



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

О.В. Самолина, В.В. Вахнина

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Практикум

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2023

ISBN 978-5-8259-1307-0

УДК 621.316.925(075.8)
ББК 31.27-051.3я73

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
«Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений» Казанского государственного
энергетического университета *Н.В. Роженцова*;

д-р техн. наук, профессор кафедры
«Электроснабжение и электротехника»

Тольяттинского государственного университета *А.А. Кувшинов*.

Самолина, О.В. Релейная защита : практикум / О.В. Самолина, В.В. Вах-
нина. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023. — 1 оптический диск. — ISBN
978-5-8259-1307-0.

В практикуме рассмотрены задачи и примеры выбора и расчета па-
раметров токовых защит линий электропередачи напряжением выше 1 кВ,
защиты понижающих трансформаторов и высоковольтных и низковольт-
ных электродвигателей. В задачах и примерах рассмотрены тепловые, элек-
тромеханические и аналоговые реле, а также микропроцессорные устрой-
ства защиты.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготов-
ки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольят-
тинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый
компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; ПИИ 500 МГц или эквивалент,
128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© Самолина О.В., Вахнина В.В., 2023

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2023



Редактор **О.В. Горбань**
Технический редактор **Н.П. Крюкова**
Компьютерная верстка: **Е.В. Веселова**
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: **Е.В. Веселова**

*В оформлении издания
использована иллюстрация с сайта freepic.com*

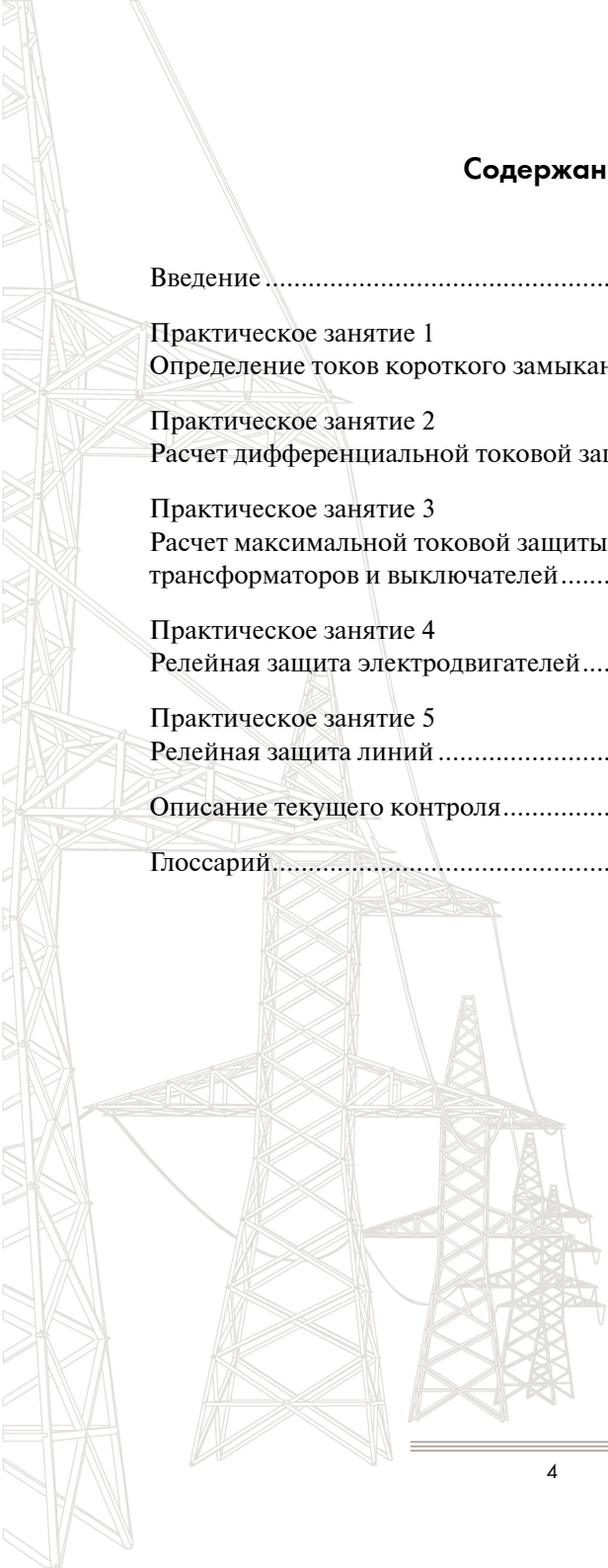
Дата подписания к использованию 22.02.2023.

