

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ
И ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК ЛИНИЙ 6, 10, 35 кВ**

Задания для контрольной работы и
методические указания к выполнению практических занятий
по курсу «Релейная защита систем электроснабжения»
для студентов направления 140200 (специальность 140211)

Курган 2007

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Релейная защита систем электроснабжения»
(специальность 140211)

Составил: доцент Шестаков Д.Н.

Утверждены на заседании кафедры «31» августа 2006 г.

Рекомендованы методическим советом университета
«____» _____ 2007 г.

1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ

1.1. Общие сведения о токовых защитах

Защита от коротких замыканий (КЗ) линий 6 и 10 кВ распределительных сетей осуществляется преимущественно с помощью максимальных токовых защит.

В соответствии с применяемыми типами реле максимальные токовые защиты могут иметь независимое от тока время срабатывания (реле тока типа РТ-40 и реле времени типа РВ или РВМ) или наоборот зависимое от тока время срабатывания (реле тока типов РТ-80, РТ-90, РТВ).

Последние имеют ограниченно зависимую характеристику $t_p=f(I_p)$, причем переход на независимую часть характеристики происходит у разных типов реле при различных кратностях тока I_p по отношению к току срабатывания реле $I_{с.р.}$. Сокращенно называют эти защиты с зависимой (рис. 1) или независимой (рис. 2) характеристикой.

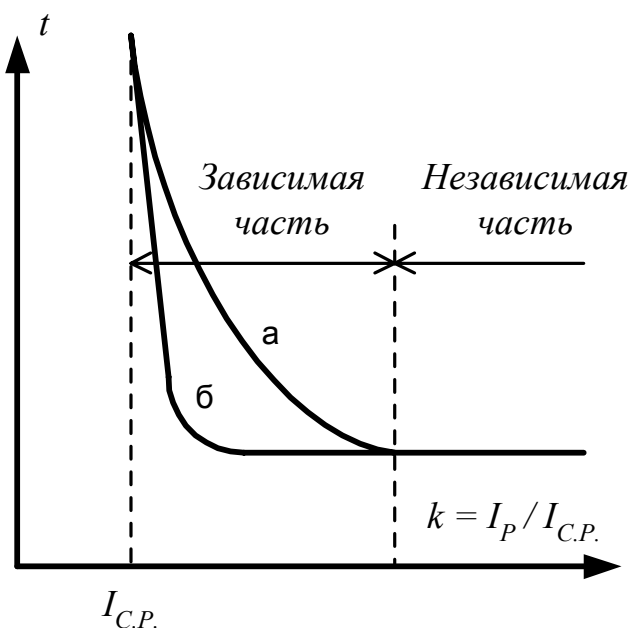


Рис. 1. Зависимые от тока характеристики срабатывания максимальной токовой защиты с реле типа РТ-80 (а) и РТВ-1 (б)

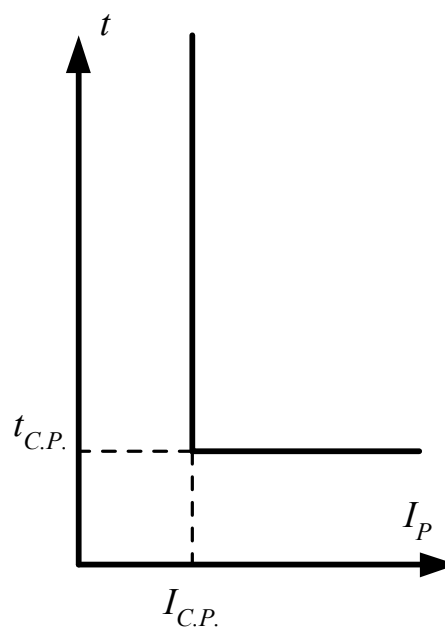


Рис. 2. Независимая от тока характеристика срабатывания максимальной токовой защиты

Расчет максимальной токовой защиты заключается в выборе тока срабатывания защиты (первичного); тока срабатывания реле (для принятой схемы защиты и типа реле); времени срабатывания защиты (с независимой характеристикой) или характеристики срабатывания токовых реле (для защиты с зависимой характеристикой).

1.2. Выбор тока срабатывания

Уставки по току максимальной токовой защиты должны обеспечивать:

- несрабатывание защиты на отключение защищаемой линии при послеаварийных перегрузках;
- согласование действия (по току и по времени) с защитами питающих («последующих») и отходящих («предыдущих») элементов;
- необходимую чувствительность при всех видах КЗ в основной защищаемой зоне и в зоне резервирования;

1. Для обеспечения условия несрабатывания на отключение при послеаварийных перегрузках следует рассмотреть все возможные послеаварийные режимы.

а) отключение с выдержкой времени близкого трехфазного КЗ на отходящем элементе (Л2 на рис. 3). В момент КЗ одновременно срабатывают токовые реле защит 2 и 1, но из-за разного времени действия прежде срабатывает защита 2. Ток, проходящий через защиту 1 после отключения КЗ, может оказаться значительно большим, чем перед аварией. Это объясняется тем, что двигатели нагрузки Н подстанции 2, затормозившиеся или остановившиеся во время снижения напряжения при КЗ, начинают разворачиваться после восстановления напряжения. Такой процесс называется самозапуском, а коэффициент, показывающий во сколько раз при этом может увеличиться рабочий ток предаварийного режима питающего элемента (Л1 на рис.3), называется коэффициентом самозапуска ($k_{сзп}$).

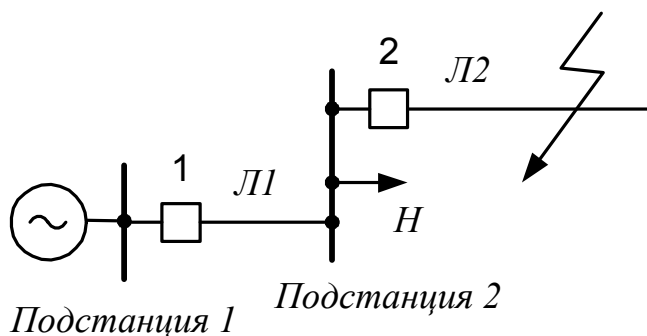


Рис. 3. Схема сети с односторонним питанием и одиночными линиями (1 и 2 – защиты линий; Н – нагрузка)

Процесс самозапуска может продолжаться 10-15 с, поэтому нецелесообразно обеспечивать несрабатывание защиты 1 путем увеличения ее времени действия.

Несрабатывание максимальной защиты на отключение достигается выбором тока возврата токовых реле, большим, чем наибольший ток в режиме самозапуска. Обозначив отношение тока возврата к току срабатывания реле

коэффициентом k_b , получаем выражения для выбора тока срабатывание максимальной защиты:

$$I_{с.з} \geq \frac{k_n \cdot k_{сзп}}{k_b} I_{раб.макс}, \quad (1)$$

где k_n – коэффициент надежности, учитывающий погрешность реле и необходимый запас, в зависимости от типа реле может приниматься равным 1,1 – 1,2 (реле РТ-40, РТ-80, РТ-90) или 1,2 – 1,4 (реле РТВ);

k_b – коэффициент возврата реле, в зависимости от типа реле может составлять 0,8 – 0,85 (реле РТ-40, РТ-80, РТ-90) или 0,6 – 0,7 (реле РТВ);

$k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска, значение которого зависит от вида нагрузки и ее параметров, от схемы и параметров питающей сети, от выбранных параметров срабатывания защиты и автоматики;

$I_{раб.макс}$ – максимальный рабочий ток (ток нагрузки) защищаемого элемента, значение которого определяется в конкретных условиях главным образом в зависимости от вида защищаемого элемента (воздушная линия, кабельная линия и т.п.) и возможных режимов его работы.

Определение $k_{сзп}$ и $I_{раб.макс}$ в различных условиях и для разных категорий нагрузки производится индивидуально для разных случаев.

б) отключение параллельно работающего элемента. Наиболее тяжелым случаем является отключение с выдержкой времени тока КЗ на одном из двух параллельно работающих элементов (рис. 4). Ток срабатывания максимальных защит 1 и 2 должен выбираться по выражению (1), в котором значение $I_{раб. макс}$ принимается с учетом максимально допустимой перегрузки оставшегося в работе элемента. В зависимости от вида защищаемого элемента перегрузка допускается в пределах 20 – 40% номинального тока. Такая же перегрузка может допускаться и при кратковременном ремонте одного из двух параллельно работающих элементов. В некоторых случаях может допускаться и более значительная перегрузка на непродолжительное время.

