\text{ср вт}} = U_{\text{ср м}} / K_U$.

Коэффициенты чувствительности определяются отдельно по току и по напряжению. Требования к ним такие же, как и к пусковым органам: в зоне ближнего резервирования $K_{\text{ч}} \geq 1,5$, в зоне дальнего резервирования $K_{\text{ч}} \geq 1,2$. Если $I_{\text{ср м}} \leq I_{\text{ср}}$, то проверенные по чувствительности пусковые органы ступеней защит гарантируют чувствительность ОНМ по току.

Проблема с обеспечением чувствительности по напряжению может появиться при наличии «за спиной» рассматриваемой защиты мощной энергосистемы, которая характеризуется малым сопротивлением. Так, напряжение $3U_{0 \text{ защ}}$ для комплекта 1 (рис. 76, а) можно вычислить через напряжение в месте к.з. на шинах С по выражению

$$3U_{0 \text{ защ}} = \frac{3U_{0 \text{ к.з.}} X_{\text{С10}}}{X_{\text{С10}} + X_{\text{Л10}} + X_{\text{Л20}}}. \quad (68)$$

При малой величине $X_{\text{С10}}$ это напряжение может оказаться недостаточным, чтобы сработал ОНМр. В шкафах типа ШЭ2607 предусматривается на этот случай возможность «смещения» места замера

напряжения в сторону защищаемой линии на сопротивление $X_{см}$. Величина этого смещения подбирается исходя из требуемого $K_{ч}$. Расчетное выражение можно получить из следующего уравнения:

$$\frac{U_{сз м}}{K_U} K_{ч} = \frac{3U_{0зщ}}{K_U} + X_{см} \frac{I_{0зщ}}{K_I}. \quad (69)$$

Из выражения (69) получаем

$$X_{см} = \frac{K_I}{K_U I_{0зщ}} (U_{сз м} K_{ч} - 3U_{0зщ}). \quad (70)$$

В шкафу типа ШЭ2607 предусматривается возможность регулирования $X_{см}$ в диапазоне от 0 до 100 Ом.

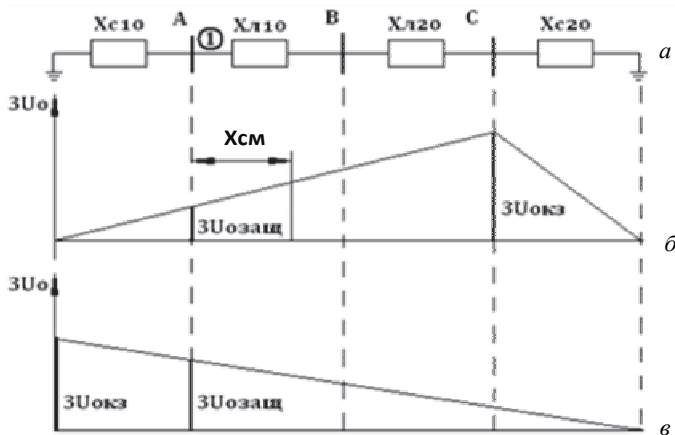


Рис. 76. Влияние места к.з. на напряжение $3U_0$ в месте установки защиты:

a – схема нулевой последовательности сети; b – зависимость $3U_0$ при к.з. в зоне действия защиты; $в$ – зависимость $3U_0$ при к.з. «за спиной» защиты

Другим способом повышения чувствительности по напряжению может оказаться применение ОНМ блокирующего типа. Напоминаем,

что ОНМб срабатывает только при к.з. «за спиной» защиты и блокирует ее. Как видно из рис. 76, в, при к.з. «за спиной» напряжение в месте установки защиты $3U_{0\text{защ}}$ найдется как

$$3U_{0\text{защ}} = I_{0\text{защ}} (X_{Л10} + X_{Л20} + X_{С20}). \quad (71)$$

Поскольку сопротивление нулевой последовательности сети в сторону срабатывания защиты по условию намного больше, чем сопротивление $X_{С10}$, чувствительность ОНМб будет значительно выше.

Другой случай целесообразного использования блокирующего ОНМ: когда все ступени по условию селективности необходимо делать направленными, тогда с целью исключения возможности отказа всей защиты при неисправности цепей напряжения одну из ступеней выполняют с блокирующим ОНМ.

3.9. ПОПЕРЕЧНАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Как отмечалось выше (см. разд. 3.6.4) на двухцепных ВЛ с взаимной индукцией часто не удается согласовать с приемлемой чувствительностью вторые и третьи ступени с защитами параллельной линии противоположного конца.

В этом случае в типовых отечественных шкафах ступенчатых защит ВЛ имеется возможность применить поперечную направленную токовую защиту нулевой последовательности (ПНЗНП). В качестве признака того, что к.з. произошло именно на этой линии, используется факт срабатывания на ней ОНМ разрешающего типа при условии, что на параллельной линии сработало ОНМ блокирующего типа. Это позволяет без выдержки времени подать сигнал на отключение выключателя. Такая ситуация складывается при к.з. в точке К для комплекта защиты на подстанции В (рис. 77), которая подействует на Q3. Чтобы исключить возможность ложного действия защиты от токов небаланса фильтров при к.з., от которых не отстроен ОНМ, в защите в качестве пускового органа используется токовый орган третьей ступени ТНЗНП. Но если в нормальной схеме третья ступень действует с выдержкой времени, то здесь с разрешения указанных ОНМ выдержка времени исключается. Поэтому поперечную направленную защиту часто называют «Ускорением третьей ступени ТНЗНП по контролю направления мощности».

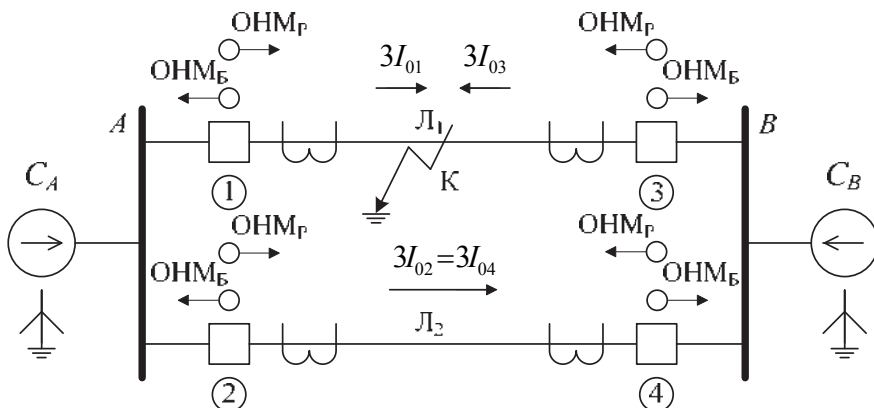


Рис. 77. Принцип действия поперечной ТНЗНП

В двухцепном режиме при к.з. защита способна работать только с одного конца линии. Однако после отключения выключателя Q3 в каскадном режиме ток в линии 2 меняет свое направление и такая же ситуация создается на подстанции A и защита 1 отключает Q1. В этом случае отпадает необходимость согласования второй и третьей ступеней защиты 4 соответственно с первой и второй ступенями защиты 1, так как в каскадном режиме выключатель поврежденной линии всегда отключается без выдержки времени. Логическая схема поперечной направленной защиты НП применительно к защите на подстанции B показана на рис. 78.

В случае необходимости данная защита может выполняться как на одном из концов линии, так и на обоих концах. Она не требует дополнительных измерительных органов, все они имеются в комплекте типовой ТНЗНП. Может лишь возникнуть необходимость дополнительно обеспечить отстройку тока срабатывания третьей ступени от тока небаланса в асинхронном режиме (если ранее это не сделано из-за отстройки третьей ступени от асинхронного режима по времени). Правда, расчетный асинхронный режим соответствует работе линии в двухцепном режиме, т. е. $I_{расч} = I_{AX} / 2$. В качестве аналогичного режима может быть и трехфазное к.з. на шинах подстанции.

Недостатком ПНЗНП является возможность ее отказа при отсутствии тока в параллельной линии. На линии существует такая точка, при к.з. на землю в которой ток нулевой последовательности в парал-

лельной линии отсутствует (мертвая зона). Это понятно из следующих рассуждений. Если в двухцепном режиме работы линии к.з. происходит вблизи подстанции A , то в обеих ВЛ токи нулевой последовательности текут в сторону подстанции A , при к.з. вблизи подстанции B – в сторону подстанции B . Следовательно, существует такая точка, когда направление тока меняется (т. е. ток равен нулю). Это приведет к отказу ОНМб в здоровой ВЛ, а значит, и к отказу ПНЗНП. Найти положение этой точки можно из схемы замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ, связывающей две энергосистемы, при к.з. на одной из линий (рис. 79). Расстояние до точки к.з. от подстанции A определяется коэффициентом $\alpha = L_{A\text{к.з.}} / L_{\text{Л}}$.

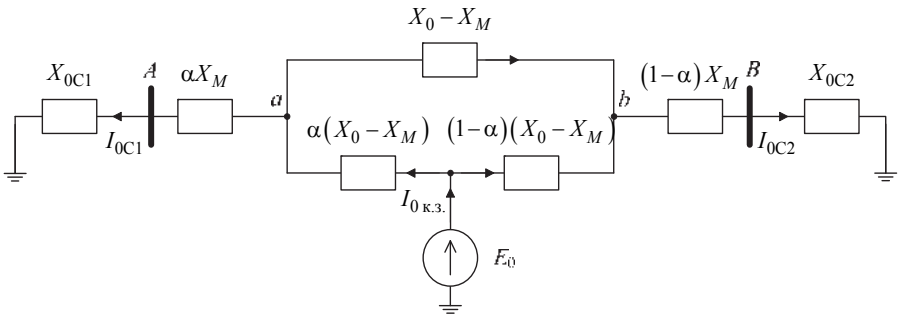


Рис. 79. Схема замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ

Ток в неповрежденной линии $I_{0\text{Л2}}$ будет отсутствовать, если в схеме нулевой последовательности (рис. 79) равны потенциалы точек a и b :

$$\varphi_a = \varphi_b. \quad (72)$$

На основе схемы замещения (рис. 79) и условия (72) запишем уравнения:

$$I_{0C1}(X_{0C1} + \alpha X_M) = I_{0C2}(X_{0C2} + (1 - \alpha)X_M), \quad (73)$$

$$I_{0C1}\alpha(X_0 - X_M) = I_{0C2}(1 - \alpha)(X_0 - X_M). \quad (74)$$

Разделив левые и правые части полученных уравнений друг на друга, получаем уравнение

$$\frac{(X_{0C1} + \alpha X_M)}{\alpha} = \frac{(X_{0C2} + (1 - \alpha)X_M)}{(1 - \alpha)}.$$

Решив это уравнение относительно α , получим значение α_M , соответствующее мертвой зоне ПНЗНП.

$$\alpha_M = \frac{X_{0C1}}{X_{0C1} + X_{0C2}}. \quad (76)$$

В этой точке ПНЗНП не сработает ни на одном из концов. Однако, как правило, эта точка попадает в зону действия одной из первых ступеней ТНЗНП, установленных на обеих сторонах, а при отключении ВЛ с одной стороны в каскадном режиме создаются условия для срабатывания ПНЗНП с другой стороны. В найденной точке ПУЭ требует проверить $K_{\text{ч}}$ третьей ступени ТНЗНП, который должен быть примерно (1,5...2).

4. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Как отмечалось в разделе 2, по требованию быстродействия на линиях высокого и сверхвысокого напряжений приходится применять защиты с абсолютной селективностью. Эти защиты позволяют любое к.з. на защищаемой линии отключать без выдержки времени. Классическим примером защиты с абсолютной селективностью служит продольная дифференциальная защита. На параллельных линиях может применяться поперечная дифференциальная защита. На длинных линиях принцип защит с абсолютной селективностью реализуется на базе косвенного сравнения величин токов с разных сторон линии с помощью высокочастотных сигналов. В настоящее время начинают применяться продольные дифференциальные защиты ВЛ с обменом информацией по оптоволоконным линиям связи. В данной главе дается краткое описание вариантов реализации перечисленных защит.

4.1. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ВЫСОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Техническая реализация схемы продольной дифференциальной защиты с циркуляцией токов (рис. 80) применительно к защите ВЛ вызывает целый ряд трудностей. К ним относятся:

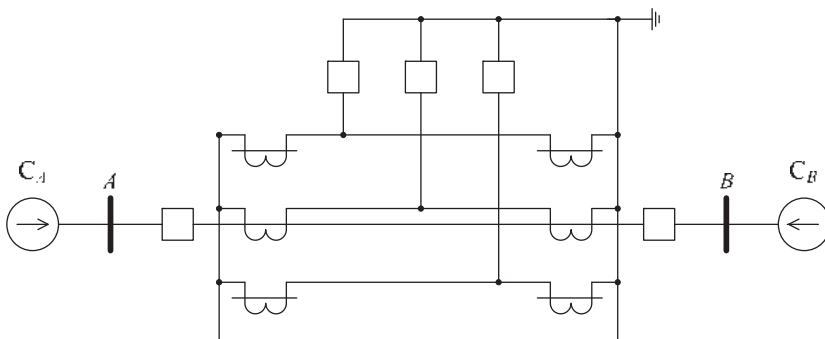


Рис. 80. Схема продольной дифференциальной защиты

- высокая стоимость контрольных кабелей, соединяющих ТТ с разных сторон;
- недопустимо большая нагрузка на ТТ, которую создают эти контрольные кабели;
- необходимость иметь измерительные органы защиты на каждой из сторон защиты ВЛ.

4.1.1. СХЕМА ПРОДОЛЬНОЙ ДЗЛ ПО СХЕМЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ ТТ

Реальная схема продольной дифференциальной защиты линии (ДЗЛ) (рис. 81) имеет целый ряд особенностей. С целью сокращения числа жил контрольных кабелей защита выполнена односистемной. Сравнение токов проводится после фильтра симметричных составляющих (ЗА). Для обеспечения чувствительности ко всем видам к.з. используется комбинированный фильтр токов прямой и обратной последовательности ($K_1 \dot{I}_1 + K_2 \dot{I}_2$). Для уменьшения нагрузки на первичные ТТ контрольный кабель включается через промежуточные трансформаторы тока (ПТА), уменьшающие ток в кабеле в $n_{ТА}^2$ раз. Благодаря этому нагрузка на первичные ТТ уменьшается и воспринимается как $Z'_{\text{КК}} = Z_{\text{КК}} / n_{ТА}^2$.