Объем издания 2,2 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-26-21.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru



Содержание

Введение	5
Практическое занятие 1	
Определение токов короткого замыкания	7
Практическое занятие 2	
Расчет дифференциальной токовой защиты трансформаторов	15
Практическое занятие 3	
Расчет максимальной токовой защиты трансформаторов и выключателей	25
Практическое занятие 4	
Релейная защита электродвигателей	41
Практическое занятие 5	
Релейная защита линий	45
Описание текущего контроля	50
Глоссарий	51

Введение

Цель практического курса — приобрести умения выполнять расчеты и производить обоснованный выбор элементов релейной защиты систем электроснабжения.

Достижению поставленной цели способствуют задачи, решаемые на практических занятиях. Темы практических занятий соответствуют основным вопросам, изучаемым на лекциях.

Рационально разработанная система релейной защиты и автоматики должна соответствовать ряду требований: высокой надежности и экономичности, безопасности и удобству эксплуатации, быстродействию, селективности и т. д. Многообразие факторов, которые необходимо учитывать при проектировании схем релейной защиты, повышает требования к квалификации специалистов в области электроэнергетики.

При выполнении подстанции без выключателей на стороне высокого напряжения с установкой в цепи трансформаторов отделителей и короткозамыкателей на трансформаторах ГПП предусматриваются следующие виды защит:

- а) продольная дифференциальная защита с действием на включение короткозамыкателя (для отключения питающей линии со стороны источника питания) и на отключение выключателей вводов 6—10 кВ. После включения короткозамыкателя в бестоковую паузу производится отключение поврежденного трансформатора с помощью отделителя;
- б) газовая защита трансформатора с действием на сигнал (первая ступень) и на включение короткозамыкателя и отключение вводов 6—10 кВ (вторая ступень);
- в) газовая защита переключателя ответвлений РПН с действием на сигнал (первая ступень) и на включение короткозамыкателя (вторая ступень);
- г) максимальная токовая защита на стороне 110 кВ с независимой выдержкой времени с комбинированным пуском напряжения. Защита действует на включение короткозамыкателя и отключение вводов 6—10 кВ. Пусковой орган напряжения устанавливается на каждом вводе 6—10 кВ и содержит такое устройство, как фильтр-реле напряжения обратной

последовательности для действия при несимметричных повреждениях, и одно реле минимального напряжения, включенное на междупазное напряжение для действия при трехфазных коротких замыканиях;

- д) максимальная токовая защита на вводах 6–10 кВ с независимой выдержкой времени с ускорением при включении выключателя вводов. Защита имеет две выдержки времени: с первой (меньшей) выдержкой времени защита действует на отключение ввода 6–10 кВ, со второй (большей) выдержкой времени защита действует на включение короткозамыкателя. При необходимости повышения чувствительности предусматривается возможность дополнения защиты комбинированным пуском напряжения с использованием аппаратуры комбинированного пуска напряжения максимальной токовой защиты на стороне 110 кВ;
- е) защита от перегрузки и перегрева масла с действием на сигнал;
- ж) защита от понижения уровня масла с действием на сигнал.

Предусматривается также релейная защита:

- а) на секционных выключателях 6–10 кВ: максимальная токовая защита (МТЗ) с независимой выдержкой времени;
- б) на линиях 6–10 кВ трансформаторов дугогасящих катушек: МТЗ с выдержкой времени; токовая отсечка мгновенного действия; защита от замыканий на землю с действием на сигнал;
- в) на отходящих линиях 6–10 кВ – защита выбирается в каждом конкретном случае в зависимости от условий и назначения линии.

Практическое занятие 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Цель – приобретение навыка расчета токов короткого замыкания (КЗ) для выбора устройств релейной защиты.

Задача. Освоить методику определения токов короткого замыкания в схемах релейной защиты.

Рекомендуемая литература

1. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / разработаны Московским энергетическим институтом (техническим университетом) ; науч. ред. Б. Н. Неклепаев. – [3-е изд.]. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 150, [1] с. – ISBN 5-93196-081-3.
2. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для вузов / И. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов [и др.] ; под ред. И. П. Крюčkова, В. А. Старшинова. – Москва : Academia, 2005. – 410, [1] с. – (Высшее профессиональное образование. Энергетика). – ISBN 5-7695-1998-3.

ЗАДАНИЕ

Рассчитать токи короткого замыкания для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора.