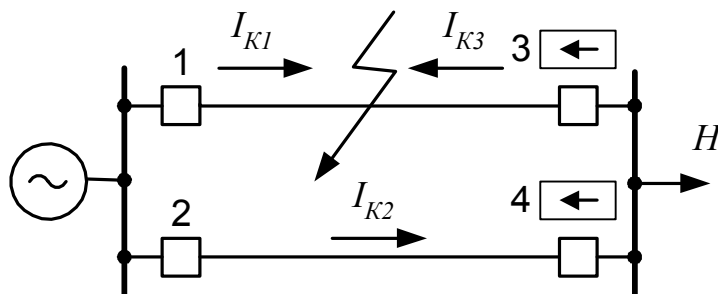


Рис. 4. Схема сети с односторонним питанием и параллельными линиями (1 и 2 – ненаправленные защиты линий; 3 и 4 – направленные защиты линий; Н – нагрузка)

2. Условие согласования защит по чувствительности (по току).

Правило согласования защит по чувствительности требует, чтобы защита, расположенная ближе к источнику питания (последующая), была менее чувствительна, чем защита, расположенная дальше от источника питания (предыдущая). Соблюдение этого условия обеспечивает селективную работу последующей защиты при КЗ в зоне действия предыдущей защиты, когда токи КЗ близки по значению к токам срабатывания защит.

При согласовании защит по чувствительности необходимо учитывать возможность существенного влияния токов нагрузки, имея в виду, что при удаленных КЗ на одном из предыдущих элементов (Л2) напряжение на шинах (подстанции 2) может сохраняться близким к нормальному. При этом через питающий элемент (Л1) будет проходить геометрическая сумма тока КЗ \dot{I}_k поврежденного элемента (Л2) и токов нагрузки $\dot{I}_{раб}$ остальных неповрежденных элементов (рис. 5).

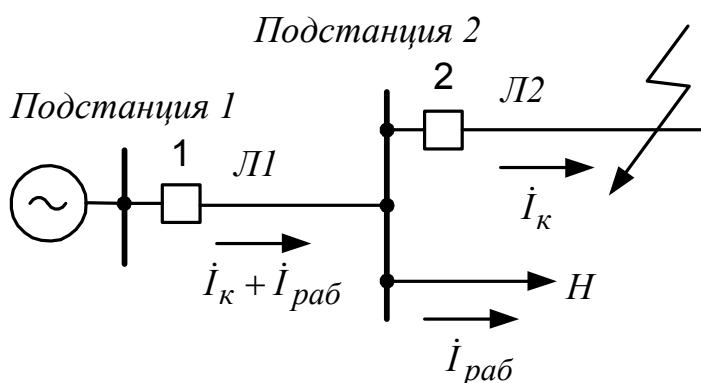


Рис. 5. Токораспределение при удаленном КЗ в сети с односторонним питанием (1 – последующая защита; 2 – предыдущая защита)

В распределительных сетях 6 и 10 кВ соотношения индуктивного (x) и активного (r) сопротивлений линий таковы, что углы между напряжением и током при КЗ ($\varphi_k = \varphi_n$) близки углам между напряжением и током в нормальном режиме нагрузки ($\varphi_{раб}$). Поэтому при расчетах максимальных защит в распределительных сетях допустимо токи КЗ (I_k) и токи нагрузки ($I_{раб}$) складывать арифметически.

Возможные погрешности (в пределах до 10%) могут только улучшить условия согласования.

Таким образом, с учетом токов нагрузки условие согласования по чувствительности для последующей максимальной токовой защиты имеет вид:

$$I_{с.з.посл} \geq \frac{k_{н.с}}{k_p} \left[(n \cdot I_{с.з.пред})_{макс} + \sum_1^{N-n} I_{раб.макс}(N-n) \right], \quad (2)$$

где $k_{н.с}$ – коэффициент надежности согласования, значение которого зависит от точности работы реле и трансформаторов тока, точности настройки реле (рекомендуемые значения приведены в табл. 1);

k_p – коэффициент токораспределения, учитывается при наличии нескольких источников питания, при одном источнике питания равен 1;

$(n \cdot I_{с.з.пред})_{\max}$ – наибольшее из произведений числа (n) параллельно работающих элементов (предыдущих) и тока срабатывания их защит (одинакового для каждого из них, рис. 6);

$I_{\text{раб. макс}(N-n)}$ – геометрическая сумма максимальных рабочих токов всех предыдущих элементов подстанции, за исключением тех, с защитами которых производится согласование; при однородной нагрузке допустимо арифметическое сложение рабочих токов (нагрузки), что создает некоторый расчетный запас.

Поясним сказанное примером (рис. 6). Токи срабатывания максимальных защит элементов подстанции 2 следующие: 2 – 1500 А; 3, 4 – по 1000 А у каждой защиты; 5, 6, 7 – по 600 А у каждой защиты. Наибольшим из произведений $n \cdot I_{с.з.пред}$ оказывается 2000 А, которое и должно быть принято для подстановки в выражение (2) при выборе тока срабатывания защиты 1 (последующей).

Таблица 1

Рекомендуемые значения $k_{н.с}$ для расчета максимальной токовой защиты линий 6 – 35 кВ распределительных сетей

Тип реле последующей защиты	Тип реле предыдущей защиты	$k_{н.с}$
РТ-40	РТ-40	1,25
	РТ-80	1,3
	РТВ	1,4
РТ-80	РТ-40	1,3
	РТ-80	1,3
	РТВ	1,4
РТВ	РТ-40	1,4
	РТ-80	1,4
	РТВ	1,5

Примечание. Для защит с реле РТ-40 линий 110 кВ $k_{н.с} = 1,1 - 1,2$.

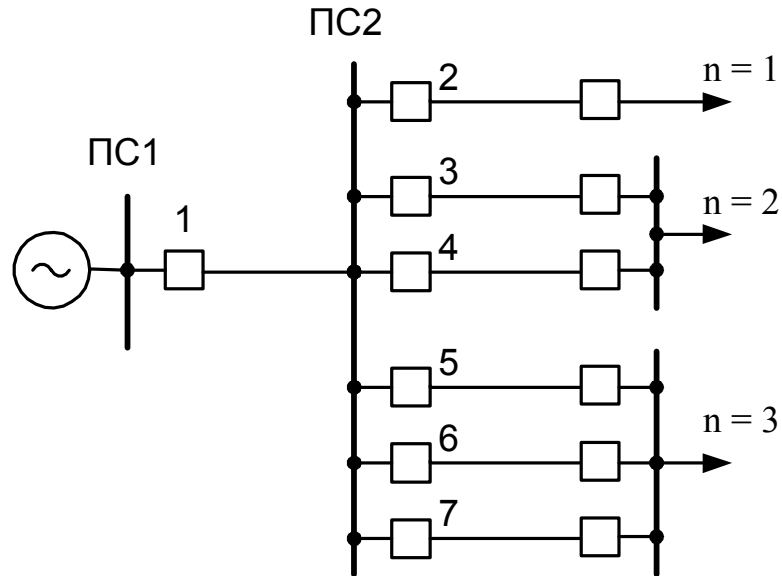


Рис. 6. Схема с параллельно работающими предыдущими элементами (2 – 7)

Если параллельно работающие предыдущие элементы (n) имеют разные токи срабатывания, то выражение (2) имеет вид:

$$I_{с.з.посл} \geq \frac{k_{н.с}}{k_p} \left[\sum_1^n I_{с.з.пред.макс}(n) + \sum_1^{N-n} I_{раб.макс}(N-n) \right], \quad (3)$$

где $\sum_1^n I_{с.з.пред.макс}(n)$ – наибольшая из геометрических сумм токов

срабатывания максимальных защит параллельно работающих предыдущих элементов (n).

При выборе наиболее тяжелых расчетных условий для согласования максимальных защит по чувствительности следует для предыдущих элементов принимать режим, когда включено наибольшее реально возможное количество элементов, в том числе и параллельно работающих; для последующих элементов принимать минимальный режим, когда включено наименьшее число параллельно работающих элементов, при этом с маловероятными режимами допустимо не считаться.

3. Обеспечение чувствительности защиты.

Чувствительность защиты определяется коэффициентом чувствительности ($k_{ч}$).