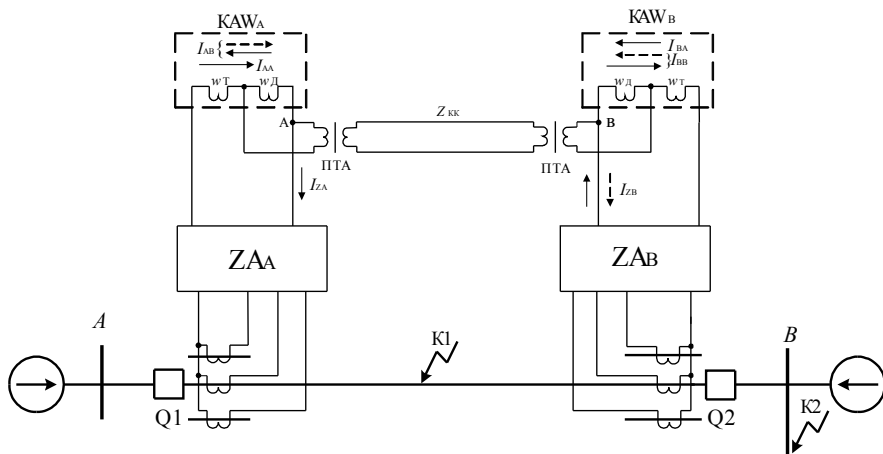


Рис. 81. Принципиальная схема ДЗЛ

Для воздействия на отключение выключателей с разных сторон линии защита выполнена с двумя измерительными органами (KAW_A и KAW_B). Это ведет к значительному увеличению тока небаланса в реле, так как при внешнем к.з. ток с выхода фильтра симметричных составляющих разветвляется между реле «своими» и на противоположной подстанции не поровну, а обратно пропорционально сопротивлениям контуров. В первый входит только Z_p , а во второй $Z_p + Z'_{kk}$. В итоге появится дополнительная составляющая тока небаланса.

$$I''_{нб} = I_{к.з.} \cdot \frac{R'_{kk}}{R'_{kk} + R_p}.$$

На рис. 81 токи при внешнем к.з. (точка К2) в дифференциальных обмотках реле (I_{AB} и I_{BB}) показаны жирными стрелками. При внутреннем к.з. (точка К1) токи от Z_{AB} меняют направление (пунктирные стрелки).

Как способ борьбы с повышением тока небаланса в защите используется реле с торможением (KAW). Промышленность выпускала данную защиту ДЗЛ в виде панели ЭПЗ-1638-91. Однако используется она только на очень коротких линиях напряжением 110–220 кВ, длина которых не превышает 10 км.

4.1.2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИИ С ЦИФРОВЫМ СРАВНЕНИЕМ ТОКОВ ПО КОНЦАМ

Общие сведения

Дифференциальная защита линии с цифровым сравнением токов по концам реализована на базе шкафа ШЭ2607 091 [15, 16] и основана на пофазном сравнении векторов токов по концам защищаемой линии. Предназначена для использования в качестве основной защиты линий электропередачи напряжением 110–220 кВ.

Для отстройки от возможных небалансов в дифференциальном токе при внешних КЗ применено торможение с возможностью выбора способа задания формирования тормозной величины.

1. От суммы модулей векторов токов. В этом случае величина торможения не зависит от угла сдвига фаз между токами по концам линии и одинакова для внутренних и внешних к.з.

2. От модуля разности векторов токов. В этом случае имеется зависимость торможения от сдвига фаз токов по концам линии. Торможение будет максимально при внешних повреждениях и минимально – при внутренних.

3. От модуля отношения векторов токов по концам линии и от угла между ними.

Терминалы защиты установлены на разных концах линии (рис. 82). Комплект этих терминалов представляет единое устройство. В терминалах обеспечивается одновременность взятия цифровых отсчетов аналоговых сигналов и синхронность цифровой обработки сигналов. Точность синхронизации векторов в устройствах на разных концах линии определяется разностью времени передачи данных по каналу связи в прямом и обратном направлениях. Если указанная разность имеет постоянный характер, то она может быть скомпенсирована заданием уставки несимметричности канала.

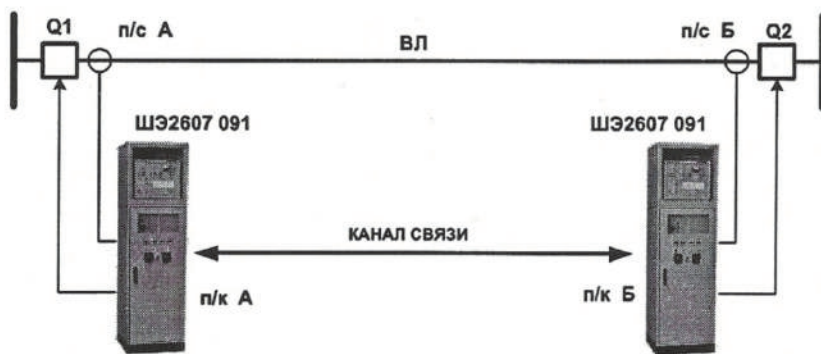


Рис. 82. Установка и взаимодействие комплектов ДЗЛ

Время задержки передачи данных по каналу связи определяется автоматически в процессе работы.

Для протяженных воздушных и кабельных линий со значительным емкостным током предусмотрено выравнивание токов по концам линии при внешних повреждениях (компенсация емкостного тока), что позволяет не учитывать зарядный ток линии при расчете уставок по току срабатывания.

Принцип действия ДЗЛ с цифровым сравнением токов по концам

Для анализа поведения ДЗЛ используется плоскость комплексных чисел, в осях которой откладываются отношения векторов токов (ОВТ) по концам линии $a = \operatorname{Re}\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$ и $jb = \operatorname{Im}\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$.

Для идеальных ТТ положение вектора ОВТ в режиме внешнего к.з. и в рабочем режиме характеризуется точкой с координатами $(-1, +j0)$ (рис. 83, а).



Рис. 83, а. Изображение действия ДЗЛ на комплексной плоскости при рассмотрении «идеальных» трансформаторов тока

В режиме внутреннего к.з. конец вектора ОВТ находится на оси вещественных чисел в положительном направлении. При наличии вытекающего тока нагрузки вектор ОВТ может находиться и в направлении отрицательных чисел, но быть отличным от точки $(-1, +j0)$. Эта область на рис. 83, а выделена жирной линией.

При внутренних повреждениях на линии с двусторонним питанием имеет место фазовый сдвиг $\varphi_{\text{перетока}}$ ($\varphi_{\text{пер}}$) между сравниваемыми одноименными фазными токами (рис. 83, б). Фазовый сдвиг $\varphi_{\text{пер}}$ определяется разностью фаз эквивалентных ЭДС по концам линии. Кроме того, к изменению взаимного угла между токами по концам линии приводит несимметричность цифрового канала связи полукон-

плектов защиты (разность времени задержки передачи сигнала между полукомплектами в прямом и обратном направлениях). Сдвиг фаз, обусловленный этой несимметричностью, определяет дополнительный сдвиг фаз φ_d (рис. 83, б). При учете фазовых сдвигов $\varphi_{пер}$ и φ_d вектор ОВТ в режиме внешнего к.з. будет находиться в незаштрихованной области, представляющей собой сектор (рис. 83, б), а при к.з. в защищаемой зоне – в заштрихованной области.

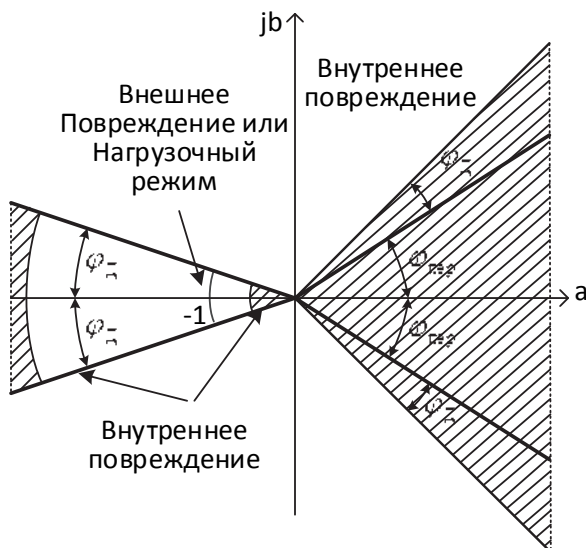


Рис. 83, б. Изображение действия ДЗЛ на комплексной плоскости при наличии влияния угла нагрузки и несимметричности канала связи

Область, в которую может попасть вектор ОВТ в режиме внешнего к.з. (область небаланса), должна быть заблокирована путем загробления защиты – торможением.

В рассматриваемой защите в зависимости от способа формирования тормозной величины могут быть заданы три формы характеристик блокирования: кардиоида, окружность и сектор (рис. 84).

Секторная характеристика имеет наибольшую площадь зоны блокирования. Ее рекомендовано использовать при ожидаемом сильном насыщении ТТ. При этом несколько ухудшаются условия действия защиты на отключение.

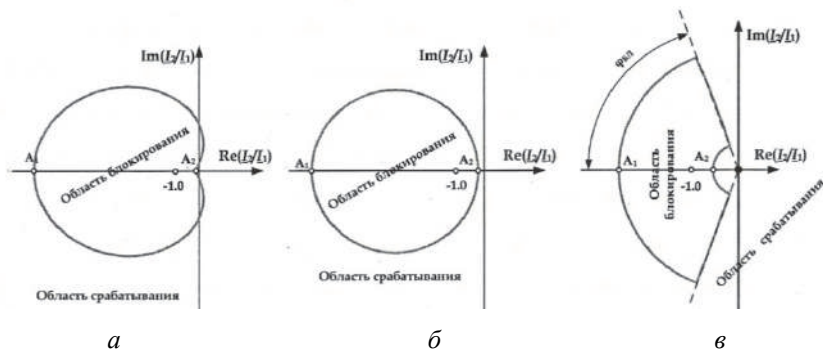


Рис. 84. Характеристики блокирования и срабатывания ДЗЛ в комплексной плоскости отношений векторов токов.

Область блокирования ограничена: *а* – кардиоидой; *б* – окружностью; *в* – сектором

Зона блокирования в виде окружности дает более широкую область отключения. При этом ухудшаются условия блокирования. Применение такой характеристики рекомендовано при малой вероятности появления значительного насыщения ТТ и при больших перетоках в нормальном режиме.

Размер области блокирования каждой характеристики определяется положением точек A_1 и A_2 и углом блокировки. Координаты точек A_1 и A_2 определяются через задаваемый коэффициент торможения:

$$A_1 = -\frac{1 + K_T}{1 - K_T}, \quad A_2 = \frac{1}{A_1}.$$

Коэффициент торможения регулируется в пределах 0,3...0,9.

Таким образом, для задания необходимой характеристики блокирования необходимо определить коэффициент торможения K_T и угол блокировки $\varphi_{\text{бл}}$.

Расчет параметров ДЗЛ с цифровым сравнением токов по концам

В процессе расчета необходимо определить ток срабатывания дифференциального элемента, коэффициент торможения и угол блокировки защиты.

Ток срабатывания дифференциального элемента $I_{од}$ является уставкой, с которой сравнивается модуль суммы векторов токов по концам защищаемой линии $I_{дифф} = \left| \dot{I}^{(A)} + \dot{I}^{(B)} \right|$. Величина тока $I_{од}$ регулируется в пределах $(0,1 \dots 2,0) I_6$, где I_6 – базисный ток, приведенный к первичной стороне. Базисный ток одинаков для комплектов по обоим концам линии. В соответствии с ПУЭ [1] величину тока срабатывания дифференциального элемента $I_{од}$ необходимо задать такой, чтобы был обеспечен коэффициент чувствительности не менее 2 при минимальном токе к.з., в том числе при наличии тормозной величины.

Коэффициент торможения и угол блокировки определяют размер и форму характеристики блокирования и должны быть выбраны так, чтобы в переходном режиме внешнего к.з. годограф вектора ОВТ не выходил из области блокирования. Положение вектора ОВТ в этом режиме зависит от следующих факторов:

- погрешности ТТ в установившемся режиме (ε);
- коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi_{нагр}$);
- постоянной времени затухания апериодической составляющей (τ);

- кратности тока короткого замыкания $\left(\frac{I_{к.з. \max}}{I_{ном \text{ ТТ}}} \right)$ в режиме внешнего к.з.

Разработчики программы расчета защиты путем математического моделирования переходных процессов в ТТ построили характеристики – номограммы. При помощи этих характеристик, зная величины ε , $\cos \varphi_{нагр}$, кратность тока и τ , можно определить величину K_T и угол блокировки $\varphi_{бл}$ для различных ТТ и форм характеристик блокирования [15]. На рис. 85 показана номограмма для трансформатора тока ТВ 110-IX с полной погрешностью $\varepsilon = 10\%$ и коэффициентом мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,8$.

Номограмма представляет собой два семейства кривых, которые построены в одинаковом масштабе по оси ординат. Первое семейство – зависимость угла блокировки $\varphi_{бл}$ от кратности тока короткого замыкания; на рис. 85 каждой кривой семейства соответствует свое

значение постоянной времени затухания аperiodической составляющей τ . Второе семейство – зависимость угла блокировки $\phi_{\text{бл}}$ от постоянной времени затухания аperiodической составляющей τ ; на рис. 85 каждой кривой семейства соответствует свое значение коэффициента торможения K_T .