Расчет токов короткого замыкания рекомендуется выполнять в именованных единицах. Значения всех величин допустимо определять для начального момента короткого замыкания. Расчеты выполняются без учета сопротивления нагрузки и переходных сопротивлений в местах КЗ.

Все расчеты токов КЗ производятся при приведении сопротивлений к одному напряжению, как правило, к высшему.

В сетях до 35 кВ (сети с изолированной нейтралью) достаточно рассчитать токи при трехфазных и двухфазных КЗ. В сетях 110 кВ

и выше (сети с глухозаземленной нейтралью) необходимо определять токи при трехфазных, двухфазных на землю и однофазных на землю КЗ.

Питающая система задается мощностью КЗ на шинах ГПП, по которой определяется сопротивление системы:

$$x_c = \frac{U_{\text{ном.ВН}}^2}{S_{\text{КЗ}}^{(3)}}. \quad (1.1)$$

Для расчетов защит принимать значения мощности КЗ, указанные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения мощности КЗ для расчетов токов КЗ

Напряжение, кВ	Максимальное значение мощности КЗ, МВА	Минимальное значение мощности КЗ, МВА
220	7000	4000
110	5000	1500
35	1500	600

Сопротивление ВЛ: $x_{\text{л}} = x_0 \cdot l$.

Сопротивление трансформаторов определяется по напряжению КЗ $U_{\text{к}}\%$ и номинальной мощности $S_{\text{т.ном}}$:

$$x_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном.ВН}}^2}{S_{\text{т.ном}}}. \quad (1.2)$$

Трехфазный ток КЗ при внешнем КЗ определяется по формуле

$$I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.ВН}}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}}, \quad (1.3)$$

где x_{Σ} — суммарное сопротивление всех элементов до места КЗ.

Для определения тока КЗ на любой ступени трансформатора необходимо найденное значение $I_{\text{к.ВН}}^{(3)}$ привести к напряжению ступени, например:

$$I_{\text{кЗ НН}}^{(3)} = I_{\text{кЗ ВН}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}. \quad (1.4)$$

Для трансформаторов с РПН следует учитывать изменение сопротивления ВН в зависимости от положения регулятора РПН. Для понижающих трансформаторов общего назначения при уменьшении коэффициента трансформации ($-\Delta U_{\text{РПН}}$) сопротивление уменьшается по сравнению со средним значением, а при увеличении коэффициента трансформации ($+\Delta U_{\text{РПН}}$) увеличивается.

Вычисление максимального тока КЗ следует производить при наименьшем сопротивлении питающей сети ($x_{\text{Т min}}$) и в максимальном режиме системы $S_{\text{КЗ max}}$. Значение тока КЗ на стороне ВН трансформатора при внешнем КЗ:

$$I_{\text{кЗ max ВН}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ВН}} \cdot (1 - \Delta U_{\text{РПН}} / 100)}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с}(S_{\text{КЗ max}})} + x_{\text{Т min}} + x_{\text{л}})}, \quad (1.5)$$

$$I_{\text{кЗ max НН}}^{(3)} = I_{\text{кЗ max ВН}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{ср.ВН}} \cdot (1 - \Delta U_{\text{РПН}} / 100)}{U_{\text{НН}}}. \quad (1.6)$$

Вычисление минимального тока КЗ следует производить при наибольшем сопротивлении питающей сети $x_{\text{Т max}}$ в минимальном режиме системы ($S_{\text{КЗ min}}$).

Для выбора параметров срабатывания токовых защит должны быть рассчитаны, как правило, максимальные токи в защите, а для оценки чувствительности — минимальные. Эти режимы следует определять с учетом конфигурации сети, режима заземления нейтралей и т. д.

Пример

Проведем расчет токов КЗ для силового трансформатора ТРДН-40000/110/6.

Расчет произведен в именованных единицах, сопротивлениями нагрузки пренебрегаем, также не учитываем активные сопротивления

ния и переходные сопротивления в точках КЗ. Схема для расчета токов КЗ представлена на рис. 1.1.