Для защиты линий с включением реле на фазные токи расчет $k_{ч}$ производится по первичным токам повреждения и срабатывания защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}^{(2)}}{I_{\text{с.з}}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{к.мин}}^{(2)}$ – ток двухфазного замыкания в защите при металлическом КЗ в конце защищаемой зоны в минимальном режиме работы питающей системы, значение его зависит от режима работы защищаемого элемента (например, при параллельной работе двух и более защищаемых элементов ток КЗ по каждому из них, как правило, меньше тока при том же КЗ, но при работе только одного из них);

$I_{\text{с.з}}$ – ток срабатывания защиты, наибольший из полученных по выражениям (1) – (3).

Для защит линий с включением реле на разность фазных токов ($k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$) и для защит трансформаторов расчет $k_{\text{ч}}$ целесообразно производить по вторичным токам по следующему выражению:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р.мин}}}{I_{\text{с.р}}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{р.мин}}$ – ток в реле при металлическом КЗ в конце защищаемой зоны в минимальном режиме работы питающей системы, значение его зависит от вида КЗ, схемы максимальной токовой защиты и вида защищаемого элемента, а также от режимов его работы (например, при параллельной работе двух и более защищаемых элементов ток КЗ по каждому из них, как правило, меньше тока при том же КЗ, но при работе только одного из них);

$I_{\text{с.р}}$ – ток срабатывания реле (уставка), который определяется как

$$I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}} \cdot k_{\text{сх}}}{n_{\text{ТТ}}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{с.з}}$ – ток срабатывания защиты, наибольший из полученных по выражениям (1) – (3);

$k_{\text{сх}}$ – коэффициент схемы соединения трансформаторов тока при симметричном режиме;

$n_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Коэффициент схемы соединения трансформаторов тока показывает, во сколько раз ток в реле защиты больше, чем вторичный ток трансформатора тока. Для схем соединения трансформаторов тока в звезду $k_{\text{сх}} = 1$; для схем, собранных в треугольник и на разность токов двух фаз, $k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$ при трехфазном КЗ или в нормальном режиме.

Для защит, выполненных на токовых реле, имеющих плавную регулировку тока срабатывания (например, типа РТ-40), полученное по выражению (6) значение $I_{с.р}$ может быть принято за окончательное. Для защит с токовыми реле, имеющими ступенчатую регулировку тока срабатывания (например, типов РТ-80, РТ-90, РТВ), необходимо подобрать ближайшее большее значение уставки.

Для основной зоны обязательно значение $k_{ч} \geq 1,5$, а для зоны резервирования $k_{ч} \geq 1,2$.

Если по расчету оказывается $k_{ч.осн} < 1,5$, то необходимо добиться повышения чувствительности либо путем изменения схемы максимальной токовой защиты, либо путем замены ее на МТЗ с пуском по напряжению, либо путем уменьшения основной зоны защиты (установка секционирующего выключателя с защитой).

1.3. Выбор времени срабатывания максимальной токовой защиты

Время срабатывания (выдержка времени) максимальных защит выбирается из условий селективности защиты и термической устойчивости защищаемого элемента. По условию селективности для защит с независимыми характеристиками время срабатывания последующей (расположенной ближе к источнику питания) защиты определяется по выражению

$$t_{с.з.посл} = t_{с.з.пред} + \Delta t, \quad (7)$$

где $t_{с.з.пред}$ – время срабатывания предыдущей защиты (защита 2 на рис. 5);

Δt – ступень селективности.

Величина ступени селективности для защит с независимой характеристикой определяется, главным образом, точностью работы реле времени. Точность работы электромеханических реле времени с часовым механизмом серии РВ-100 и РВ-200 снижается с увеличением пределов их шкалы. Поэтому не следует при значениях $t_{с.з.}$, составляющих менее 3,5 с, применять реле времени с большой шкалой (9 с и особенно 20 с). В практических расчетах для защит с использованием реле РВ-120 и РВ-130 принимается среднее значение $\Delta t = 0,5$ с. Если предыдущая защита выполнена без замедления, то $\Delta t = 0,4$ с. Это же значение Δt при необходимости может применяться при установке в предыдущей и последующей согласуемых защитах реле времени РВ-120 (шкала 3,5 с) или РВ-110 (шкала до 1,3с). Если же обе согласуемые защиты выполнены с реле РВ-130, Δt принимается равной 0,6 с. В редких случаях при установке в последующей защите реле РВ-140 рекомендуется

значительно большая ступень $\Delta t \approx 2$ с. Для защит с реле типа РВМ-12 и 13 $\Delta t = 0,5 - 0,6$ с.

Для защит с зависимой характеристикой Δt принимается равной 0,6 с (реле РТ-80, РТ-90) и $\approx 0,7$ с (реле РТВ). Эти же ступени принимаются и при согласовании защит с зависимой и независимой характеристиками. Если предыдущая защита выполнена без замедления, Δt может приниматься несколько меньшей (0,5—0,6 с).

Если согласование защит по времени производится при таких токах, когда реле работают в зависимой части характеристики, рекомендуется принимать большие ступени селективности (для РТВ до 1 с).

Для учебных расчетов допускается $\Delta t = 0,5$ с.

Выбранное по условию селективности время срабатывания защиты проверяется по условию термической устойчивости защищаемого элемента. Такая проверка является обязательной для трансформаторов и кабелей, а также рекомендуется для воздушных линий 6 и 10 кВ с проводами малых сечений.

Пример 1.

Для схемы (рис.7) рассчитать максимальную токовую защиту МТЗ 2 для линии Л2

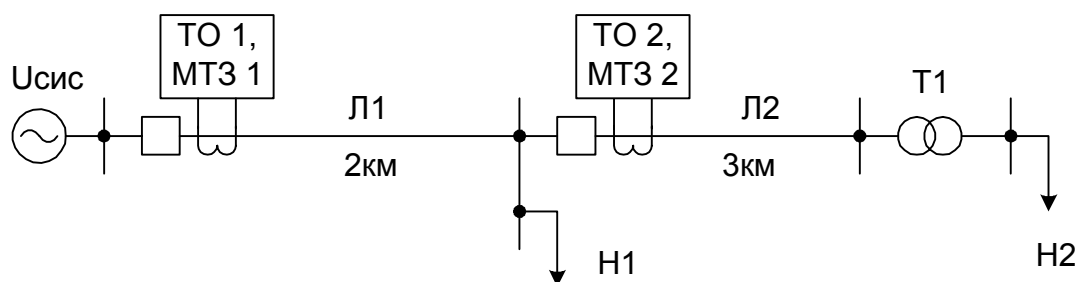


Рис. 7. Расчетная схема

Исходные данные :

$$U_{сис} = 10,5 \text{ кВ}; \quad S_{наг1} = 4300 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \quad S_{Тр.ном} = 6300 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$I_{к.з.макс}^{сис} = 6 \text{ кА}; \quad k_{сзн.наг1} = 2,5; \quad U_{Тр.ном} = 10,5/3,15 \text{ кВ};$$

$$I_{к.з.мин}^{сис} = 4 \text{ кА}; \quad t_{с.з.наг1} = 2,0 \text{ с}; \quad u_k \% = 6,5\%;$$

Загрузка трансформатора $Т1 - n_{Т1} \% = 60\%$

$$K_{сзн.наг2} = 2,0; \quad t_{с.з.наг2} = 1,0 \text{ с}.$$

Решение

1. Составим схему замещения сети, которая приведена на рис. 8.

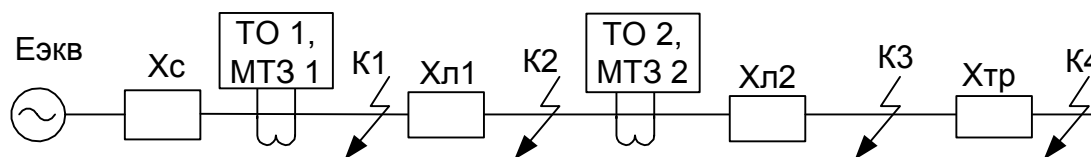


Рис.8. Схема замещения

2. Рассчитаем элементы схемы замещения.

За базовое напряжения примем $U_{баз} = 10,5 \text{ кВ}$.