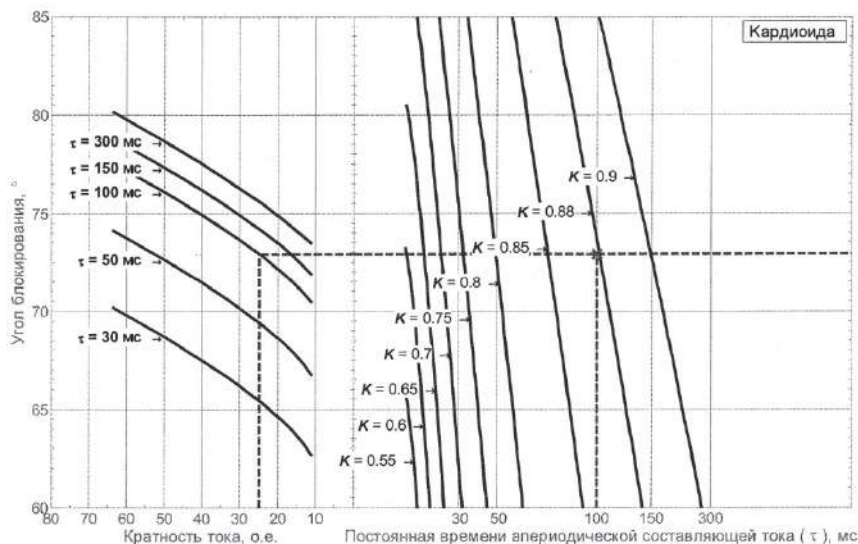


Рис. 85. Номограмма для определения коэффициента торможения ДЗЛ ($\varepsilon = 10\%$, $\cos \varphi = 0,8$)

Определение коэффициента торможения по номограмме начинается с определения из семейства зависимостей угла блокировки $\phi_{\text{бл}}$ от кратности тока к.з. кривой, постоянная времени τ которой будет ближе всего к заданной для расчетной сети. После этого на оси абсцисс отмечают значение, соответствующее кратности тока к.з. для расчетной сети, и проводят перпендикуляр к оси из этой точки до пересечения кривой, определенной на предыдущем этапе. Отмечают точку пересечения. Затем из этой точки пересечения проводят перпендикуляр к оси ординат до пересечения с делением, соответствующим значению постоянной времени τ для кривой, выбранной из первого семейства. Расчетное значение коэффициента торможения, соответствующего

полученной точке, определяют путем аппроксимации между двумя прилегающими кривыми с известными K_T .

Для уточнения расчета параметров защиты и формы характеристики блокирования разработчики рекомендуют использовать программу «Симулятор ДЗЛ» ООО НПП «Экра» [15]. Главное окно этой программы показано на рис. 86.

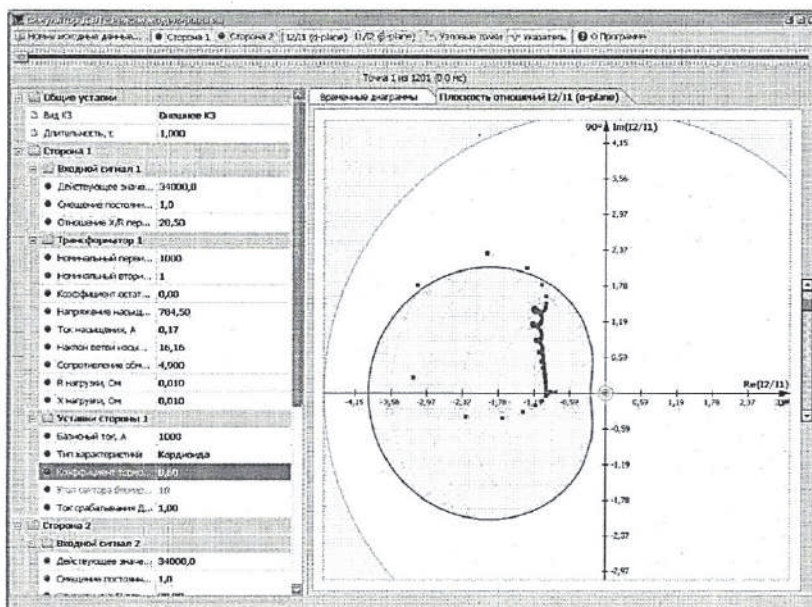


Рис. 86. Окно программы симулятора ДЗЛ

Симулятор ДЗЛ имитирует переходной процесс в режиме внешних к.з. с самым неблагоприятным соотношением погрешностей трансформаторов тока и производит информирование о попадании вектора ОВТ в область блокировки.

4.2. ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

4.2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПДНЗ

Поперечная дифференциальная направленная защита (ПДНЗ) применяется для защиты двухцепных ВЛ при наличии выключателей в каждой цепи. На рис. 87, *а* показана однолинейная схема защиты с комплектами на обоих концах ВЛ. В рабочем режиме и при внешнем к.з. (точки К1 и К2) по линиям текут одинаковые токи, а токи в реле текут их разность, теоретически отсутствуют. Практически эти токи равны токам небаланса, обусловленным погрешностями трансформаторов тока и неравенствами сопротивлений ветвей. Параметры срабатывания пусковых органов защит (КА) должны быть от них отстроены. При к.з. на одной из защищаемых ВЛ (точка К3) в реле одного из комплектов (на подстанции *А*) появляется разность токов ($I_1 - I_2$), в реле второго комплекта (на подстанции *В*) появляется сумма токов ($I_2 + I_3$).

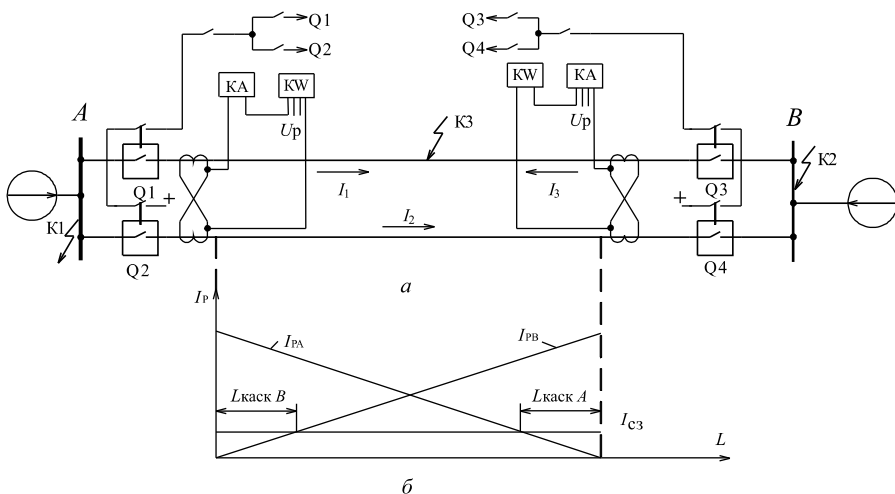


Рис. 87. Принцип действия ПДНЗ:

а – построение схемы защиты; *б* – зависимости токов в реле от места к.з. на линии

Защита включает в себя два органа: пусковой токовый (КА), позволяющий отстраивать защиту от токов небаланса, и избирательный

орган направления мощности (KW), выбирающий поврежденную линию. Применение его основано на том, что направление тока в реле меняется на 180° в зависимости от того, на какой линии произошло к.з. Если ток в реле превысил ток срабатывания пускового органа, защита действует на отключение выключателя поврежденной линии без выдержки времени.

Однако, как видно из зависимостей на рис. 87, б, ток в защите при к.з. вблизи шин подстанции, противоположной месту установки защиты, стремится к нулю. Это означает, что защита при таком к.з. не работает (имеет мертвую зону). Но это к.з. попадет в зону наибольшей чувствительности комплекта защиты, установленного на противоположном конце ВЛ, значит, последний работает и отключит выключатель поврежденной линии со своей стороны. Это приведет к изменению направления тока в исправной линии либо его исчезновению (на линиях с односторонним питанием). При этом создаются условия для срабатывания второго комплекта защиты. Следовательно, ПДНЗ отключит выключатели с обеих сторон, но только один из них в зоне $I_{\text{каскад}}$ не сразу, а только после отключения выключателя с другой стороны, т. е. в каскадном режиме.

На рис. 87, б отображены зоны каскадного действия защиты. Каскадность срабатывания защиты приводит к некоторому увеличению времени устранения к.з., но это увеличение незначительно, несоизмеримо со временем ступени селективности Δt , с которым к.з. отключаются второй ступенью токовых или дистанционных защит. Надо бояться только того, чтобы зоны каскадного действия не наложились друг на друга — тогда в середине линии появится уже настоящая «мертвая» зона, при этом каждый комплект будет «ждать», когда работает комплект на противоположной стороне линии.

Отключение одной линии хотя бы с одной стороны делает защиту неселективной и способной отключить оставшуюся линию при внешнем к.з. Чтобы это предотвратить, защиту необходимо вывести из работы при отключении выключателя на любой линии. На рис. 87, а это обеспечено снятием оперативного тока с помощью вспомогательных контактов выключателей (либо контактами реле положения выключателя «включено» КQC). Это является основным недостатком, так как требуется на каждом выключателе иметь дополнительный комплект защиты (ступенчатую токовую или дистанционную защиту).

4.2.2. ТИПОВАЯ СХЕМА ПДНЗ ВЛ 110–220 кВ

В соответствии с рекомендациями руководящих указаний по релейной защите [6] поперечная дифференциальная направленная защита ВЛ 110–220 кВ включает в себя два комплекта (рис. 88): комплект от междуфазных к.з. в двухфазном исполнении и комплект нулевой последовательности от к.з. на землю.

Комплект нулевой последовательности помимо пускового органа по току (КА0) содержит реле, включенное на напряжение нулевой последовательности (KV0). Этот орган отстроен от небаланса фильтра напряжения нулевой последовательности при междуфазных к.з. на защищаемой линии. Это позволяет уменьшить ток срабатывания КА0, отстраивая его от тока небаланса при к.з. только на шинах, противоположных месту установки защиты. В свою очередь размыкающие контакты KV0 не позволяют заблокировать защиту от междуфазных к.з. на защищаемой линии, когда КА0 может сработать.

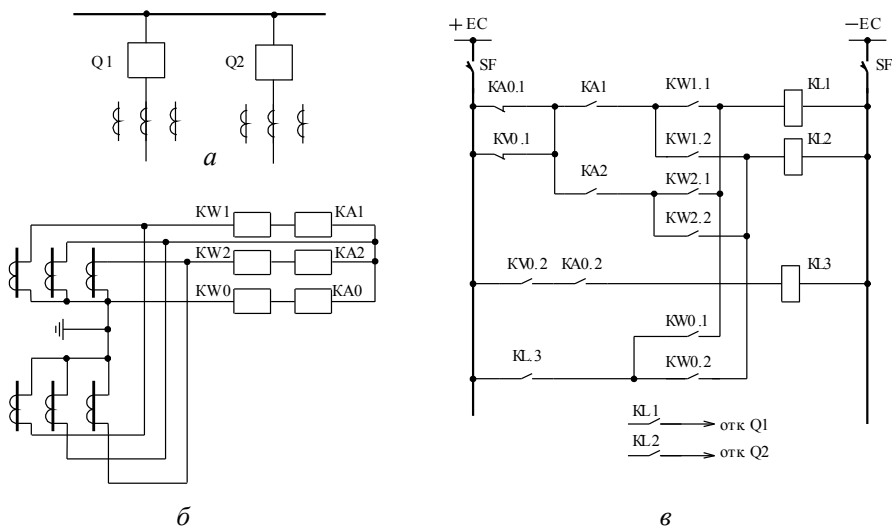


Рис. 88. Схема ПДНЗ ВЛ 110–220 кВ:

а – первичная схема; *б* – схема токовых цепей; *в* – схема оперативных цепей

Комплект нулевой последовательности (KW0, КА0, KL3) позволяет повышать чувствительность не только к однофазным к.з., но и к междуфазным, так как исключает необходимость отстраивать ток сра-

батывания пусковых органов (КА1, КА2) от токов неповрежденных фаз (см. п. 3.2). Такая потребность появляется в каскадном режиме при однофазном к.з. (рис. 89).

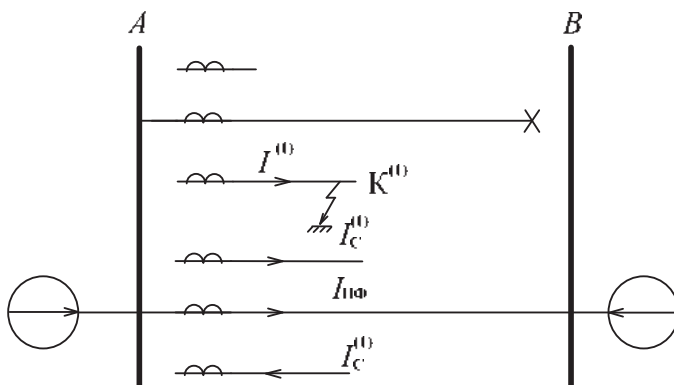


Рис. 89. Токи в неповрежденных фазах в каскадном режиме

На рисунке токи в фазах A и B в поврежденной линии отсутствуют, а в «здоровой» линии появляются за счет токов нулевой последовательности и нагрузки. Следовательно, ПДНЗ в этих фазах воспринимает их как повреждение на «здоровой» ВЛ.

Поскольку основной причиной появления токов в неповрежденных фазах являются токи нулевой последовательности, при к.з. на землю должен сработать комплект ПДНЗ нулевой последовательности. Из схемы на рис. 88 следует, что он не только обеспечит селективное отключение поврежденной линии (контакт КА0.2), но и заблокирует комплект от междуфазных к.з. (контакт КА0.1). Это позволяет отказаться от отстройки последнего от токов неповрежденных фаз. Пусковой орган комплекта нулевой последовательности выполнен с помощью реле тока КА0, включенного на разность токов нулевой последовательности параллельных линий, и реле напряжения КВ0, включенного на напряжение нулевой последовательности. Это приводит к повышению чувствительности токового органа, отстраивая его ток срабатывания от $I_{нб}$ при междуфазном к.з. только в режиме внешнего к.з., а не от тока к.з. на самой электрической линии, который может быть намного больше.

4.2.3. РАСЧЕТ УСТАВОК ПДТНЗ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ К.З.

Расчету подлежат ток срабатывания пускового органа (КА1, КА2) и оценка его чувствительности.

Ток срабатывания выбирается по следующим условиям.