Для трансформатора ТРДН-40000/110/6 задано:

$$S_{\text{КЗ max}} = 4600 \text{ МВА}; S_{\text{КЗ min}} = 1500 \text{ МВА}; S_{\text{КЗ зад}} = 3500 \text{ МВА};$$

$$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}; U_{\text{НН1}} = U_{\text{НН2}} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{к.ВН} - \text{НН min}} = 9,52\%; U_{\text{к.ВН} - \text{НН ср}} = 10,5\%; U_{\text{к.ВН} - \text{НН max}} = 11,56\%.$$

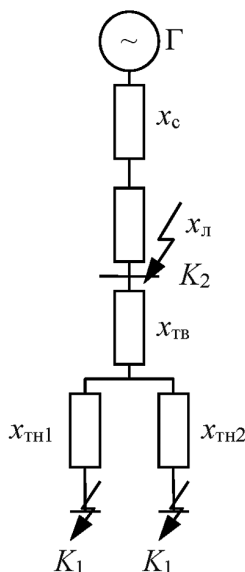


Рис. 1.1. Схема для расчета токов КЗ

Для двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов 110 кВ мощностью 10 МВА и выше при полном диапазоне регулирования напряжения на стороне ВН ($\pm 16\%$) $U_{\text{ВН max}} = 133,42 \text{ кВ}$. Однако в ГОСТ 721–77 указано, что максимальным для сетей класса 110 кВ является напряжение $U_{\text{max}} = 126 \text{ кВ}$. Поэтому наибольшим напряжением регулируемой обмотки ВН для этих трансформаторов следует считать $U_{\text{ВН max}} = 126 \text{ кВ}$.

Методика выбора наибольшего и наименьшего значения $U_{\text{ВН}}$ при РПН следующая.

Определим наибольшее значение $U_{\text{ВН}}$ при РПН:

$$U_{\text{ВН max}} \leq U_{\text{ВН наиб}} = 126 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{ср.ВН}} = 115 \text{ кВ};$$

$$+\Delta U_{\text{РПН}} = (9 \cdot 1,78 \cdot 110) / 100 = +17,62 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{ВН max}} = 115 + 17,62 = 133,42 \text{ кВ}.$$

Принимаем $U_{\text{max}} = 126 \text{ кВ}$.

Определим наименьшее значение $U_{\text{ВН}}$ при РПН:

$$-\Delta U_{\text{РПН}} = (9 \cdot 1,78 \cdot 110) / 100 = -17,62 \text{ кВ},$$

$$U_{\text{ВН min}} = 115 - 17,62 = 97,38 \text{ кВ}.$$

Принимаем $U_{\text{ВН min}} = 97,38 \text{ кВ}$.

Сопrotивление системы:

$$x_{\text{ВН}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{КЗ}}} = \frac{115^2}{3500} = 3,48 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{ВН min}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{КЗ min}}} = \frac{115^2}{1500} = 8,8 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{ВН max}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{КЗ max}}} = \frac{115^2}{4600} = 2,64 \text{ Ом}.$$

Сопrotивление линии 110 кВ

$$x_{\text{ВЛ}} = x_0 \cdot l / 2 = 0,4 \cdot 10 / 2 = 2 \text{ Ом}.$$

Сопrotивление для ВН трансформатора, приведенное к базисной ступени напряжения:

$$x_{\text{ТВН ср}} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 40} = 57,86 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{ТВН min}} = \frac{9,52 \cdot 115^2 (1 - 0,16)^2}{100 \cdot 40} = 39,75 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{ТВН max}} = \frac{10,5 \cdot 126^2}{100 \cdot 40} = 85,82 \text{ Ом}.$$

Сопротивление для НН трансформатора:

$$x_{\text{ТНН ср}} = \frac{10,5 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 40} = 0,064 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{ТНН min}} = \frac{10,5 \cdot 6,3^2 (1 - 0,16)^2}{100 \cdot 40} = 0,045 \text{ Ом}.$$

Суммарные сопротивления всех элементов до места КЗ:

$$x_{\Sigma} = x_{\text{ВН}} + x_{\text{ВЛ}} + x_{\text{ТВН}} + x_{\text{ТНН}} = 3,48 + 2 + 0,289 + 0,064 = 63,693 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} x_{\Sigma \text{ max}} &= x_{\text{ВН max}} + x_{\text{ВЛ}} + x_{\text{ТВН max}} + x_{\text{ТНН max}} = \\ &= 2,645 + 2 + 0,429 + 0,087 = 90,98 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{\Sigma \text{ min}} &= x_{\text{ВН min}} + x_{\text{ВЛ}} + x_{\text{ТВН min}} + x_{\text{ТНН min}} = \\ &= 8,82 + 2 + 0,185 + 0,045 = 50,8 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Трехфазный ток КЗ при внешнем коротком замыкании определяется по формуле

$$I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.ВН}}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}}.$$