Максимальное и минимальное сопротивление системы:

$$x_{с.макс} = \frac{U_{баз}}{\sqrt{3} \cdot I_{к.з.макс}^{сис}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1,01 \text{ Ом}$$

$$x_{с.мин} = \frac{U_{баз}}{\sqrt{3} \cdot I_{к.з.мин}^{сис}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 4} = 1,52 \text{ Ом}$$

Сопротивление линии Л1 и Л2 равно:

$$x_{л1} = x_{уд} \cdot l_{л1} = 0,4 \cdot 2 = 0,8 \text{ Ом}$$

$$x_{л2} = x_{уд} \cdot l_{л2} = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \text{ Ом}$$

Сопротивление трансформатора Т1 равно:

$$X_{Тр} = \frac{u_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_{баз}^2}{S_{Тр}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{6,3} = 1,14 \text{ Ом}$$

3. Рассчитаем рабочий ток через защиту 2.

$$I_{наг2} = \frac{n_{Т1\%} / 100 \cdot S_{Тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{60\% / 100 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 208 \text{ А}$$

4. Рассчитаем ток срабатывания МТЗ 2 по условию отстройки от максимального рабочего тока по выражению (1).

$$I_{с.з2} \geq \frac{k_H k_{сзн} I_{раб}}{k_{от}} = \frac{1,2 \cdot 2,0 \cdot 208}{0,8} = 624 \text{ А}$$

5. Проверка чувствительности защиты выполняется по выражению (4).

Для проверки чувствительности МТЗ необходимо рассчитать минимальный ток двухфазного КЗ в точках К3 (основная зона) и К4 (резервная зона защиты).

$$I_{K3\text{мин}}^{(2)} = \frac{0,866 \cdot E_{\text{экв}}}{\sqrt{3}(x_{c.\text{мин}} + x_{л1} + x_{л2})} = \frac{0,866 \cdot 10,5}{\sqrt{3}(1,52 + 0,8 + 1,2)} = 1,49 \text{ кА}$$

$$k_{ч.\text{основ}} = \frac{I_{K3\text{мин}}^{(2)}}{I_{c.32}} = \frac{1490}{624} = 2,39 > 1,5$$

$$I_{K4\text{мин}}^{(2)} = \frac{0,866 \cdot E_{\text{экв}}}{\sqrt{3}(x_{c.\text{мин}} + x_{л1} + x_{л2} + x_{Tp})} = \frac{0,866 \cdot 10,5}{\sqrt{3}(1,52 + 0,8 + 1,2 + 1,14)} = 1,13 \text{ кА}$$

$$k_{ч.\text{резерв}} = \frac{I_{K4\text{мин}}^{(2)}}{I_{c.32}} = \frac{1130}{624} = 1,81 > 1,2$$

Защита МТЗ 2 удовлетворяет требованиям ПУЭ по чувствительности в основной и резервной зонах защиты.

6. Расчет тока срабатывания реле по выражению (6) и выбор реле МТЗ 2.

По нагрузочному току выбираем коэффициент трансформации трансформаторов тока $I_{\text{наг}2} = 208 \text{ А}$, следовательно, выбираем трансформаторы тока с коэффициентом, равным $n_{\text{ТТ}2} = 300/5$. Защиту выполним на реле типа РТ-40 по схеме неполной звезды ($k_{сх} = 1$).

$$I_{c.p.MT32} = \frac{k_{сх} \cdot I_{c.з.MT32}}{n_{\text{ТТ}2}} = \frac{1 \cdot 624}{300/5} = 10,4 \text{ А},$$

следовательно, выбираем реле РТ-40/20.

7. Выбор времени срабатывания защиты МТЗ 2.

Время срабатывания должно быть больше (на ступень селективности) времени действия предыдущих защит (защит трансформатора).

$$t_{c32} = t_{c.з.наг2} + \Delta t = 1,0 + 0,5 = 1,5 \text{ с}$$

Для защиты выбираем реле времени типа РВ-122 (шкала 3,5с)

Пример 2.

Для схемы (рис.7) рассчитать максимальную токовую защиту МТЗ 1 для Л1 используя данные и расчеты из примера 1.

Решение.

1. Рассчитаем рабочий ток через защиту 1. Этот ток состоит из суммы токов нагрузки 1 и нагрузки 2.

Ток нагрузки 1 равен:

$$I_{наг1} = \frac{S_{наг1}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{4300}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 236 A$$

Ток нагрузки 2 равен:

$$I_{наг2} = 208 A \text{ (см. пример 1)}$$

Максимальный рабочий ток через защиту 1 равен:

$$I_{раб1} = I_{наг1} + I_{наг2} = 236 + 208 = 444 A$$

По максимальному рабочему току выбираем коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_{тт1} = 600/5$

2. Рассчитаем ток срабатывания МТЗ 1 по условию отстройки от максимального рабочего тока и согласованию с током МТЗ 2.

- по отстройке от максимального рабочего тока по выражению (1)

$$I_{с.з1} \geq \frac{k_H}{k_E} (k_{сзн1} \cdot I_{наг1} + k_{сзн2} \cdot I_{наг2}) = \frac{1,2}{0,8} (2,5 \cdot 236 + 2,0 \cdot 208) = 1510 A$$

- по согласованию с током МТЗ 2 по выражению (2)

$$I_{с.з1} \geq \frac{k_{н.с.}}{k_P} (I_{с.з.2} + I_{наг1}) = \frac{1,25}{1} (624 + 236) = 1075 A$$

Ток срабатывания МТЗ1 выбирается большее из этих двух условий, следовательно, $I_{с.з1} = 1510 A$.

3. Проверка чувствительности защиты по выражению (4).

Для проверки чувствительности МТЗ 1 необходимо рассчитать минимальный ток двухфазного КЗ в точках К2 (основная зона) и К3 (резервная зона защиты).

$$I_{К2_{мин}}^{(2)} = \frac{0,866 \cdot E_{экв}}{\sqrt{3}(x_{с.мин} + x_{л1})} = \frac{0,866 \cdot 10,5}{\sqrt{3}(1,52 + 0,8)} = 2,26 kA$$

$$k_{ч.основ} = \frac{I_{K2_{мин}}^{(2)}}{I_{с.з1}} = \frac{2260}{1510} = 1,49 < 1,5$$

$$I_{K3_{мин}}^{(2)} = 1490 A \text{ (из примера 1)}$$

$$k_{ч.резерв} = \frac{I_{K3_{мин}}^{(2)}}{I_{с.з1}} = \frac{1490}{1510} = 0,99 < 1,2,$$

т.к. защита МТЗ 1 не чувствительна к току КЗ в резервной зоне, поэтому необходимо применить максимальную токовую защиту с пуском по напряжению (см. пример 3).

2. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Применение пуска по напряжению позволяет при выборе тока срабатывания защиты по выражениям (1) – (3), принимать $k_{сзп} = 1$, поскольку отстройка от перегрузочных режимов обеспечивается пусковым органом напряжения.

Типовой (комбинированный) пусковой орган напряжения (рис.9, а) состоит из фильтра-реле KZV 2 напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М и минимального реле напряжения KV 1, включенного на одно из междуфазных напряжений через размыкающий контакт фильтра-реле.

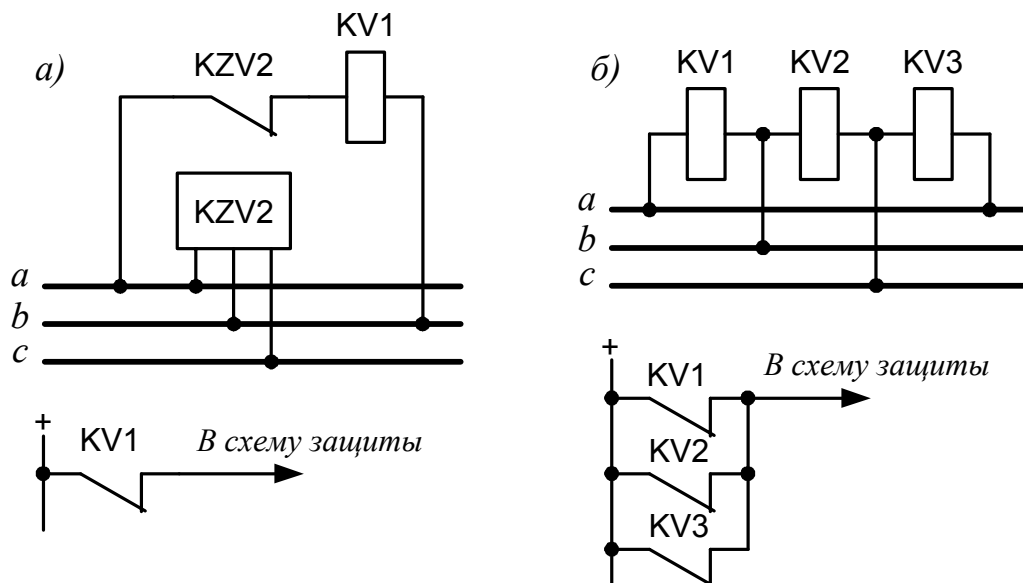


Рис. 9. Пусковые органы напряжения максимальных токовых защит : а – комбинированный пусковой орган; б – пусковой орган с тремя минимальными реле напряжения

Напряжение срабатывания фильтра-реле KZV 2 обратной последовательности типа РНФ-1М выбирается из условия обеспечения отстройки от напряжения небаланса фильтра в нормальном режиме :

$$U_{2\text{ с.з.}} = 0,06 \cdot U_{\text{ном}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{ном}}$ – междуфазное номинальное напряжение.