1. Отстройка от максимального тока небаланса при внешнем трехфазном к.з. (точки К1 и К2 на рис. 87, а):

$$I_{сз} = K_{отс} I_{нб \max},$$

где $K_{отс} = 1,5 \dots 2$ – коэффициент отстройки;

$$I_{нб \max} = I'_{нб} + I''_{нб} - \text{максимальный ток небаланса.}$$

Первая составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью ТТ, находится по выражению

$$I'_{нб} = K_a K_o \varepsilon I_{к.з. \text{ расч}}^{(3)},$$

где $K_a = 2$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме; K_o – коэффициент однотипности (равен 0,5 при однотипных ТТ на обеих цепях); $\varepsilon = 0,1$ – коэффициент, учитывающий возможную погрешность трансформаторов тока в установившемся режиме; $(I_{к.з. \text{ скв max}}^{(3)}) / 2 = I_{к.з. \text{ расч}}^{(3)}$ – половина сквозного тока, обтекающего линию в двухцепном режиме при к.з. в точках К1 или К2 (см. рис. 87, а).

Вторая составляющая тока небаланса, обусловленная неравенством сопротивлений параллельных линий, находится по выражению

$$I''_{нб} = I_{к.з. \text{ расч}}^{(3)} \Delta Z_{Л*},$$

где $\Delta Z_{Л*} = \Delta Z_{Л} / Z_{Л}$.

2. Обеспечение возврата пускового органа после отключения внешнего к.з., когда по линии в одноцепном режиме протекает рабочий ток. В этом режиме защита превращается в неселективную и реле тока срабатывает при внешних к.з. Предотвращает воздействие защиты на отключение второй цепи только ее блокирование вспомогательными контактами отключенного выключателя (см. рис. 87). Поэтому, если реле после отключения внешнего к.з. не разомкнуло свои контакты, при включении второй линии в работу защита отключит первую. Сле-

довательно, необходимо, чтобы после отключения внешнего к.з. при максимальном рабочем токе реле вернулось:

$$I_{сз} = \frac{K_{отс}}{K_{в}} I_{раб\ max},$$

где $K_{отс} = 1,5$ – коэффициент отстройки; $K_{в}$ – коэффициент возврата реле; $I_{раб\ max}$ – максимальный рабочий ток, протекающий по линии.

За расчетное значение тока срабатывания принимается бóльшая величина.

Чувствительность защиты оценивается при минимальных токах двухфазного к.з. в следующих режимах (рис. 90, а).

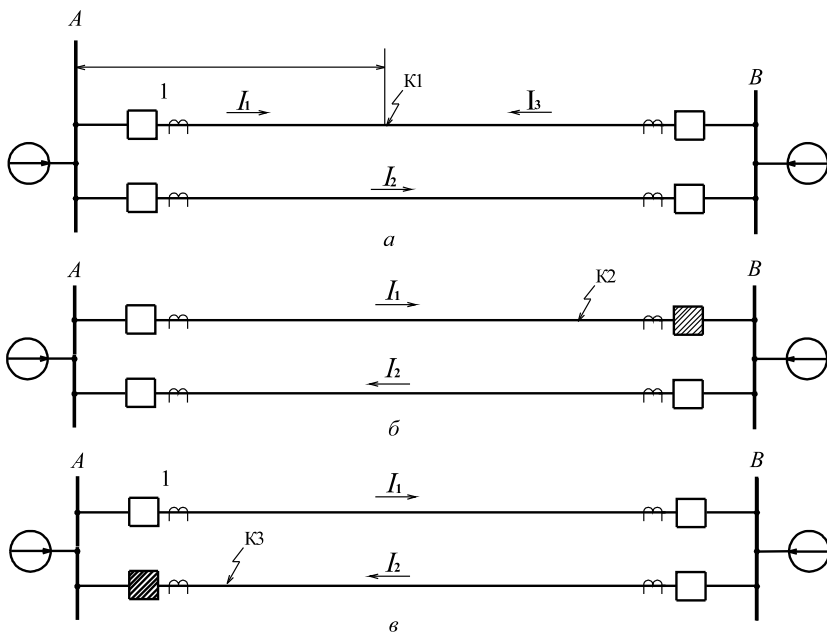


Рис. 90. Проверка чувствительности ПДНЗ:

а – в точке равной чувствительности; б и в – в режиме каскадного отключения

1. При к.з. в точке равной чувствительности (точка К1), где могут сойтись зоны каскадного действия. Для предотвращения этого необходимо, чтобы

$$K_{чA} = \frac{I_1 - I_2}{I_{сзA}} = K_{чB} = \frac{I_2 - I_3}{I_{сзB}} \geq 2.$$

Если $I_{сзA} = I_{сзB}$, то точка равной чувствительности находится в середине линии.

2. В режимах каскадного действия в точках К1 и К2 требуется, чтобы $K_{ч}$ был не менее 1,5 (рис. 90, б, в). Если на линии с односторонним питанием на питающем конце ПДНЗ отсутствует, то за точку равной чувствительности условно можно принять точку, где первая ступень ДЗ имеет коэффициент чувствительности, равный 1,5 (рис. 90, а), тогда

$$L_{трч} = L_{Л} \frac{X_I}{1,5X_{Л}},$$

где X_I – уставка по X первой ступени ДЗ с питающей стороны; $X_{Л}$ – сопротивление линии прямой последовательности; $L_{трч}$ – расстояние от точки А до точки равной чувствительности.

4.2.4. РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПДНЗНП)

Ток срабатывания пускового органа комплекта нулевой последовательности отстраивается от максимального тока небаланса при к.з. на сборных шинах. За расчетный вид к.з. принимается двухфазное к.з. на землю. Как известно, ток небаланса может быть обусловлен погрешностью ТТ. Поскольку трансформаторы тока выбираются по кривым предельной кратности, максимальная их погрешность может составлять 10 %.

Для получения наибольшего тока небаланса предполагается, что один ТТ работает с максимальной погрешностью, а другой – практически без погрешности. Однако если в дифференциальной защите разные погрешности, для получения наибольшего тока небаланса защита должна иметь ТТ в одной фазе, но в разных плечах (в ПДНЗ это в параллельных линиях), а в фильтре НП – это должны быть ТТ одной цепи, но в разных фазах.

В поперечной дифференциальной защите нулевой последовательности эти обе составляющие могут иметь место. Причем при неблагоприятном сочетании погрешностей разных ТТ эти токи небаланса могут просуммироваться. Наиболее просто это явление можно проследить

на примере двухфазного к.з. (рис. 91). В этом случае токи в поврежденных фазах равны и находятся в противофазе (это показано в фазах *B* и *C* стрелками). В трансформаторах тока, которые выдают больший ток (без погрешности), он изображен сплошной стрелкой, а ток, выдаваемый с погрешностью 10 % (меньший), – пунктирной стрелкой. На рис. 91 это ТТ линии 1 в фазе *C*. Разность двух таких токов и образует ток небаланса, составляющий 0,1 от протекаемого. В точке *m* образуется $I'_{нб}$, обусловленный разной погрешностью трансформаторов тока разных ВЛ (ТА1С и ТА2С). В точке *n* образуется $I''_{нб}$, являющийся разностью токов нулевой последовательности линий и обусловленный разной погрешностью трансформаторов тока (ТА1В и ТА1С). Из рис. 91 видно, что в реле КА0 эти две составляющие просуммировались арифметически, т. е. ток небаланса увеличился в два раза. При трехфазных к.з., где сдвиг между токами в фазах 120° , увеличение будет в $\sqrt{3}$ раз.

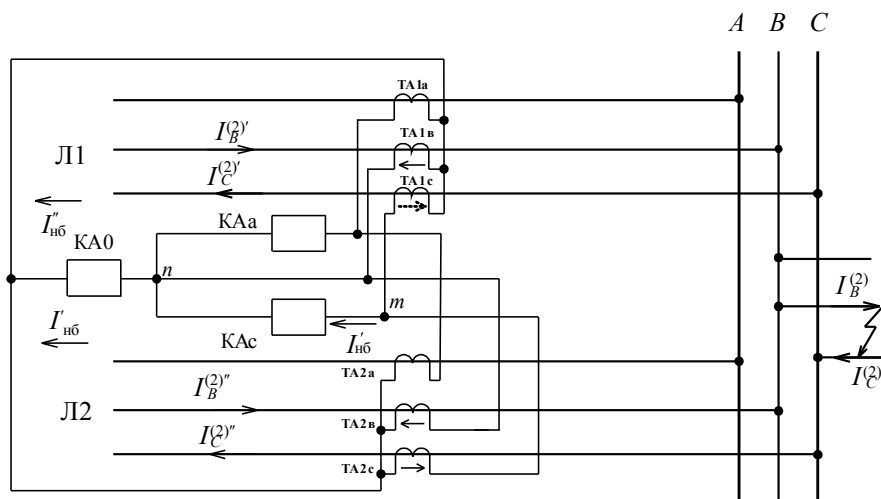


Рис. 91. Образование тока небаланса в реле КА0 при двухфазном к.з. *BC*

При расчете тока небаланса в цепи КА0 это учитывается дополнительным коэффициентом β ($\beta^{(2)} = 2, \beta^{(3)} = \sqrt{3}$). Однако поскольку $I^{(3)} > I^{(2)}$, за расчетный вид к.з. принимают двухфазное к.з. на землю,

так как $I^{(1,1)} \geq I^{(2)}$, а угол между токами поврежденных фаз больше 120° , т. е. близок к 180° . Поэтому с некоторым запасом можно принять $\beta^{(1,1)} = 2$.

Тогда расчетным выражением для определения тока срабатывания пускового органа ПДНЗНП является:

$$I_{сз} = K_{отс} \beta^{(1,1)} \varepsilon \cdot I_{расч}^{(1,1)} K_o K_a,$$

где $K_{отс} = 2$; $\beta^{(1,1)} = 2$; $\varepsilon = 0,1$; $K_o = 0,5$; $K_a = 2$; $I_{расч}^{(1,1)}$ – наибольший ток, протекающий по одной из поврежденных фаз ВЛ при внешних $K^{(1,1)}$ на сборных шинах.

Оценка чувствительности данного комплекта защиты проводится при однофазных к.з. в минимальном режиме сети в двух режимах: в точке равной чувствительности и в режиме каскадного отключения. Требования к $K_{ч}$ такие же, как и в комплектах от междуфазных к.з.

Если ПДНЗНП применена только на приемном конце двухцепной ВЛ с односторонним питанием, а на питающем конце ступенчатые ТНЗНП, то расчет $K_{ч}$ в точке равной чувствительности проводится графоаналитическим методом (рис. 92). При этом по результатам расчетов токов к.з. на линии при разном удалении от шин подстанции А точки к.з. ($\alpha = 0 \dots 1$) строятся зависимости $3I_0 = f(\alpha)$, а затем для разных значений α рассчитываются $K_{ч}$ для первой ступени ТНЗНП комплекта 1 на питающем конце ВЛ и для ПДНЗНП – на приемном конце.

Коэффициент чувствительности для первой ступени ТНЗНП комплекта 1 на питающем конце:

$$K_{чA} = \frac{3I_{01\alpha}}{I_{1-1}}.$$

Коэффициент чувствительности для ПДНЗНП на приемном конце:

$$K_{чB} = \frac{3I_{03\alpha} - 3I_{02\alpha}}{I_{сз}}.$$

Точка пересечения зависимостей $K_{ч} = f(\alpha)$ и определяет коэффициент чувствительности в точке равной чувствительности, который должен быть не менее 2.

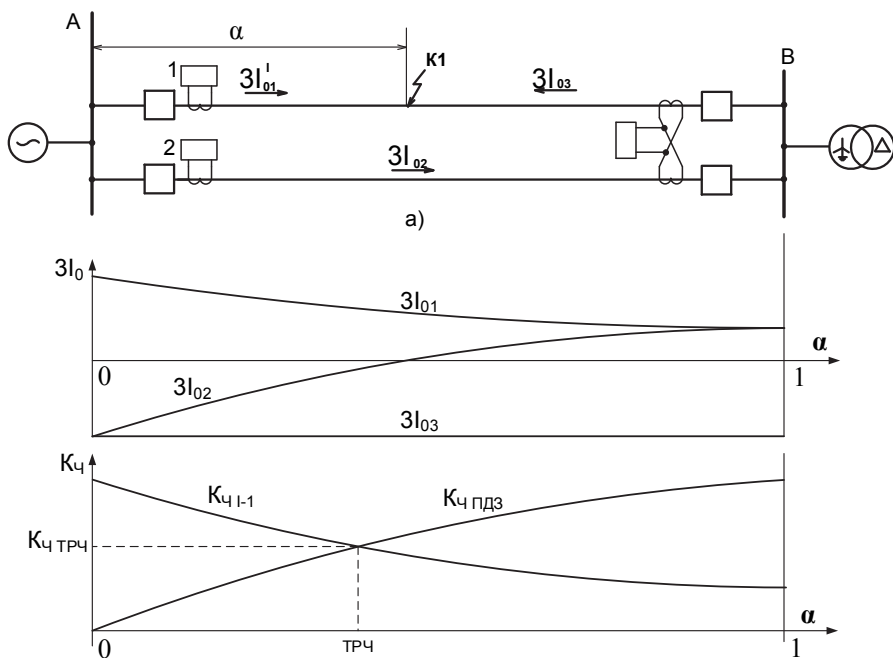


Рис. 92. Расчет K_{ch} в точке равной чувствительности

В заключение следует заметить, что ПУЭ рекомендует применять поперечную дифференциальную направленную защиту на приемных концах двухцепных ВЛ с односторонним питанием. Иногда ее целесообразно использовать для ускорения отключения к.з. на питающем конце данных ВЛ.

4.3. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

Продольная дифференциальная защита, основанная на сравнении токов фаз по концам защищаемой линии, не может быть применена для защиты линий большой протяженности. Однако этот принцип можно реализовать косвенным сравнением токов по концам защищаемой ВЛ, преобразуя их в сигналы высокой частоты. Были попытки в качестве такой частоты использовать частоту в десятки и сотни мегагерц, а в качестве канала – эфир (радиозащиты). Но из-за наличия больших помех (грозовые разряды, радиоволны и др.) эти защиты не

нашли широкого применения. Зато широкое распространение нашли высокочастотные защиты, использующие в качестве передачи частоту в десятки и сотни килогерц, а в качестве канала связи – провода самой защищаемой ВЛ. Для выполнения такой защиты необходимо иметь на каждом конце линии приемник и передатчик токов высокой частоты, устройства защиты, к ним подключенные, и специально обустроенную линию, превращенную в канал связи. На рис. 93 показана принципиальная схема канала связи.