Вычисление максимального тока КЗ производим при наименьшем сопротивлении питающей сети $x_{\text{Т min}}$ и при максимальном значении тока КЗ на сторонах трансформатора:

$$I_{\text{КЗ max ВН}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ВН}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\text{РПН}}}{100}\right)}{\sqrt{3} \cdot (x_{\Sigma \text{ min}})};$$

$$I_{\text{КЗ max НН}}^{(3)} = I_{\text{КЗ max ВН}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{ср}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\text{РПН}}}{100}\right)}{U_{\text{НН}}}.$$

Вычисление минимального тока КЗ следует производить при наибольшем сопротивлении питающей сети $x_{\text{Т max}}$ и в минимальном режиме системы $S_{\text{КЗ min}}$:

$$I_{K3 \min BH}^{(3)} = \frac{U_{cp.BH} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{PНН}}{100}\right)}{\sqrt{3} \cdot (x_{\Sigma \max})};$$

$$I_{K3 \min HH}^{(3)} = I_{K3 \min BH}^{(3)} \cdot \frac{U_{cp} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{PНН}}{100}\right)}{U_{HH}}.$$

Результаты расчетов токов КЗ сведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты расчета токов КЗ

Мощность трансформатора, МВА, и напряжения, кВ	Мощность КЗ системы, МВА	Ток трехфазного КЗ, А, 115 кВ	Ток трехфазного КЗ, А, 6,3 кВ
$S_{T.HOM} = 40 \text{ МВА}$ $U_{BH} = 115 \text{ кВ}$ $U_{HH} = 6,3 \text{ кВ}$	$S_{K3 \max} = 4600$	1610	14810
	$S_{K3} = 3500$	589	6449
	$S_{K3 \min} = 1500$	1043	13250

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТРДН-25000/110/6.
2. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТРДН-63000/110/6.
3. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТРДН-63000/110/10.
4. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТРДН-40000/110/10.
5. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТРДН-25000/110/10.
6. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТДТН-63000/110/10/6.

7. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТДТН-80000/220/10/6.
8. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТДТН-40000/35/10/6.
9. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТДТН-80000/110/10/6.
10. Рассчитать токи КЗ для выбора уставок релейной защиты силового трансформатора ТДТН-63000/220/35/10.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация видов коротких замыканий.
2. Каков алгоритм расчета токов короткого замыкания в схемах подстанций?
3. Для чего при расчетах токов КЗ вводятся базисные величины? Что они собой представляют?
4. С какой целью расчет токов КЗ ведут в относительных единицах?
5. Что представляет собой схема замещения, используемая для расчетов токов КЗ в схеме релейной защиты?
6. Чем отличается расчет для несимметричных КЗ?
7. Для каких классов напряжения рассчитываются токи несимметричных КЗ?

Практическое занятие 2

РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель — приобретение навыка расчета дифференциальной защиты силовых трансформаторов.

Задача. Освоить методику определения токов срабатывания в схемах дифференциальной релейной защиты.

Рекомендуемая литература

1. *Андреев, В. А.* Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учеб. пособие для вузов / В. А. Андреев. — Москва : Высшая школа, 2008. — 252 с. — ISBN 978-5-06-005828-4.
2. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / под общ. ред. В. В. Дрозда. — Москва : Альвис, 2012. — 631 с. — URL: www.iprbookshop.ru/22702.html (дата обращения: 29.04.2022). — ISBN 978-5-904098-21-6.
3. СТО 56947007-29.120.70.98-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства ООО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы» : стандарт организации : утвержден и введен в действие Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 13 сентября 2011 № 557 : введен впервые : дата введения 2011-09-13 / разработан: ООО «Исследовательский центр “Бреслер”». — [Москва] : ФСК ЕЭС, 2011. — 184 с. — URL: [www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.98-2011.pdf](http://fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.98-2011.pdf) (дата обращения: 04.05.2022).

ЗАДАНИЕ

Рассчитать уставки дифференциальной токовой защиты силового трансформатора.