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения KV 1 определяется, исходя из условия обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ, по выражению

$$U_{\text{с.з.}} = \frac{U_{\text{мин}}}{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{в}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{мин}}$ – минимальное напряжение в месте установки трансформатора напряжения, от которого питается реле, в начале самозапуска двигателей нагрузки после отключения внешнего КЗ;

$k_{\text{н}}$ – коэффициент надежности, может быть принят равным 1,1 – 1,2;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата реле, может быть принят равным 1,25 (для реле типа РН-50).

Напряжение $U_{\text{мин}}$ может быть определено при приближенном расчете режима самозапуска. Обычно $U_{\text{мин}} = (0,8 - 0,9) \cdot U_{\text{ном}}$.

Коэффициент чувствительности при КЗ в зоне резервирования для реле KZV 2 определяется по следующему выражению:

$$k_{\text{ч}} U_2 = \frac{U_2}{U_{2\text{ с.з}}}, \quad (10)$$

где U_2 – междуфазное напряжение обратной последовательности в месте установки трансформатора напряжения, от которого питается фильтр - реле, при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме, при котором указанное напряжение имеет наименьшее значение;

$U_{2\text{ с.з.}}$ – напряжение срабатывания фильтра-реле обратной последовательности, по выражению (8).

Для минимального реле напряжения KV 1 (рис. 9, а) коэффициент чувствительности определяется как

$$k_{ч}U = \frac{U_{с.з} \cdot k_{в}}{U_{ост}}, \quad (11)$$

где $U_{с.з}$ – напряжение срабатывания реле минимального напряжения, по выражению (10);

$k_{в} = 1,25$ – коэффициент возврата реле (учитывается благодаря тому, что в момент возникновения трехфазного КЗ кратковременно появляется напряжение обратной последовательности, срабатывает реле KZV 2, и тогда реле KV 1 работает «на возврате»);

$U_{ост}$ – междуфазное остаточное напряжение в месте установки трансформатора напряжения, от которого питаются реле, при металлическом трехфазном КЗ в расчетной точке, когда указанное напряжение имеет наибольшее значение.

Для другого варианта выполнения пускового органа (рис. 9, б) в выражении (11) коэффициент возврата не учитывается:

$$k_{ч}U = \frac{U_{с.з}}{U_{ост}}. \quad (12)$$

Коэффициент чувствительности для основной зоны защиты должен быть $k_{ч} \geq 1,5$, а для резервной зоны защиты требуется $k_{ч} \geq 1,2$.

Сравнивая варианты пусковых органов (рис. 10, а и б), легко убедиться, что типовой (комбинированный) пусковой орган обеспечивает большую чувствительность защиты при симметричных КЗ, еще значительно большую чувствительность при несимметричных КЗ и, кроме того, состоит из меньшего числа реле. Недостатком схемы рис.9,а является возможность срабатывания при кратковременном появлении несимметрии напряжения, например, при включении выключателя от схемы автоматического повторного включения (АПВ). Кроме того, применение комбинированного пускового органа напряжения не освобождает от необходимости согласования по току максимальных защит трансформатора и защит отходящих линий, не имеющих пуска по напряжению, по условию (2). Это объясняется тем, что при несимметричных КЗ в питаемой сети комбинированный пусковой орган из-за своей высокой чувствительности по напряжению обратной последовательности имеет, как правило, значительно большую зону действия, чем максимальные защиты отходящих линий. В то же время меньшая чувствительность пускового органа из трех реле напряжения (рис.9,б) может быть при необходимости использована для совместного – по току и по напряжению – согласования по чувствительности максимальной токовой защиты трансформатора с предыдущими максимальными токовыми защитами сильно нагруженных линий, с которыми согласование лишь по току невозможно.

Пример 3.

Для схемы (рис.7) рассчитать максимальную токовую защиту МТЗ 1 с пуском по напряжению используя данные и расчеты из примеров 1 и 2.

Решение.

1. Рассчитаем ток срабатывания МТЗ 1 с пуском по напряжению по двум условиям

– отстройки от максимального рабочего тока (т.к. защита с пуском по напряжению, поэтому $k_{сзп}=1$)

$$I_{с.з1} \geq \frac{k_H}{k_B} (k_{сз1} \cdot I_{наз1} + k_{сз2} \cdot I_{наз2}) = \frac{1,2}{0,8} (1 \cdot 236 + 1 \cdot 208) = 666 \text{ A}$$

– согласования с предыдущей защитой (МТЗ 2) по выражению (2) по примеру 2 этот ток равен $I_{с.з1} = 1075 \text{ A}$.

Ток срабатывания выбирается как большее из этих двух условий, следовательно, $I_{с.з1} = 1075 \text{ A}$.

2. Проверка чувствительности по току по выражению (4).

Минимальные токи двухфазного КЗ в точках К2 (основная зона) и К3 (резервная зона защиты) взяты из примера 2

$$k_{ч.основ} = \frac{I_{К2мин}^{(2)}}{I_{с.з1}} = \frac{2260}{1075} = 2,1 > 1,5$$

$$k_{ч.резерв} = \frac{I_{К3мин}^{(2)}}{I_{с.з1}} = \frac{1490}{1075} = 1,39 > 1,2,$$

чувствительность защиты соответствует требованиям ПУЭ.

3. Выбираем напряжение срабатывания пускового органа напряжения используя схему с тремя реле напряжения (рис. 9, б) по выражению (9):

$$U_{сз1} = \frac{U_{раб.мин}}{k_H \cdot k_B} = \frac{0,9 \cdot 10,5}{1,1 \cdot 1,25} = 6,87 \text{ кВ}$$

4. Проверка чувствительности пусковых органов напряжения по (12).

Для этого необходимо рассчитать максимальное остаточное напряжение в месте установки защиты при КЗ в точках К2(основная зона) и К3 (резервная зона защиты).

Остаточное напряжения можно рассчитать как произведение максимального тока трехфазного КЗ на сумму сопротивлений элементов, по которым проходит этот ток повреждения.

Рассчитаем ток трехфазного КЗ в точке К2.

$$I_{K2_{\max}}^{(3)} = \frac{E_{\text{экв}}}{\sqrt{3}(x_{c.\max} + x_{л1})} = \frac{10,5}{\sqrt{3}(1,01 + 0,8)} = 3,35 \text{ кА}$$

Остаточное напряжение в месте установки защиты равно

$$U_{\text{макс.ост.К2}} = \sqrt{3} \cdot x_{л1} \cdot I_{K2_{\max}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 3,35 = 4,64 \text{ кВ}$$

Коэффициент чувствительности в основной зоне определяется по выражению (12)

$$k_{\text{ч.осн}}^U = \frac{U_{c.з1}}{U_{\text{остК2}}} = \frac{6,87}{4,64} = 1,48 < 1,5,$$

т.к. чувствительность пускового органа напряжения не достаточна, то используем схему комбинированного пускового органа (рис. 9, а). Для нее чувствительность определяется по выражению (11)

$$k_{\text{ч.осн}}^U = \frac{U_{c.з1} \cdot k_{\text{в}}}{U_{\text{остК2}}} = \frac{6,87 \cdot 1,25}{4,64} = 1,85 > 1,5.$$

Выполним проверку чувствительности для резервной зоны (точка К3)

$$I_{K3_{\min}}^{(3)} = \frac{E_{\text{экв}}}{\sqrt{3}(x_{c.\max} + x_{л1} + x_{л2})} = \frac{10,5}{\sqrt{3}(1,01 + 0,8 + 1,2)} = 2,01 \text{ кА}$$

$$U_{\text{остК3.макс}} = \sqrt{3} \cdot (x_{л1} + x_{л2}) \cdot I_{K3_{\max}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot (0,8 + 1,2) \cdot 2,01 = 6,96 \text{ кВ}$$

$$k_{\text{ч.рез.}}^U = \frac{U_{c.з1} \cdot k_{\text{в}}}{U_{\text{остК2.макс}}} = \frac{6,87 \cdot 1,25}{6,96} = 1,23 > 1,2.$$

Чувствительность защиты соответствует требованиям ПУЭ.