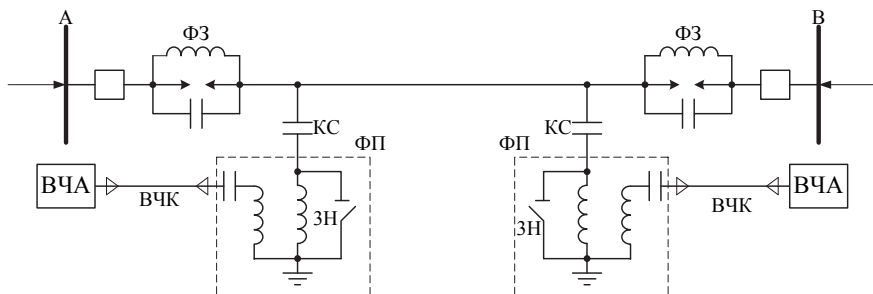


Рис. 93. Устройство канала связи

Канал связи включает в себя фильтры-заградители (ФЗ), ограничивающие распространение сигналов за пределы защищаемой ВЛ, конденсаторы связи (КС), являющиеся изоляторами для промышленной частоты, фильтры присоединения (ФП), настроенные в резонанс напряжений для выбранной частоты, и высокочастотные кабели (ВЧК), связывающие ФП, находящиеся в ОРУ с приемопередатчиками.

Принцип действия защиты выбран из того, чтобы потребность в канале связи возникала только при внешнем к.з., когда ВЛ исправна, а сама информация была минимальной, ограниченной передачей импульса неизменной амплитуды.

В настоящее время высокочастотные защиты выполняют на одном из двух принципов действия:

- на дифференциально-фазном, основанном на сравнении фаз токов по концам линии;
- на сравнении направлений мощностей по концам защищаемой линии (направленные защиты с ВЧ блокировкой).

4.3.1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ЗАЩИТА

Принцип действия ДФЗ

В качестве информационного признака, позволяющего определить место к.з. (внутреннее, внешнее), используется угол сдвига фаз между токами, протекающими по концам защищаемого участка. При внутреннем к.з. (точка К1 на рис. 94) токи I_1 и I_2 совпадают по фазе (оба текут от шин в линию), угол между ними близок к нулю. При внешнем к.з. (точка К2) этот угол близок к 180° .

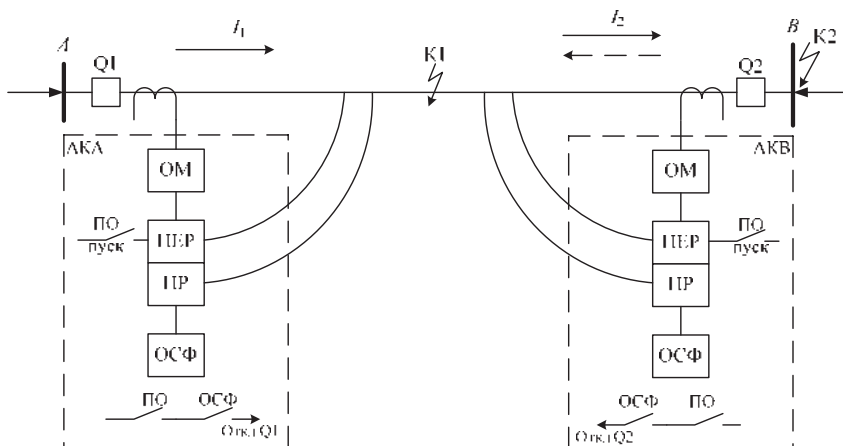


Рис. 94. Принцип действия ДФЗ

Защита включает в себя три основных органа: пусковой (ПО), орган манипуляции (ОМ) и орган сравнения фаз (ОСФ). Пусковой орган запускает передатчики и готовит цепь на отключение только при наличии к.з. в сети (режим тревоги). Орган манипуляции управляет работой передатчика, в зависимости от фазы тока передатчик работает только при наличии положительной полуволны тока (рис. 95). Это приводит к тому, что при внешних к.з. (рис. 95, а) передатчики на разных концах ВЛ работают поочередно (рис. 95, а), а это приводит к существованию в канале связи постоянного ВЧ-сигнала. При внутренних к.з. (рис. 95, б) передатчики работают одновременно и в канале связи образуется ВЧ-сигнал с промежутками (скважностями). Орган сравнения фаз – измерительный орган, подключенный к выходу приемника. На выходе приемника появляются импульсы тока, ширина которых соответствует

ширине скважности. Сглаженный импульс поступает в ОСФ и при достаточной его величине вызывает срабатывание органа. После этого через контакты ОСФ и ПО, включенных по схеме «И», выдается сигнал на отключение выключателя.

Выполнение органа манипуляции

С целью сокращения величины обменной информации по каналу связи орган манипуляции выполняется односистемным (один на все три фазы). Для этого его подключают на выход фильтра симметричных составляющих.

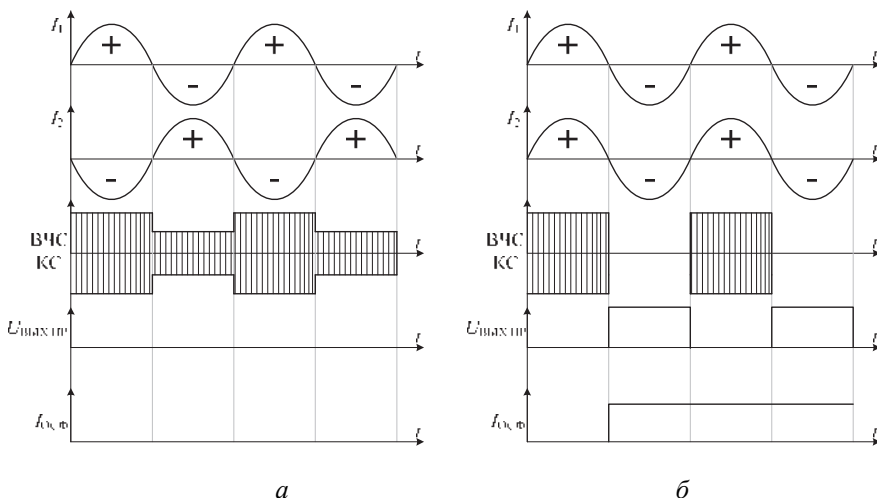
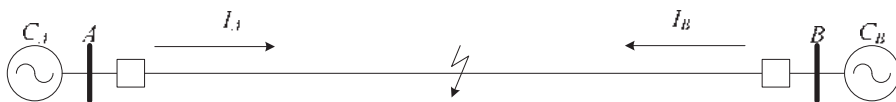


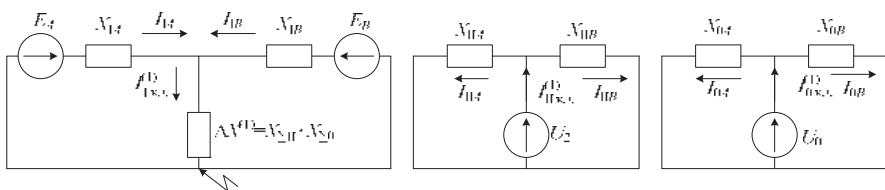
Рис. 95. Измерение фазы токов с помощью ВЧ-сигналов:

a – при внешнем к.з. в точке К2; *б* – при внутреннем к.з. в точке К1

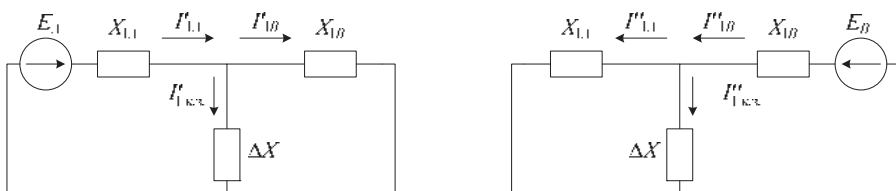
При этом важно выбрать такой фильтр, чтобы он работал при всех видах к.з. Кроме того, необходимо, чтобы при внутреннем к.з. ширина бестоковой паузы была как можно больше (ближе к 180°). Самой универсальной является прямая последовательность, она существует при всех видах к.з. Однако при внутренних к.з. угол сдвига между токами прямой последовательности по концам ВЛ будет зависеть от угла между векторами ЭДС двух систем (а он может достигать вплоть до 90°). Это приведет к уменьшению ширины бестоковой паузы, а значит, к снижению чувствительности ОСФ.



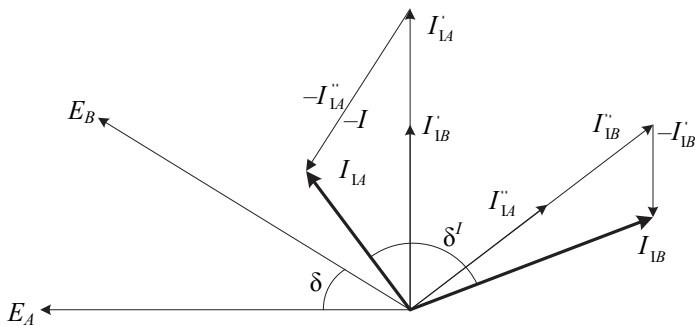
a



б



в



з

Рис. 96. Нахождение угла между векторами прямой последовательности:
а – линия с двусторонним питанием; б – схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности; в – расчет токов методом наложения; з – векторная диаграмма токов прямой последовательности

Посмотрим, как изменится угол между токами прямой последовательности \dot{I}_{AI} и \dot{I}_{BI} при внутреннем несимметричном к.з. (например, однофазном). На рис. 96, а показана схема сети с двусторонним питанием, а на рис. 96, б – схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности при однофазном к.з. на линии. В схему замещения прямой последовательности введено сопротивление $\Delta X^{(1)} = X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}$. Для расчета тока прямой последовательности $I_{I\text{к.з.}}$ воспользуемся методом наложения (рис. 96, в). Для этого найдем токи $I_{I\text{к.з.}}$ дважды при действии \dot{E}_A и \dot{E}_B , а затем их просуммируем. Зададимся углом сдвига между ЭДС систем $\delta < 90^\circ$. Токи прямой последовательности на стороне А: $\dot{I}_{AI} = \dot{I}'_{AI} - \dot{I}''_{AI}$, на стороне В: $\dot{I}_{BI} = \dot{I}'_{BI} - \dot{I}''_{BI}$. Результаты этих построений показаны на векторной диаграмме (рис. 96, г).

Как видно из этой диаграммы, угол между векторами токов прямой последовательности по концам ВЛ δ' оказался намного больше, чем δ . Он даже больше 90° . Это не позволяет обеспечить необходимую чувствительность ОСФ. Из рис. 96, б следует, что идеально в этой ситуации можно использовать фильтр токов обратной последовательности, так как источник I_2 находится в месте к.з. и токи \dot{I}_{AII} и \dot{I}_{BII} совпадают по фазе. Однако в этом случае ОМ не будет работать при трехфазном к.з. Поэтому принято использовать комбинированный фильтр токов прямой и обратной последовательности ($I_1 + KI_2$) с преобладанием обратной последовательности ($K = 4 \dots 10$). Тогда при несимметричных внутренних к.з. передатчики работают практически синхронно (ширина скажности почти 180°), а при трехфазном к.з., когда $\Delta X = 0$, δ' равен углу сдвига фаз ЭДС δ .

Фазовая характеристика защиты

Из предыдущего раздела следует, что при внутренних к.з. скажность может быть шириной уже (меньше) 180° . Этому может способствовать не только сдвиг фаз ЭДС источников, но и угловые погрешности трансформаторов тока и фильтров. Следовательно, ОСФ необходимо делать чувствительными к скажности значительно меньше чем 180° . Но существует и другая проблема – возможность появления скажности при внешних к.з.

Помимо возможных угловых погрешностей ТТ и фильтров к этому приводит и конечная скорость распространения электромагнитных волн. Известно, что она равна $3 \cdot 10^5$ км/с. Это означает, что за один период (0,02 с) электромагнитная волна успевает пройти путь 6000 км, а если учесть, что период составляет 360° , то на каждые 100 км пути фаза тока будет отставать на 6° .

Если произойдет внешнее к.з. вблизи подстанции *A*, то передатчик этой подстанции запустится сразу, а запуск на другом конце произойдет через время, когда волна дойдет до подстанции *B*. Сравнение же фаз произойдет, когда ВЧ-сигнал пройдет обратный путь. Так, при длине линии $L = 200$ км ширина скажности составляет

$$\varphi_{\text{скв}} = 2L6^\circ = 2 \frac{200}{100} 6^\circ = 24^\circ.$$

К увеличению ширины скажности могут привести угловые погрешности ТТ и фильтров. Возникает потребность не допускать срабатывания защиты не только при угле $\varphi = 180^\circ$, но и углах, отличающихся от 180° на некоторый угол, называемый углом блокирования $\beta_{\text{бл}}$. Угол блокирования регулируется изменением уставки ОСФ, что видно из фазовой характеристики защиты (рис. 97).

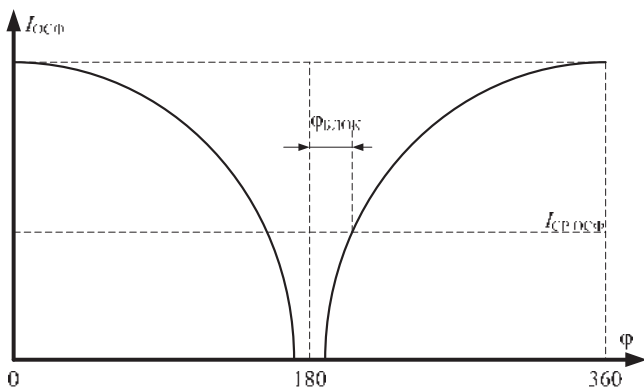


Рис. 97. Фазовая характеристика ДФЗ

Фазовая характеристика – это зависимость тока в ОСФ в функции от угла между сравниваемыми токами по концам линии. В типовых пане-

лях (шкафах) угол блокировки регулируется в диапазоне $45^\circ \dots 60^\circ$. При этом недопустимо, чтобы при внутренних к.з. угол между токами по концам линии φ попал в область блокировки.