Продольная дифференциальная защита выполняется на всех трансформаторах мощностью 6,3 МВА и более. Трансформаторы тока для продольной дифференциальной защиты должны устанавливаться со всех сторон защищаемого трансформатора. Коэффициенты

трансформации и схемы соединения трансформаторов тока выбираются с учетом соединения обмоток защищаемых силовых трансформаторов для выравнивания токов в цепи дифференциальной защиты, например: для силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда с землей — треугольник» и группой соединения 11, трансформаторы тока со стороны ВН должны соединяться в «треугольник», а со стороны НН должны соединяться в «звезду». При этом вторичные токи в плечах дифференциальной защиты при номинальном первичном токе определяется по выражению

$$I_{\text{ном.в}} = \frac{K_{\text{сх}} \cdot I_{\text{н}}}{K_{\text{I}}}, \quad (2.1)$$

где K_{I} — коэффициент трансформации трансформатора тока; $K_{\text{сх}}$ — коэффициент схемы, определяется видом повреждения, схемами соединения трансформаторов тока и обмоток защищаемого трансформатора.

Сторона защищаемого трансформатора, которой соответствует наибольший вторичный ток в плече защиты, принимается в расчете за основную. В случае выполнения дифференциальной защиты на базе реле типа РНТ необходимо определить коэффициент отстройки $K_{\text{отс}}$, характеризующий приемлемость выбранного числа витков реле. Если

$$K_{\text{отс}} = \frac{I_{\text{с.з}}}{I_{\text{нб.рас}}} < 1,3,$$

то следует принять для основной стороны новое число витков — ближайшее меньшее по отношению к принимавшемуся ранее (для реле типа РНТ — на один виток меньше). Затем производится перерасчет числа витков для других (не основных) сторон защищаемого трансформатора. Расчет повторяется до тех пор, пока действительный коэффициент отстройки защиты $K_{\text{отс}}$, рассчитанный по току срабатывания защиты, окажется примерно равным или большим 1,3.

По окончании расчета определяется чувствительность защиты при металлическом КЗ на вводах защищаемого трансформатора при работе его на расчетном ответвлении.

В соответствии с ПУЭ требуется обеспечить наименьший коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}} \geq 2$. Допускается снижение требуемого $K_{\text{ч}}$ примерно до 1,5 в следующих случаях:

- при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора мощностью менее 80 МВА;
- в режиме включения трансформатора под напряжение, а также для кратковременных режимов его работы (например, при отключении одной из питающих сторон);
- при КЗ за реактором, установленным на стороне низшего напряжения трансформатора и входящим в зону его дифференциальной защиты.

Дифференциальная защита может выполняться на базе реле типа ДЗТ. Реле ДЗТ наряду с уравнительными и рабочей обмотками, расчет числа витков которых аналогичен расчету реле РНТ, имеет тормозную обмотку, которая наматывается на том же НТТ.

Тормозная обмотка включается с той стороны силового трансформатора, при внешнем КЗ на которой в реле могут протекать наибольшие токи небаланса.

Основные рабочие цепи реле обычно включаются в плечо с наибольшим током, а уравнительные цепи — в плечи с меньшими токами.

Тормозные цепи дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора ГПП включаются со стороны низкого напряжения, а на двухобмоточных трансформаторах с расщепленной обмоткой — на сумму токов трансформаторов тока, установленных в цепи каждой расщепленной обмотки, с тем, чтобы торможение осуществлялось только при внешних КЗ.

В трехобмоточных трансформаторах дифференциальная защита выполняется с торможением, выбранным таким образом, чтобы оно было максимальным при внешних КЗ, сопровождающихся наибольшим током небаланса.

В частности, на понижающих трансформаторах рекомендуется включать тормозную цепь на сумму токов низкого и среднего напряжения, что обеспечивает торможение при сквозных КЗ и отсутствие торможения током КЗ при внутренних повреждениях. Если при использовании одной тормозной обмотки не удастся получить необходимую чувствительность, то следует применять защиты с тремя тормозными цепями, которые можно включать в разные плечи защиты.

В настоящее время все более широкое распространение получает выполнение дифференциальных защит на базе микропроцессорных устройств.

Пример

Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-16000/110, выполненной с помощью микропроцессорной релейной защиты на термине RET 670.

Исходные данные

Данные трансформатора:

- трехобмоточный трансформатор типа ТДТН-16000/110;
- схема и группы соединения обмоток «звезда/звезда/треугольник-0-11»;
- мощность = 16 МВА;
- номинальное напряжение обмоток: $115 \pm 9 \cdot 1,78\%$ 38,5 $\pm 2 \cdot 2,5\%$ 11 кВ.