5. Расчет тока срабатывания реле и выбор типа реле защиты МТЗ 1 (защиту выполним по схеме неполной звезды $k_{\text{сх}}=1$)

$$I_{c.p1} = \frac{k_{cx} \cdot I_{c.z1}}{n_{TT1}} = \frac{1 \cdot 1075}{600/5} = 8,96 A,$$

поэтому выбираем реле типа РТ-40/10.

6. Расчет напряжения срабатывания реле типа РН-54 и выбор реле напряжения пускового органа (реле КV1 на рис. 9, а).

$$U_{c.p1} = \frac{U_{c.z1}}{n_{TH}} = \frac{6870}{10000/100} = 68,7 B,$$

где n_{TH} – коэффициент трансформации трансформатора напряжения, установленного на шинах 10 кВ, от которого питаются реле комбинированного пускового органа защиты.

По рассчитанному напряжению выбираем реле типа РН-54/120.

7. Напряжение срабатывания фильтра-реле КZV2 (рис. 9, а) согласно выражению (8) $U_{2.c.p.} = 6 B$ (вторичных), что соответствует минимальной уставке реле типа РНФ-1М с пределами шкалы 6 – 12 В.

8. Выбор времени срабатывания защиты МТЗ 1 выполним по выражению (7)

$$t_{c.z1} = t_{\text{макс.защ}} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 c,$$

где $t_{\text{макс.защ}}$ – максимальное время предыдущих защит ($t_{c.z.MT32}$ или $t_{\text{нар1}}$).

По рассчитанной выдержке времени защиты выбираем реле времени типа РВ-122 (шкала 3,5 с).

3. УСЛОВИЯ РАСЧЕТА ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ НА ЛИНИЯХ

3.1. Отсечка без выдержки времени (селективная)

По условию селективности ток срабатывания отсечки без выдержки времени выбирается больше максимального значения тока при КЗ в конце защищаемого участка:

$$I_{TO} \geq k_n \cdot I_{к.макс}^{(3)}, \quad (13)$$

где $I_{ТО}$ – ток срабатывания токовой отсечки;
 k_H – коэффициент надежности;
 $I_{к.макс}^{(3)}$ – максимальный ток КЗ в конце защищаемого участка.

Ток $I_{к.макс}^{(3)}$ определяется при максимальном режиме питающей системы (когда сопротивление системы минимально возможное), а для трансформаторов с регулированием напряжения дополнительно следует принимать и минимально возможное сопротивление защищаемого трансформатора при крайнем положении его регулятора напряжения. Рекомендуемые значения коэффициента надежности k_H для токовых отсечек без выдержки времени приведены в табл. 2. Для учебных расчетов допускается принять $k_H=1,3$.

Таблица 2

Значения k_H для токовых отсечек

Тип реле	Значение k_H	
	линий	трансформаторов
РТ-40	1,2 – 1,3	1,3 – 1,4
РТ-80	1,5 – 1,6	1,6
РТМ	1,4 – 1,5	1,6

Кроме условия (13), должна быть обеспечена отстройка токовой отсечки от бросков тока намагничивания силовых трансформаторов. При расчете токовой отсечки для трансформатора по условию (13) одновременно обычно выполняется и отстройка от броска тока намагничивания этого трансформатора.

Ток срабатывания токовой отсечки без выдержки времени на блоках линия-трансформатор и на токопроводах (с реактированными ответвлениями) выбирается по условию отстройки от КЗ за трансформатором или за реакторами ответвлений по выражению (13).

3.2. Токовая отсечка с выдержкой времени на линиях

Отсечка выполняется с небольшой выдержкой времени: на ступень селективности больше, чем время срабатывания быстродействующих защит предыдущих элементов, т.е. с $t_{ТОВ} \approx 0,5 - 1$ с. Это небольшое замедление может существенно уменьшить ток срабатывания отсечки по следующим причинам:

а) отстройка по условию (13) производится от меньших токов более удаленных точек КЗ, например, при КЗ в конце зоны отсечки предыдущей линии (Л2) или за трансформатором приемной подстанции, на которой установлена быстродействующая защита (рис. 10, а и в);

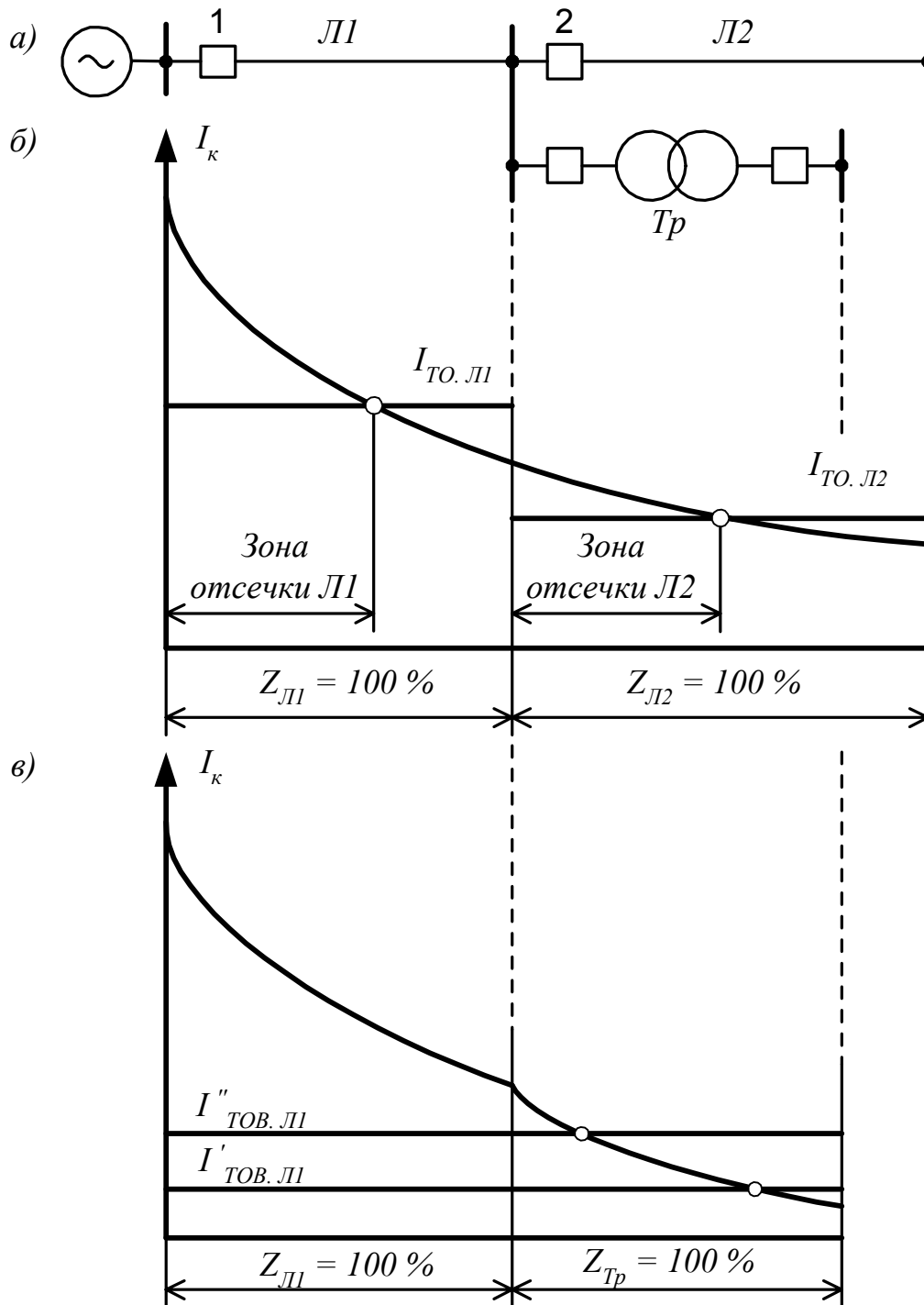


Рис. 10. Примеры графического определения зон действия токовых отсечек: а – схема сети; б – определение зон действия мгновенных токовых отсечек линий Л1 и Л2; в – определение зон действия отсечки с $t_{TOB} = 0,5$ с линии Л1

б) значения k_n в (13) могут приниматься значительно меньшими, чем указано в табл.2, так как за время $\geq 0,5$ с аperiodическая составляющая тока КЗ в распределительных сетях практически полностью затухает, поэтому принимают $k_n = 1,1 - 1,2$ независимо от типа реле;

в) не требуется отстройка от бросков намагничивающего тока трансформаторов.