Пусковые органы защиты

Задача пусковых органов – запустить передатчики по концам защищаемой линии и подготовить цепи защиты на отключение только в режиме к.з. (т. е. в режиме тревоги). Это позволяет на несколько порядков уменьшить время функционирования защиты, а главное, исключить ее зависимость от токов небаланса при отсутствии к.з., которые как по величине, так и по фазе непрогнозируемы. Защита начинает функционировать только в режиме тревоги, направление токов при этом зависит от места к.з.

Однако при выборе уставок пусковых органов возникает проблема, которую называют «односторонним пуском». Дело в том, что, отстроив параметры срабатывания пусковых органов от рабочего режима, всегда можно представить удаленное к.з. в сети, когда пусковые органы находятся на грани срабатывания. Если же при этом на одном конце (в результате хотя бы небольшой погрешности пусковых органов) он не сработает, а на другом конце сработает, то в канале связи появится ВЧ сигнал со скважностью, и на том конце, где сработал пусковой орган, защита подействует на отключение выключателя.

Для исключения такого явления в ВЧ-защитах пусковые органы дублируют, т. е. выполняют в виде двух комплектов – чувствительные и грубые, разделив между ними функции.

Чувствительные пускают передатчики, поэтому их еще называют блокирующими, грубые готовят цепи на отключение выключателя, поэтому их называют отключающими. Их уставки отличаются в $1,5 \dots 2$ раза. Поэтому, если на каком-то конце ВЛ не сработает чувствительный орган и не запустит передатчик, то на другом конце грубый тем более не сработает и ложного отключения не произойдет даже при наличии скважности в ВЧ-сигнале. И, наоборот, если на каком-то конце сработает грубый орган, то на другом непременно сработает чувствительный, и при внешнем к.з. скважности в ВЧС не будет.

Основными пусковыми органами являются токовые реле, реагирующие на токи обратной последовательности $I_{2\text{ бл}}$ и $I_{2\text{ от}}$. Для повышения чувствительности к однофазным к.з. их дополняют пусковыми органами, реагирующими на ток нулевой последовательности $I_{0\text{ бл}}$

и $I_{0\text{от}}$. При симметричных к.з. в результате кратковременной несимметрии обычно успевает сработать чувствительный орган $I_{2\text{бл}}$ и $I_{0\text{бл}}$. Однако грубый орган $I_{2\text{от}}$, формирующий цепь на отключение, при внезапном симметричном к.з. в результате переходных процессов в фильтре может не сработать. Поэтому для гарантированного пуска защиты при внутренних трехфазных к.з. устанавливается дополнительный отключающий пусковой орган – дистанционный $Z_{\text{от}}$. Существует опасность одностороннего пуска при больших сквозных симметричных токах (трехфазные к.з. и асинхронный режим), когда за счет больших токов небаланса фильтра обратной последовательности на одном из концов линии может сработать пусковой орган $I_{2\text{от}}$. Для исключения ложного срабатывания защиты при этом вводятся еще пусковые органы, реагирующие на ток фазы (или разность токов двух фаз) $I_{\text{Лбл}}$ и $I_{\text{Лот}}$, которые при больших сквозных токах срабатывают на обоих концах и запускают передатчики.

Высокочастотная дифференциально-фазная защита обладает высоким быстродействием. Время ее срабатывания вместе с выходным промежуточным реле не превышает 0,1 с. Она по принципу действия не реагирует на асинхронный режим. Ее срабатывание при внутренних к.з. практически не зависит от возможных неисправностей в цепях напряжения, которые считаются наименее надежными в схемах релейной защиты. На напряжениях 110–220 кВ данная защита нашла широкое применение в виде панели ДФЗ-201.

К недостаткам защиты следует отнести высокую требовательность к точности работы приемопередатчиков и к помехозащищенности. Кроме того, по принципу действия ДФЗ не способна отличить к.з. за трансформаторной отпайкой от к.з. на линии, если она не дополнена еще одним комплектом защиты. В этом случае приходится либо загрублять пусковые органы, что не всегда допустимо, либо дополнять специальными для этого органами.

Микропроцессорный вариант ДФЗ

Фирма «Экра» выпускает шкафы микропроцессорной защиты, реализующие дифференциально-фазный принцип. Это шкафы типа ШЭ2607-082-088. В них сохранена традиционная российская идеология построения ДФЗ, используемая в панелях ДФЗ-201. Различие разных ее модификаций обеспечивается только их адаптацией к разным

схемам первичных соединений распределительных устройств (два выключателя на цепь, двойная система шин с обходной и т. д.). Микропроцессорный вариант позволил несколько усовершенствовать прежнюю схему и устранил ее некоторые недостатки. На рис. 98 показана упрощенная структурная схема защиты шкафа ШЭ2607-082.

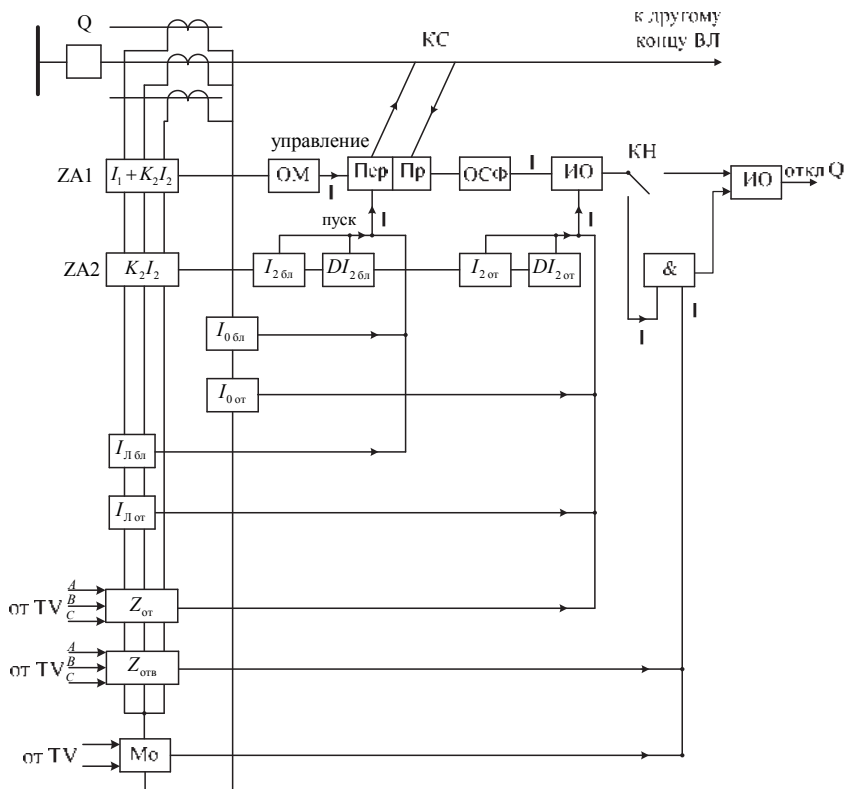


Рис. 98. Упрощенная структурная схема ДФЗ ШЭ2607-082:

ZA1, ZA2 – фильтры токов симметричных составляющих; ОМ – орган манипуляции; ОСФ – орган сравнения фаз; ИО – исполнительный орган, формирующий сигнал на отключение выключателя Q

Пусковые органы $I_{Л бл}$ и $I_{Л от}$ включены на разность токов фаз A и B. Пусковые органы $I_{0 бл}$ и $I_{0 от}$ включены на ток нулевой последо-

вательности. Пусковые органы по току обратной последовательности $I_{2\text{ бл}}$ и $I_{2\text{ от}}$ дополнены пусковыми органами, реагирующими на скорость изменения тока обратной последовательности, — $DI_{2\text{ бл}}$ и $DI_{2\text{ от}}$. Это позволяет увеличить чувствительность пусковых органов при наличии большой несимметрии в нормальном режиме, от которой приходится отстраивать уставки $I_{2\text{ бл}}$ и $I_{2\text{ от}}$. Такое может потребоваться при наличии тяговой нагрузки.

Дистанционный пусковой орган $Z_{\text{от}}$ выполнен в трехфазном исполнении с включением цепей на разность токов и напряжений двух фаз. Накладка КН позволяет вводить цепь отключения с контролем срабатывания дополнительных пусковых органов: реле сопротивления $Z_{\text{отв}}$ и органа направления мощности нулевой последовательности (M_0). Эти измерительные органы вводятся при наличии на линии трансформаторных ответвлений и позволяют отличить к.з. на линии от к.з. за глухой трансформаторной отпайкой. Реле сопротивления $Z_{\text{отв}}$ также выполнено в трехфазном исполнении с включением на разность токов и напряжений фаз. Характеристики реле сопротивления $Z_{\text{от}}$ и $Z_{\text{отв}}$ показаны на рис. 99.

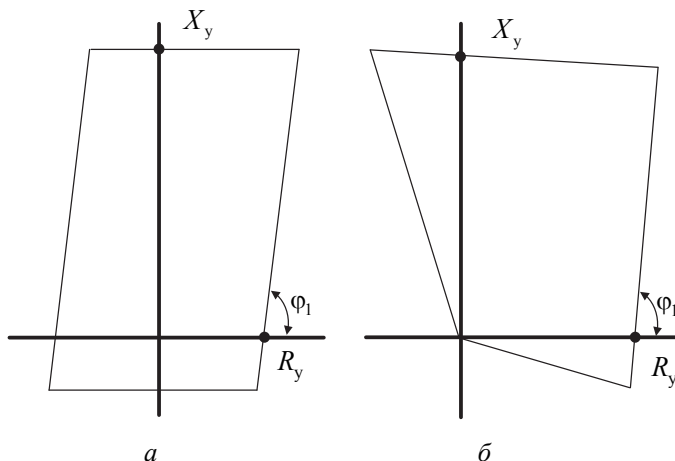


Рис. 99. Характеристики реле сопротивления:

a — пусковых органов $Z_{\text{от}}$; $б$ — органов отстройки от к.з. за ответвлениями $Z_{\text{отв}}$

Уставки обоих реле сопротивления (X_y и R_y) выбираются по условию обеспечения чувствительности при самом удаленном от места установки комплекта междуфазном к.з. на защищаемой линии, в том числе и через дугу. Кроме того, уставка по X органа $Z_{отв}$ должна обеспечить отстройку от к.з. за трансформаторной отпайкой. Форма характеристик этих органов зависит от их назначения. $Z_{от}$ должен почувствовать к.з. в любой точке ВЛ, в том числе и вблизи места установки защиты. Поэтому его характеристика охватывает начало координат. Назначение $Z_{отв}$ – не почувствовать к.з. за трансформаторным ответвлением, значит, его зона контроля находится в удалении от места установки защиты и нет необходимости в ее действиях «за спину» действия. Его чувствительность при близких к.з. обеспечивается работой «по памяти» не менее 0,06 с. Орган M_0 помогает выявить на линии однофазные к.з. Он включает в себя пусковой орган по I_0 , U_0 и собственно мощности нулевой последовательности.

Расчет ДФЗ на базе микропроцессорного шкафа ШЭ 2607-081

Расчет выполняется по методике, изложенной в [П.14]. Расчету подлежат уставки пусковых органов, оценка их чувствительности и выбор коэффициента K комбинированного фильтра тока ($I_1 + KI_2$), к которому подключен орган манипуляции.

Наиболее вероятны в сетях ВН несимметричные короткие замыкания. Поэтому основные пусковые органы подключают к фильтрам токов обратной и нулевой последовательностей. Первичный ток срабатывания блокирующего ПО, реагирующего на ток обратной последовательности, отстраивается от $I_{нб}$ при протекании через комплект максимального рабочего тока:

$$I_{2\text{ бл}} = \frac{K_{отс}}{K_B} (I_{2\text{ нб}} + I_{2\text{ несим}}), \quad (77)$$

где $I_{2\text{ нб}} = K_{нб} I_{\text{раб max}} = (0,02 - 0,03) I_{\text{раб max}}$; $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки; $K_B = 0,9$ – коэффициент возврата реле; $I_{2\text{ несим}}$ – максимальное значение тока обратной последовательности, обусловленной несимметрией в системе.

Вторичный ток срабатывания $I_{2\text{ бл}}^{\text{вт}} = I_{2\text{ бл}} / K_I$.

Диапазон регулирования уставки в шкафу – от $0,05I_{\text{ном}}$ до $0,5I_{\text{ном}}$.

Ток срабатывания отключающего ПО, реагирующего на ток обратной последовательности, согласуется с $I_{2\text{ бл}}$, установленном на другом конце линии:

$$I_{2\text{ от}} = K_3 K_{2\text{ отв}} I_{2\text{ бл}}, \quad (78)$$

где $K_3 = 2$ – коэффициент закругления отключающего ПО; $K_{2\text{ отв}}$ – коэффициент ответвления, учитывающий неравенство токов обратной последовательности в рассматриваемом комплекте и в комплекте, с которым проводится согласование, при внешнем к.з.

$$K_{2\text{ отв}} = \frac{I_{2\text{ защ}}}{I_{2\text{ согл}}}. \quad (79)$$

При отсутствии на линии ответвлений $K_{2\text{ отв}} = 1$.

Аналогично рассчитываются уставки пусковых органов, реагирующих на ток нулевой последовательности $3I_0$. В выражениях (77), (78), (79) параметры, связанные с током обратной последовательности, заменяются на параметры нулевой последовательности.

Отключающие пусковые органы по токам обратной и нулевой последовательности на линиях напряжением 220–330 кВ дополнительно подвергаются проверке на несрабатывание от емкостных токов линии, обусловленных кратковременной несимметрией при включении линии под напряжение:

$$I_{2\text{ от}} \geq K_{\text{отс}} I_{2C}, \quad (80)$$

$$I_{0\text{ от}} \geq K_{\text{отс}} 3I_{0C}, \quad (81)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,7 \dots 2,0$ – коэффициент отстройки; $I_{2C}, 3I_{0C}$ – емкостные токи линии при неполнофазном включении (их удельные значения задаются в руководящих указаниях по релейной защите).

Токи срабатывания пусковых органов, реагирующих на линейные токи, выбираются по выражениям:

$$I_{\text{Л бл}} = \sqrt{3} \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{в}}} I_{\text{раб max}}; \quad (82)$$

$$I_{\text{Л от}} = K_3 K_{\text{отв}} I_{\text{Л бл}}, \quad (83)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$; $K_{\text{в}} = 0,9$; $K_3 = 2$; $I_{\text{Л бл}}$ – ток срабатывания блокирующего органа на противоположном месте установки комплекта конце линии; $K_{\text{отв}} = I_{2 \text{ защ}} / I_{2 \text{ согл}}$ – коэффициент ответвления.