Напряжения короткого замыкания:

- сторона 110 кВ $U_{KB-C} = 10,5\%$;
- сторона 35 кВ $U_{KB-H} = 17\%$;
- сторона 10 кВ $U_{KC-H} = 6\%$.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока:

- $K_{TT\text{ ВН}} = 300/5$;
- $K_{TT\text{ СН}} = 300/5$;
- $K_{TT\text{ НН}} = 1000/5$.

Максимальные и минимальные токи короткого замыкания:

КЗ на ВН:

- ток трехфазный максимальный = 4317 А;
- ток трехфазный минимальный = 1851 А.

КЗ на СН:

- ток трехфазный максимальный = 728 А;
- ток трехфазный минимальный = 504 А.

КЗ на НН:

- ток трехфазный максимальный = 487 А;
- ток трехфазный минимальный = 342 А.

Расчет дифференциальной защиты выполняется в следующей последовательности.

1. Необходимо выполнить проверку обеспечения цифрового выравнивания токов плеч защищаемого трансформатора, для этого определяются первичные номинальные токи:

$$I_{\text{ном.ВН}} = \frac{S_{\text{ном.ВН}}}{1,73U_{\text{ном.ВН}}} = \frac{16000}{1,73 \cdot 115} = 80,33 \text{ A};$$

$$I_{\text{ном.СН}} = \frac{S_{\text{ном.СН}}}{1,73U_{\text{ном.СН}}} = \frac{16000}{1,73 \cdot 37} = 239,94 \text{ A};$$

$$I_{\text{ном.НН}} = \frac{S_{\text{ном.НН}}}{1,73U_{\text{ном.НН}}} = \frac{16000}{1,73 \cdot 10,5} = 839,81 \text{ A}.$$

2. Определяются вторичные номинальные токи на сторонах трансформатора с учетом установки группы ТТ «звезда» со всех сторон защищаемого трансформатора, т. е. $K_{\text{сх}} = 1$ на всех сторонах трансформатора:

$$I_{\text{ном.в ВН}} = \frac{I_{\text{ном.ВН}} \cdot K_{\text{сх.ВН}}}{K_{\text{ТТ ВН}}} = \frac{80,33 \cdot 1}{300/5} = 1,34 \text{ A};$$

$$I = \frac{I_{\text{ном.СН}} \cdot K_{\text{сх.СН}}}{K_{\text{ТТ СН}}} = \frac{239,94 \cdot 1}{300/5} = 4 \text{ A};$$

$$I_{\text{ном.в НН}} = \frac{I_{\text{ном.НН}} \cdot K_{\text{сх.НН}}}{K_{\text{ТТ НН}}} = \frac{839,81 \cdot 1}{1000/5} = 4,2 \text{ A}.$$

По табл. 2.1 выбирается номинальный ток входа устройства для каждого плеча защиты и относительная погрешность выравнивания при $I_{\text{ном.в}} = 1-5$, соответственно $I_{\text{ном.т н}} = 5\text{A}$, $\Delta f_{\text{выр}}^* = 0,02$.

Таблица 2.1

Выбор рабочих ответвлений токовых входов устройства

Вторичный ток в номинальном режиме $I_{\text{ном.в н}}, \text{ A}$	Номинальный ток входа устройства $I_{\text{ном.т н}}, \text{ A}$	Относительная погрешность выравнивания $\Delta f_{\text{выр}}^*$
5–20	5	0,03
1–5	5	0,02

Окончание таблицы 2.1

Вторичный ток в номинальном режиме $I_{\text{ном.в } n}, \text{ А}$	Номинальный ток входа устройства $I_{\text{ном.т } n}, \text{ А}$	Относительная погрешность выравнивания $\Delta f_{\text{выр}}^*$
0,5–1,0	1	0,02
0,125–0,5	1	0,03
0,1–0,125	1	0,05

Проверка обеспечения цифрового выравнивания для всех сторон защищаемого трансформатора производится по выражению

$$0,1 < \frac{I_{\text{ном.в } n}}{I_{\text{ном.т } n}} < 4.$$

Со стороны ВН

$$0,1 < \frac{I_{\text{ном.в } n}}{I_{\text{ном.т } n}} = \frac{1,34}{5} = 0,27 < 4.$$

Со стороны СН

$$0,1 < \frac{I_{\text{ном.в } n}}{I_{\text{ном.т } n}} = \frac{4}{5} = 0,8 < 4.$$

Со стороны НН

$$0,1 < \frac{I_{\text{ном.в } n}}{I_{\text{ном.т } n}} = \frac{4,2}{5} = 0,84 < 4.$$

По результатам расчета получено, что для всех сторон цифровое выравнивание амплитуд токов плеч защиты обеспечивается.