3.3. Чувствительность и зона действия токовых отсечек

Для отсечек линий чувствительность определяется по выражению (4), по току двухфазного КЗ в месте установки отсечки в минимальном режиме работы питающей системы, при этом k_α должен быть $\geq 1,2$.

Токовая отсечка на линии без выдержки времени может защищать только часть линии. Эта защищаемая часть, называемая зоной действия отсечки, тем больше, чем больше сопротивление (длина) линии по сравнению с сопротивлением питающей системы и чем меньше разнятся между собой максимальный и минимальный режимы питающей системы.

Определение зон действия мгновенных отсечек линий Л1 и Л2, отстроенных от КЗ в конце соответствующей линии, показано на рис. 10,б. Графическое определение зон действия отсечек менее точно, чем аналитическое, но значительно более наглядно.

Для графического определения должна быть построена кривая изменения тока, протекающего через защиту при перемещении точки трехфазного КЗ по линии (кривая спада тока КЗ) в нормальном режиме питающей системы. Кривая может быть достаточно точно построена по трем точкам КЗ: в начале, в середине и в конце защищаемой линии. Зона действия отсечки определяется абсциссой точки пересечения кривой спада тока и ординаты, соответствующей выбранному току срабатывания отсечки. На рис. 10, в показано определение зон действия отсечки с временем срабатывания $t_{TOB} = 0,5$ с на линии Л1: для тока I'_{TOB} , выбранного по условию отстройки от КЗ за трансформатором Tr , и для тока I''_{TOB} , согласованного с током срабатывания мгновенной отсечки на линии Л2. Принимается больший из токов срабатывания (I''_{TOB}), но и при этом токе зона действия отсечки с $t_{TOB} = 0,5$ с значительно возрастает по сравнению с зоной мгновенной отсечки (рис. 10, б).

Зону действия токовой отсечки в процентах от длины линии можно определить по выражению:

$$X_{TO} \% = \frac{100}{x_\lambda} \left(\frac{E_{сис}}{\sqrt{3} \cdot I_{TO}} - x_{с.мин} \right), \quad (14)$$

где x_λ – сопротивление защищаемой линии;

I_{TO} – ток срабатывания токовой отсечки;

$x_{с.мин}$ – сопротивление системы в минимальном режиме.

Отсечка без выдержки времени как вспомогательная защита устанавливается, если зона ее действия в нормальном режиме охватывает не менее 15–20% линии.

Чувствительность отсечек без выдержки времени на блоках линия – трансформатор или на токопроводах с реактированными ответвлениями проверяется при двухфазных КЗ в конце линии или в наиболее удаленной точке токопровода. Если $k_{\text{ч}} \geq 1,5$, то отсечка считается основной быстродействующей защитой линии или токопровода, что довольно часто имеет место.

Недостатком всех токовых отсечек является зависимость длины защищаемой зоны от режима питающей системы.

Пример 4.

Для схемы (рис.7) рассчитать токовую отсечку ТО2 для линии Л2 используя данные и расчеты из примера 1.

Решение.

1. Ток срабатывания токовой отсечки рассчитывается по выражению (13).

Т.к. защита 2 установлена на блоке линия–трансформатор, поэтому можно отстраивать защиту от КЗ за трансформатором (т.е. в точке К4).

Максимальный ток КЗ в точке К4 равен:

$$I_{K4\text{макс}}^{(3)} = \frac{E_{\text{эkv}}}{\sqrt{3}(x_{\text{с.макс}} + x_{\text{л1}} + x_{\text{л2}} + x_{\text{Tp}})} = \frac{10,5}{\sqrt{3}(1,01 + 0,8 + 1,2 + 1,14)} = 1,46 \text{кА}$$

Ток срабатывания токовой отсечки равен:

$$I_{\text{ТО2}} \geq k_{\text{н}} \cdot I_{K4\text{макс}}^{(3)} = 1,3 \cdot 1460 = 1900 \text{ А}$$

2. Чувствительность токовой отсечки (ТО2) на блоках линия–трансформатор проверяется при КЗ в конце линии Л2 (точка К3).

Чувствительность проверяют при минимальном токе двухфазного КЗ

$$I_{K3\text{мин}}^{(2)} = 1490 \text{ А (из примера 1)}$$

$$k_{\text{ч.ТО2}} = \frac{I_{K3\text{мин}}^{(2)}}{I_{\text{ТО2}}} = \frac{1490}{1900} = 0,78 < 1,5.$$

Проверим чувствительность токовой отсечки ТО2 по выражению (4) при КЗ в начале линии Л2 (точка К2).

$$I_{K2_{мин}}^{(2)} = 2260 A \text{ (см. пример 2)}$$

$$k_{ч.ТО2} = \frac{I_{K2_{мин}}^{(2)}}{I_{ТО2}} = \frac{2260}{1900} = 1,19 \approx 1,2,$$

следовательно, может использоваться в качестве вспомогательной защиты.

3. Расчет зоны действия ТО 2 по выражению (14)

$$X_{\%ТО2} = \frac{100}{x_{л2}} \left(\frac{E_{сис}}{\sqrt{3} \cdot I_{ТО2}} - (x_{с.макс} + x_{л1}) \right) =$$

$$= \frac{100}{1,2} \left(\frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,9} - (1,52 + 0,8) \right) = 72,5\% > 20\%$$

Зона действия защиты более 20% от длины линий, следовательно, желательно ее применение в качестве вспомогательной защиты.

4. Расчет вторичного тока срабатывания реле по выражению (6) и выбор реле для токовой отсечки ТО2 (схема токовой отсечки ТО 2 – неполная звезда)

$$I_{с.р.ТО2} = \frac{k_{сх} \cdot I_{ТО2}}{n_{ТТ2}} = \frac{1 \cdot 1900}{300/5} = 31,7 A,$$

следовательно, используем реле типа РТ-40/50.

Пример 5.

Для схемы рис. 7 рассчитать ТО1, для линии Л1 использовать данные примера.

Решение.

1. Ток срабатывания ТО1 по выражению (13), защиту отстраиваем от тока КЗ в конце линии Л1 (точка К2).

Максимальный ток КЗ в точке К2 равен $I_{K2_{макс}}^{(3)} = 3350 A$ (см. пример 3)

$$I_{ТО1} \geq k_n \cdot I_{K2_{макс}}^{(3)} = 1,3 \cdot 3350 = 4355 A.$$

2. Проверим чувствительность токовой отсечки ТО1 по выражению (4) при КЗ в начале линии Л1 (точка К1).

Минимальный ток двухфазного КЗ в начале Л1 (точке К1) равен:

$$I_{K1_{мин}}^{(2)} = \frac{0,866 \cdot E_{экв}}{\sqrt{3} \cdot x_{с.мин}} = \frac{0,866 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,52} = 3,45 \text{ кА},$$

$$k_{ч.ТО1} = \frac{I_{K1_{мин}}^{(2)}}{I_{ТО1}} = \frac{3450}{4355} = 0,79 < 1,0$$

Коэффициент чувствительности меньше 1,0, следовательно, токовая отсечка без выдержки времени ТО1 в минимальном режиме не чувствует повреждения в начале линии, поэтому применение её нецелесообразно.

3. Расчет зоны действия ТО 1 по выражению (14)

$$X_{\%ТО1} = \frac{100}{x_{л1}} \left(\frac{E_{сис}}{\sqrt{3} \cdot I_{ТО1}} - x_{с.мин} \right) = \frac{100}{0,8} \left(\frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 4,355} - 1,52 \right) = -16\% < 20\%$$

Зона действия токовой отсечки ТО1 менее 20% от длины линий, следовательно, ТО1 не может использоваться в качестве вспомогательной защиты и применение её нецелесообразно. Поэтому необходимо использовать токовую отсечку с выдержкой времени (см. пример 6).