Чувствительность отключающих токовых пусковых органов проверяется при к.з. на шинах со стороны противоположного месту установки комплекта конца линии. Для линейных органов рассматривается трехфазное к.з., сопровождающееся минимальным током через комплект защиты. Для $I_{2 \text{ от}}$ и $I_{0 \text{ от}}$ за расчетные принимаются однофазные и двухфазные к.з. на землю. Минимальное значение коэффициента чувствительности допускается равным примерно 2.

Дистанционные ПО рассчитываются исходя из обеспечения гарантированного коэффициента чувствительности по осям X и R при к.з. на самом удаленном от места установки комплекта конце линии (аналогично расчету уставок третьей ступени дистанционной защиты).

Параметры срабатывания пусковых органов, реагирующих на скорости изменения тока DI_2 и DI_1 , в сетях с тяговой нагрузкой выбираются в процессе наладки защиты и ее опытной эксплуатации.

Коэффициент K комбинированного фильтра прямой и обратной последовательности выбирается исходя из требования осуществить при несимметричных к.з. преимущественное сравнение фаз токов обратной последовательности. Это условие реализуется по выражению

$$K \geq K_{\text{отс}} \frac{I_{1 \text{ расч}}}{I_{2 \text{ расч}}}, \quad (84)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,5$ – коэффициент отстройки; $I_{1 \text{ расч}}$ и $I_{2 \text{ расч}}$ – расчетные токи прямой и обратной последовательности при несимметричном к.з. на противоположном конце линии. В качестве расчетных рассматриваются двухфазные и однофазные к.з. на землю, дающие наибольшее значение K .

Кроме того, контролируется соотношение тока нагрузки и накладываемого на него тока I_2 при однофазном к.з.:

$$K \geq K_{\text{отс}} \frac{I_{\text{нагр}}}{I_{2 \text{ расч}}}, \quad (85)$$

где $I_{\text{нагр}}$ – наибольший нагрузочный ток, протекающий через комплект защиты; $I_{2 \text{ расч}}$ – ток обратной последовательности (минимально возможный), протекающий через комплект защиты при однофазном к.з. на противоположном конце линии; $K_{\text{отс}} = 1,5$.

Диапазон регулирования K – от 4 до 10.

4.3.2. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

Принцип действия ВЧ НЗ

Принцип действия защиты основан на сравнении направления мощности по концам защищаемого участка. При внутренних к.з. мощность направлена на всех питающих концах линии от шин в линию. По этому фактору в режиме тревоги формируются сигналы на отключение выключателей. При внешнем к.з. на одном из концов мощность течет от линии к шинам. На этом конце формируется высокочастотный сигнал, который поступает на питающие концы, предотвращая срабатывание комплектов.

Существует два способа реализации данного принципа:

- по схеме «пуск-останов»;
- по схеме «направленный пуск».

В первой схеме (рис. 100) пуск передатчика осуществляется ненаправленным пусковым блокирующим органом в режиме тревоги, а остановка – органом направления мощности (ОНМ), устанавливающим факт направления мощности от шин в линию. Сигнал на отключение выключателя формируется реагирующим органом (РО) по факту срабатывания отключающего ПО и отсутствия блокирующего ВЧ-сигнала в канале связи (на всех концах ВЛ передатчики остановлены ОНМ). Пусковые органы дублируются с целью предотвращения одно-стороннего пуска.

В схеме «направленный пуск» (рис. 101) блокирующий пусковой орган $\text{ПО}_{\text{бл}}$ выполнен направленным в сторону линия–шины, следовательно, пуск передатчика осуществляется только при к.з. «за спиной». Сигнал на отключение выключателя формируется РО по команде отключающего пускового органа $\text{ПО}_{\text{от}}$ при отсутствии блокирующего ВЧ-сигнала в канале связи. Отключающий ПО может быть как направленным в сторону от шин в линию, так и не направленным.

Первая схема обеспечивает несколько большую надежность несрабатывания при внешнем к.з., вторая схема – большее быстродействие при внутренних к.з., так как не требует операции остановки передатчика.

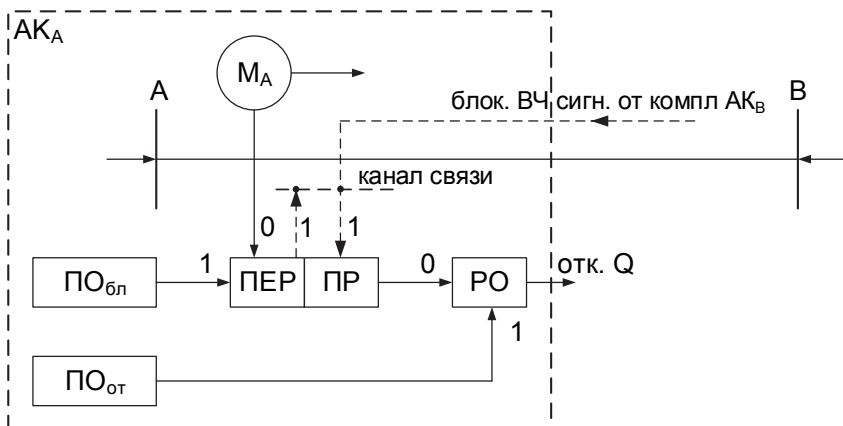


Рис. 100. Построение ВЧ НЗ по схеме «пуск-останов»

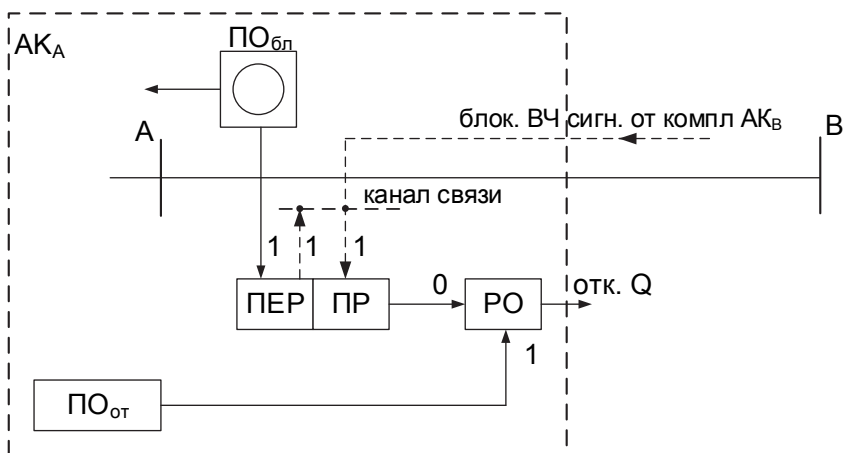


Рис. 101. Построение ВЧНЗ по схеме «направленный пуск»

Типовая схема ВЧ НЗ

Типовая панель данной защиты ПДЭ-2802 [п5] появилась при переходе на защиты, выполненные на микроэлектронике, как альтернатива ранее применяемым панелям ДФЗ-201. В своем составе она имеет измерительные органы, способные отличить к.з. за глухими трансформаторными отпайками, не обрабатывая их комплектами защиты. Позже при переходе на микропроцессорные защиты фирма «Экра» выпу-

стила практически эквивалент панели ПДЭ-2802 шкафа ШЭ2607-031. Рассмотрим принцип действия ВЧ НЗ на примере панели ПДЭ-2802 (рис. 102).

Панель содержит в своем составе две независимые ВЧ НЗ: фильтровую обратной последовательности, реагирующую на несимметричные

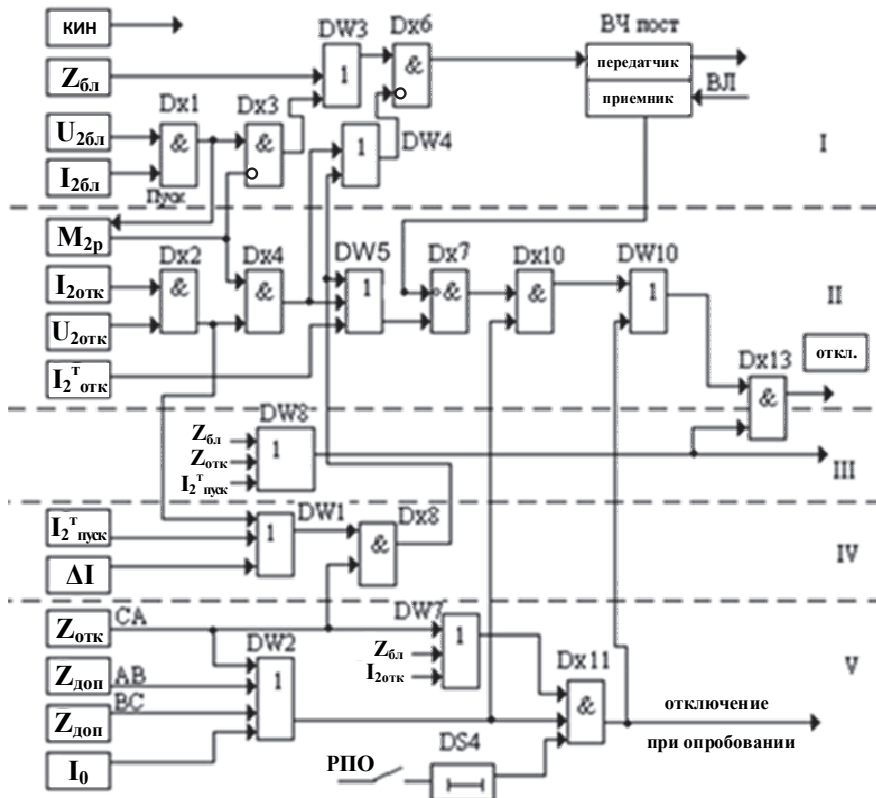


Рис. 102. Упрощенная функциональная схема панели ПДЭ-2802:

I – канал пуска ВЧ-сигнала, служащий для блокировки защиты при внешнем к.з.; II – основной канал отключения, предназначенный для воздействия на выходные цепи защиты, пуск сигнала телеотключения; III – дополнительный канал отключения, служащий для функционального контроля основного канала отключения; IV – устройство блокировки при качаниях; V – блок отстройки от к.з. за трансформатором на ответвлениях и защиты при опробовании (блок отстройки и опробования)

к.з., и дистанционную направленную, с ВЧ-блокировкой, работающую при симметричных к.з. Фильтровая ВЧ-защита имеет комбинированные по току и напряжению обратной последовательности пусковые органы: блокирующий ($U_{2\text{ бл}}$ и $I_{2\text{ бл}}$) и отключающий ($U_{2\text{ от}}$ и $I_{2\text{ от}}$). Пуск обеспечивается при одновременном срабатывании пускового органа по току и пускового органа по напряжению. Это позволяет повысить их чувствительность, так как уставки не отстраиваются от небалансов фильтров в симметричных режимах, сопровождающихся большим током (внешнее трехфазное к.з., режим самозапуска, асинхронный режим и др). В этих режимах максимальные значения (расчетные) тока и напряжения не появляются одновременно. Это позволяет за расчетный режим при определении небалансов фильтров I_2 и U_2 принимать не «экстремальные» значения, а величины токов и напряжений в нормальном рабочем режиме.

Данная защита выполнена по схеме «пуск-останов». Блокирующий (чувствительный) пусковой орган через элемент логики DX3 действует на пуск передатчика и реле мощности M_2 . После срабатывания M_2 осуществляется останов передатчика.

Срабатывание отключающего ПО ($U_{2\text{ от}}$ и $I_{2\text{ от}}$) и M_2 на элементе DX4 формирует сигнал в основном канале отключения. Этот сигнал блокируется на элементе DX7 при поступлении блокирующего импульса с выхода приемника ВЧ.

Отказ фильтровой ВЧЗ может произойти при к.з. вблизи шин противоположного конца линии из-за малой величины U_2 в месте установки комплекта, если за его спиной находится мощная энергосистема (с малым сопротивлением). При этом отключающий комбинированный ПО не срабатывает (откажет $U_{2\text{ от}}$). Для устранения этого недостатка в панели ПДЭ-2802 используется дополнительный пусковой орган по току обратной последовательности с торможением $I_{2\text{ от}}^T$. Этот орган не контролирует U_2 , следовательно, его ток срабатывания должен быть отстроен от тока небаланса при экстремально возможных сквозных токах. Поэтому для отстройки от них в этом органе используется принцип торможения от токов фаз. Характеристика срабатывания реле тока обратной последовательности с торможением показана на рис. 103.

Селективность органа с торможением при к.з. за пределами защищаемой линии обеспечивается согласованием начального значения

тока срабатывания $I_{2\text{от нач}}^T$ с током и напряжением срабатывания блокирующих ПО с противоположных сторон линии:

$$I_{2\text{от нач}}^T \geq I_{2\text{бл}}, \quad I_{2\text{от нач}}^T \geq \frac{U_{2\text{бл}}}{Z_{\text{Л}}}.$$

Это гарантирует, что при срабатывании $I_{2\text{от}}^T$ при к.з. за пределами линии в канале связи будет присутствовать блокирующей ВЧ-сигнал и отключения не произойдет.

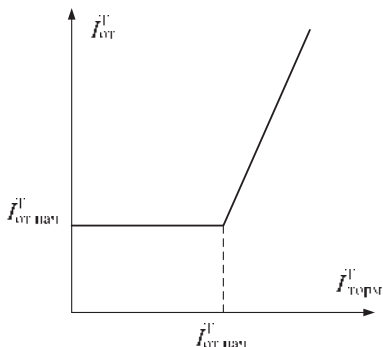


Рис. 103. Характеристики срабатывания реле $I_{2\text{от}}^T$

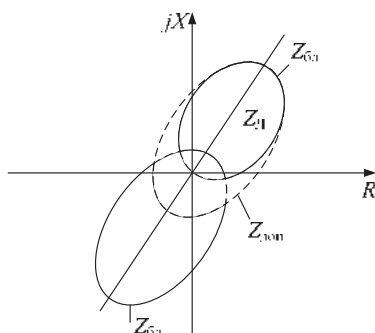


Рис. 104. Характеристики срабатывания дистанционных ПО

Дистанционная направленная защита с ВЧ-блокировкой используется от симметричных к.з. и выполнена на базе двух направленных реле сопротивления (рис. 104), имеющих эллиптические характеристики срабатывания, включенные на разность напряжений и токов фаз *C* и *A*.

Характеристика отключающего органа находится в первом квадранте и надежно перекрывает защищаемую линию. Характеристика блокирующего органа размещена в основном в третьем квадранте и охватывает начало линии. Защита выполнена по схеме «направленный пуск» (рис. 104). Блокирующий орган $Z_{\text{бл}}$ срабатывает при к.з. «за спиной» и через логический орган DW3 запускает передатчик. Отключающий орган срабатывает при к.з. на защищаемой линии и через элементы DX8 и DW5 выдает сигнал в основной канал отключения. Через элемент «И» DX8 вводится разрешение на работу от блокировки от качания (DW1). При к.з. в начале линии может сработать и блокирую-

щий орган $Z_{\text{бл}}$ и выдать сигнал на пуск передатчика. Но при этом срабатывает и отключающий орган $Z_{\text{от}}$ и через DW4 и DX6 обеспечит останов передатчика, т. е. при близких к.з. защита работает по схеме «пуск-останов» (см. рис. 100).

Дистанционный пусковой орган $Z_{\text{от}}$ используется для отстройки ВЧ НЗ от к.з. за маломощными трансформаторными отпайками. Для этого его сопротивление срабатывания отстраивается от к.з. за этими трансформаторами. Для исключения неселективного срабатывания фильтровой защиты от этих режимов в канал отключения введен логический элемент «И» DX10, который пропускает сигнал на отключение только в случае срабатывания $Z_{\text{от}}$ (далее сигнал идет по цепи DW2–DX10). Однако при этом необходимо использовать еще два реле сопротивления $Z_{\text{доп АВ}}$ и $Z_{\text{доп ВС}}$ для того, чтобы разрешение на отключение проходило при любых двухфазных к.з. Для того чтобы почувствовать однофазное к.з., используется измерительный орган, реагирующий на ток нулевой последовательности I_0 .

В режиме опробования (ручного или от АПВ) предусматривается возможность подачи импульса на отключение от дистанционного ПО, I_0 и $I_{2\text{от}}^T$ вне зависимости от наличия блокирующего сигнала в канале связи. Это связано с тем, что при одновременном включении фаз выключателя может ложно сработать ОНМ M_2 и запустить блокирующий ВЧС, что приведет к задержке отключения по основному каналу отключения. Пятый канал формирует сигнал на отключение в течение 0,7...1,5 с после подачи команды на включение Q (ПП0, DS4).

Для исключения ложного срабатывания защиты в случае неисправности какого-либо элемента, приводящего к появлению сигнала в отключающем канале, в защите осуществлен функциональный контроль на базе элемента DX13. На этот элемент выдается сигнал с DW8, непосредственно фиксирующего срабатывание пусковых органов.

При внедрении защит на микроэлектронной элементной базе институтом «Энергосетьпроект» были разработаны рекомендации по расчету и выбору параметров защит ВЛ 110–750 кВ [11]. Расчету подлежат уставки всех пусковых органов и оценка их чувствительности.

При переходе на микропроцессорные защиты фирма «Экра» освоила выпуск шкафа направленной защиты с ВЧ-блокировкой ШЭ2607-031, в котором полностью повторены идеология и структура ПДЭ-2802.

Существенным отличием шкафа является то, что вместо эллиптических характеристик дистанционные пусковые органы имеют характеристики в виде параллелограмма типа REL (рис. 105). Это не только улучшило их функционирование, но и значительно облегчило расчет, сведя его к расчету уставок по осям X и R , как при расчете дистанционных защит.

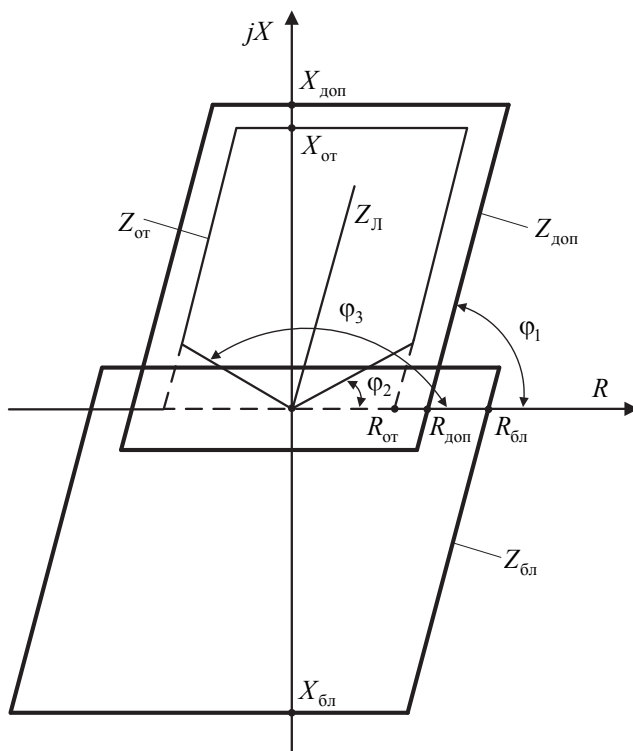


Рис. 105. Характеристики срабатывания дистанционных пусковых органов шкафа ШЭ2607-031

Уставка по оси X отключающего органа может быть выбрана по условию чувствительности к к.з. на противоположном конце линии и нечувствительности к к.з. за трансформатор отпайки.

Уставка по оси вещественных чисел выбирается по условиям чувствительности к дуговому к.з. и отстройки от режима нагрузки. Если

второе условие входит в противоречие с первым, имеется возможность отстроиться от рабочего режима посредством изменения угла φ_2 .

Согласование отключающего реле сопротивления с блокирующим на противоположном конце проиллюстрировано на рис. 106.

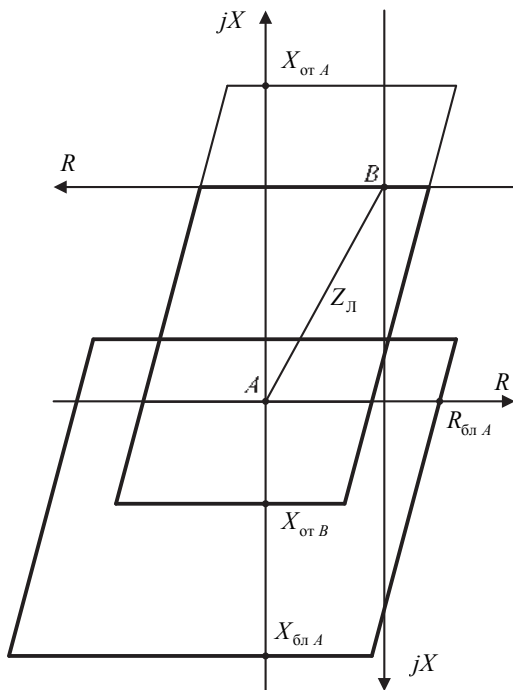


Рис. 106. Согласование отключающего дистанционного органа с блокирующим органом противоположного конца

Применительно к двухконцевой линии выражение согласования по оси X приобретает вид:

$$X_{сз \text{ бл } A} \geq k_{отс} (X_{сз \text{ отп } B} k'_{отс} - X_{Л}).$$

Порядок и пример расчета уставок ВЧНЗ на базе шкафа ШЭ 2607-031 приведены в [п3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее пособие, как и другие разработки кафедры электрических станций НГТУ, перечень которых приведен в приложении, ориентировано на расчет защит, выполненных в микропроцессорном варианте чебоксарским предприятием ОАО «Экра». Однако, как показал опыт работы выпускников последних лет, это не является для них препятствием к освоению устройств, выпускаемых другими производителями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Правила устройства электроустановок.* – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. *Федосеев А.М., Федосеев М.А.* Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. *Гельфанд Я.С.* Релейная защита распределительных сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. *Чернобровов Н.В., Семенов В.А.* Релейная защита электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. *Руководящие указания по релейной защите. Вып.7.* Дистанционные защиты линий 35–330 кВ. – М.: Энергия, 1966.
6. *Руководящие указания по релейной защите. Вып.8.* Поперечная дифференциальная защита линий (35–220 кВ). – М.: Энергия, 1970.
7. *Руководящие указания по релейной защите. Вып.11.* Расчеты токов КЗ для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979.
8. *Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12.* Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980.
9. *Шкафы защит линий и автоматика управления линейных выключателей типов ШЭ 2607.* Руководство по эксплуатации / НПП «Экра», 2005.
10. *Разработка рекомендаций по расчету и выбору защит на микроэлектронной элементной базе ВЛ 110–750 кВ:* отчет института «Энергосетьпроект». – М., № 11735 ТМ-Т1–1985.
11. *ОАО «Энергосетьпроект».* Методические указания по расчету и выбору уставок микропроцессорных защит ВЛ 110–220 (330) кВ от всех видов КЗ типов REL 511. Этап II и III. – М., 2000.
12. *Циглер Г.* Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 322 с.
13. *Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО НПП «Экра».* – ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
14. *Циглер Г.* Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения / под ред. чл. корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005.
15. *Рекомендации по выбору уставок продольной дифференциальной защиты линии электропередачи типа ШЭ2607 091-093.* ЭКРА.656453.126-03. – Чебоксары: ООО НПП «Экра».
16. *Шкаф дифференциальной защиты линии типа ШЭ2607 091.* Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.126 РЭ. – Чебоксары: ООО НПП «Экра», 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список учебных пособий и методических указаний, рекомендуемых к использованию при изучении курса «Релейная защита электрических сетей».

п1. № 3401. Щеглов А.И. Релейная защита электрических сетей. МУ к КП для студентов 4 курса. 2007.

п2. № 3235. Багинский Л.В., Давыдов В.А., Щеглов А.И. Расчет направленной токовой защиты нулевой последовательности двухцепной высоковольтной линии напряжением 220 кВ. МУ для студентов 4–5 курсов. 2006.

п3. № 3621. Давыдов В.А., Щеглов А.И. Рекомендации по расчету направленной высокочастотной защиты линий (ВЧНЗ) типа ШЭ 2607 031. МУ к курсовому и дипломному проектированию для студентов 4–5 курсов. 2009.

п4. № 3076. Щеглов А.И., Трофимов А.С. Испытание токовой защиты нулевой последовательности в сети с малыми токами замыкания на землю. МУ к ЛР для студентов 4–5 курсов. 2006.

п5. № 2145. Щеглов А.И. Испытание направленной высокочастотной защиты ПДЭ-2802. МУ к ЛР для студентов 5 курса. 2001.

п6. № 2489. Давыдов В.А., Щеглов А.И. Испытание статических реле, реагирующих на две электрические величины. МУ к ЛР для студентов 4–5 курсов. 2003.

п7. № 1657. Щеглов А.И., Ерушин В.П., Быкова Л.Б. Дистанционные защиты. МУ к ЛР № 1–3 для студентов 4–5 курсов. 1998.

п8. № 3329. Тимофеев И.П. Испытание микропроцессорного устройства защиты электродвигателей. МУ к ЛР для студентов 4–5 курсов. 2007.

п9. Багинский Л.В. Релейная защита электрических сетей от междофазных коротких замыканий: учеб. пособие. 2003.

п10. Багинский Л.В. Быстродействующие защиты линий высокого и сверхвысокого напряжений: учеб. пособие. 2004.

п11. Багинский Л.В. Релейная защита сетей с эффективно заземленной нейтралью от коротких замыканий на землю: учеб. пособие. 2004.

п12. Багинский Л.В. Основные особенности продольных дифференциальных защит электрооборудования электростанций и подстанций: учеб. пособие. 2005.

п13. № 4161 Давыдов В.А., Щеглов А.И. Расчет дистанционных защит линии электропередач. МУ по курсу «Релейная защита электрических сетей». Новосибирск, 2012.

п14. № 4258 Давыдов В.А., Щеглов А.И. «Расчет высокочастотной дифференциально-фазной защиты линии электропередач». МУ по курсу «Релейная защита электрических сетей». Новосибирск, 2013.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Токовые защиты ВЛ от междуфазных коротких замыканий	4
1.1. Виды повреждений и типы защит высоковольтных линий	4
1.2. Критерий выбора типа защиты высоковольтных линий	5
1.3. Направленные токовые защиты.....	6
1.4. Особенности применения токовых защит от междуфазных к.з. в сетях 110 – 220 кВ.....	17
2. Дистанционные защиты ЛЭП	24
2.1. Характеристики срабатывания реле сопротивления	24
2.2. Характеристики срабатывания реле сопротивления шкафов ШЭ2607-011(021) фирмы «ЭКРА».....	27
2.3. Расчет уставок ступеней реле сопротивления типа REL [П.13]	29
2.4. Схемы включения реле сопротивления	42
2.5. Ток точной работы.....	48
2.6. Поведение ДЗ при качаниях и асинхронном режиме	49
3. Токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП).....	57
3.1. Преимущества токовых защит нулевой последовательности в сетях с эффективно заземленной нейтралью перед защитами, реагирующими на токи фаз.....	57
3.2. Особенности расчета уставок ТНЗНП	60
3.3. Влияние вида к.з. на величину тока нулевой последовательности	62
3.4. Расчет тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности	63
3.5. Расчет токов срабатывания ступеней ТНЗНП для одноцепных ВЛ с двусторонним питанием	65
3.6. Расчет ТНЗНП при наличии двухцепных линий с взаимоиндукцией.....	73
3.7. Особенности расчета ТНЗНП распределительной сети	83

3.8. Применение органов направления мощности в ТНЗНП	87
3.9. Поперечная направленная защита нулевой последовательности	93
4. Быстродействующие защиты линий высокого напряжения	97
4.1. Продольная дифференциальная защита высоковольтных линий	97
4.2. Поперечная дифференциальная направленная защита линий	107
4.3. Высокочастотные защиты	116
Заключение	138
Библиографический список	139
Приложение	140

**Щеглов Анатолий Иванович
Белоглазов Алексей Владимирович**

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 21.04.2015. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 8,37. Печ. л. 9,0. Изд. № 330/14. Заказ № 745. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20