Пример 6.

Для схемы рис. 7 рассчитать токовую отсечку с выдержкой времени (ТОВ1) для линии Л1 (по данным примеров 1, 4, 5).

Решение.

1. Токовая отсечка с выдержкой времени может отстраиваться от КЗ в конце зоны действия токовой отсечки без выдержки времени предыдущих элементов (т.е. от ТО2).

Рассчитывается ток срабатывания отсечки ТОВ1 с выдержкой времени 0,5 с по условию согласования по чувствительности с мгновенной токовой отсечкой ТО2 по выражению (13), с $k_n = 1,1 - 1,2$.

Ток срабатывания отсечки ТО2 равен $I_{ТО2} = 1900 \text{ А}$ (см. пример 4).

Ток срабатывания токовой отсечки с выдержкой времени ТОВ1 равен:

$$I_{ТОВ1} \geq k_n \cdot I_{ТО2} = 1,2 \cdot 1900 = 2280 \text{ А}$$

2. Проверим чувствительность ТОВ1 по выражению (4) при КЗ в начале линии Л1 (точка К1)

$$I_{K1_{мин}}^{(2)} = 3450 \text{ А (см. пример 5)}$$

$$k_{ч.ТОВ1} = \frac{I_{K1_{мин}}^{(2)}}{I_{ТОВ1}} = \frac{3450}{2280} = 1,51 > 1,2.$$

Проверим чувствительность ТОВ1 при КЗ в конце линии Л1 (точка К2),

$$I_{K2_{мин}}^{(2)} = 2260 A \text{ (см. пример 2)}$$

$$k_{ч.ТОВ1} = \frac{I_{K2_{мин}}^{(2)}}{I_{ТОВ1}} = \frac{2260}{2280} = 0,99 < 1,5.$$

Т.к. чувствительность токовой отсечки с выдержкой времени ТОВ1 при КЗ в конце линии Л1 менее 1,5, то она не может использоваться в качестве основной защиты линии Л1.

3. Расчет зоны действия ТОВ 1 по выражению (14)

$$X_{\%ТОВ1} = \frac{100}{x_{л1}} \left(\frac{E_{сис}}{\sqrt{3} \cdot I_{ТОВ1}} - x_{с.мин} \right) = \frac{100}{0,8} \left(\frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,28} - 1,52 \right) = 142\% > 20\%$$

Зона действия токовой отсечки с выдержкой времени ТОВ1 более 20% от длины линий Л1, следовательно, ТОВ1 может использоваться в качестве вспомогательной защиты этой линии.

4. Расчет вторичного тока срабатывания реле по выражению (6) и выбор реле для токовой отсечки с выдержкой времени ТОВ1 (защиту ТОВ1 выполним по схеме неполной звезды)

$$I_{с.р.ТОВ1} = \frac{k_{сх} \cdot I_{ТОВ1}}{n_{ТТ1}} = \frac{1 \cdot 2280}{600/5} = 19,0 A,$$

следовательно, используем реле типа РТ-40/20.

5. Выдержка времени ТОВ1 выбирается по выражению (7).

Т.к. токовая отсечка с выдержкой времени ТОВ1 отстраивается от токовой отсечки без выдержки времени ТОВ2, следовательно:

$$t_{ТОВ1} = t_{ТОВ2} + \Delta t = 0 + 0,5 = 0,5 c,$$

поэтому выбираем реле времени типа РВ-112 (шкала 1,3 с).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Задание для контрольной работы по курсу "Релейная защита систем электроснабжения"

В контрольной работе необходимо выполнить расчет защит ЛЭП.

В объем контрольной работы входят:

1. Расчет токов короткого замыкания.
2. Обоснованный выбор типа и схемы устройств релейной защиты.
3. Выбор коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения, необходимых для релейной защиты.
4. Расчет уставок защит: тока срабатывания первичного $I_{сз}$, вторичного $I_{ср}$, напряжения срабатывания $U_{сз}$, $U_{ср}$, времени срабатывания $t_{ср}$ разных ступеней и других возможных уставок.
5. Выбор типов реле, применяемых в качестве пуско-измерительных органов защиты, если их характеристики (например, коэффициент возврата) влияют на расчет защиты.
6. Проверка чувствительности выбранных защит. Расчетные коэффициенты чувствительности должны удовлетворять нормативным требованиям ПУЭ.
7. Изображение полной схемы защиты одной ЛЭП в развернутом виде на листе формата А4. Составление спецификации на примененную аппаратуру.

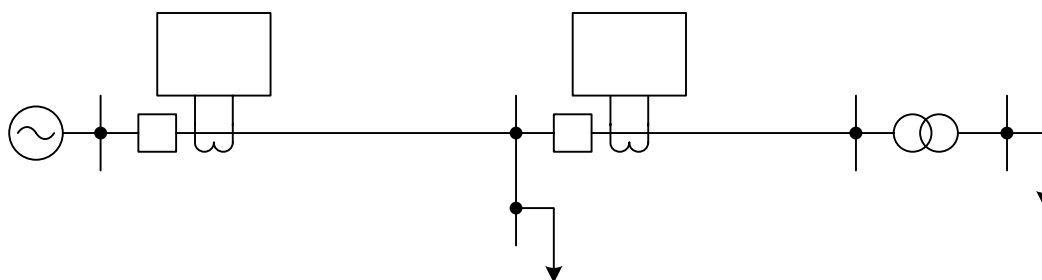


Рис. П1. Расчетная схема сети

Параметры расчетной схемы для разных вариантов задания указаны в таблицах П1 и П2.

Все другие необходимые данные для расчета необходимо взять из справочников (например: Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. Электрическая часть

электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989 или аналогичных).

Таблица П1

Параметры расчетной схемы для вариантов задания по **предпоследней цифре зачетки**

Параметр		№ варианта (<u>предпоследняя цифра зачетки</u>)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение ЛЭП, кВ		35	10,5	6,3	35	10,5	6,3	35	10,5	6,3	10,5
Ток КЗ на шинах ПС, кА	макс.	15	22	35	14	24	30	16	20	33	26
	мин.	12	15	20	10	18	25	10	12	28	13
Длина ВЛ, км	Л1	4,5	5	3	3,5	5,5	4	5	2	5	6
	Л2	6	4	5	4	3	2,5	2	1,5	5	4
Мощность трансформатора Т1, МВ·А		6,3	16	2,5	16	10	1,6	10	4	1	6,3

Удельное сопротивление ЛЭП прямой последовательности $X_{1\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}$.

Таблица П2

Нагрузка присоединений, коэффициенты самозапуска нагрузок и максимальные выдержки времени защит для вариантов задания по **последней цифре зачетки**

Параметр нагрузки		№ варианта (<u>последняя цифра зачетки</u>)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Н1	Мощность нагрузки S, МВ·А	3,2	4,5	1,8	3,0	4,2	2,9	3,3	1,7	1,9	1,8
	Коэффициент самозапуска	2,0	2,7	2,3	2,8	2,0	2,5	2,6	2,4	2,5	2,3
	Выдержка времени защиты, с	1,5	2,0	1,5	2,5	3,0	2,0	1,5	3,0	1,0	2,5
Н2	Загрузка трансформатора Т1, %	60	45	55	50	35	30	80	65	70	40
	Коэффициент самозапуска	2,1	2,4	2,5	2,7	2,2	2,0	2,3	2,5	2,0	2,3
	Выдержка времени защиты, с	2,5	3,0	2,0	1,5	1,0	3,0	2,5	1,5	3,0	2,0

Список литературы

1. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: Монография. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 555 с.
2. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ. – Т. 6. – М.: ИД "Энергия", 2006. – 624 с.
3. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учебное пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 560 с.
4. Чернобровов Н. В. Релейная защита. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.
5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.
6. Беркович М.А. и др. Основы техники релейной защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
7. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 284 с.
8. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
9. Плащанский Л.А. Основы электроснабжения. Раздел "Релейная защита электроустановок": Учебное пособие. – М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2003. – 141 с.
10. Авербух А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.
11. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

Шестаков Дмитрий Николаевич

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ
И ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК ЛИНИЙ 6, 10, 35 кВ

Задания для контрольной работы и
методические указания к выполнению практических занятий
по курсу «Релейная защита систем электроснабжения»
для студентов направления 140200 (специальность 140211)

Редактор Н. Л. Попова

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 2,0	Уч.-изд. л. 2,0
Заказ	Тираж 100	Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.