3. Определяется расчетный коэффициент небаланса по уточненному выражению:

$$K_{\text{нб.расч}} = \sqrt{(K'_{\text{пер}} \cdot \epsilon^*)^2 \cdot [1 + 2(\Delta U_{\text{пер}}^* + \Delta f_{\text{выр}}^*)] + (\Delta U_{\text{пер}}^* + \Delta f_{\text{выр}}^*)^2},$$

где $K'_{\text{пер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный процесс, выбирается по табл. 2.2; $\varepsilon^* = 0,1$ — полная относительная погрешность ТТ в установившемся режиме; $\Delta f^*_{\text{выр}} = 0,02$ — относительная погрешность выравнивания токов плеч, выбранная ранее; $\Delta U^*_{\text{рег}}$ — относительная погрешность, принимается равной максимально возможному отклонению от номинального положения РПН $\Delta U_{\text{рег}} = \pm 16\%$ на стороне ВН.

В соответствии с таблицей 2.2 $K'_{\text{пер}} = 1$ для силового трансформатора мощностью не более 40 МВА и при отсутствии подключенных токоограничивающих реакторов на НН.

Таблица 2.2

Значения коэффициента переходного режима

Тип защищаемого объекта			$K'_{\text{пер}}$
ТСН электрических станций и другие понижающие трансформаторы, имеющие в составе нагрузки мощные двигатели напряжением 6 или 10 кВ			1,5
Трансформаторы связи и блочные трансформаторы электрических станций			1,7
Трансформаторы электрических сетей и автотрансформаторы, не имеющие в составе нагрузки со стороны НН мощных двигателей или синхронных компенсаторов	Силовые трансформаторы мощностью не более 40 МВА	со стороны НН нет подключенных токоограничивающих реакторов	1,0
		со стороны НН подключены токоограничивающие реакторы	1,2
	Силовые трансформаторы и автотрансформаторы мощностью 63 МВА и более		1,5

$$\begin{aligned}
 K_{\text{нб,расч}} &= \sqrt{(1 \cdot 0,1)^2 \cdot [1 + 2(0,16 + 0,02)] + (0,16 + 0,02)^2} = \\
 &= \sqrt{0,046} = 0,214.
 \end{aligned}$$

4. Определяется начальный дифференциальный ток срабатывания $I_{d \min}$:

$$I_{d \min} = K_{отс} \cdot K_{нб.расч} \cdot End \ Section \ 1 = 1,2 \cdot 0,214 \cdot 1,15 = 0,295,$$

где $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки; $K_{нб.расч}$ – расчетный коэффициент небаланса; *End Section 1* – начальный тормозной ток, принимается равным 1,15 по рекомендациям фирмы-производителя терминала «АВВ».

5. Проверяется чувствительность для горизонтального участка тормозной характеристики:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{диф.расч}}^*}{I_{\text{диф.ср}}^*} = \frac{3,7}{0,3} = 12,33 \geq 2 \Rightarrow \text{условие выполняется,}$$

где $I_{\text{диф.ср}}^*$ определяется по начальному дифференциальному току срабатывания $I_{d \min} = 0,3$ по рис. 2.1, соответственно относительный дифференциальный ток будет равен 0,3; $I_{\text{диф.расч}}^*$ – относительный расчетный минимальный дифференциальный ток при КЗ на выводах защищаемого трансформатора, в данном случае расчетный минимальный дифференциальный ток будет при КЗ на стороне НН.

$$I_{\text{диф.расч}}^* = \frac{I_{\text{КЗ min}}^{(2)}}{I_{\text{ном.ВН}}} = \frac{297}{80,33} = 3,7 \text{ А,}$$

где $I_{\text{КЗ min}}^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания в минимальном режиме на стороне НН.

Чувствительность при внутренних КЗ на горизонтальном участке тормозной характеристики обеспечена.

Чувствительность защиты на наклонных участках тормозной характеристики будет обеспечиваться всегда, так как выполняется условие:

$$\frac{I_{d \min}}{End \ Section \ 1} = \frac{0,3}{1,15} \leq 0,5.$$

6. Ток срабатывания дифференциальной отсечки $I_{d \text{ unre}}$.

По условию отстройки от режима броска тока намагничивания параметр срабатывания токового органа дифференциальной отсечки должен приниматься не менее 500 % от максимального тока небаланса.

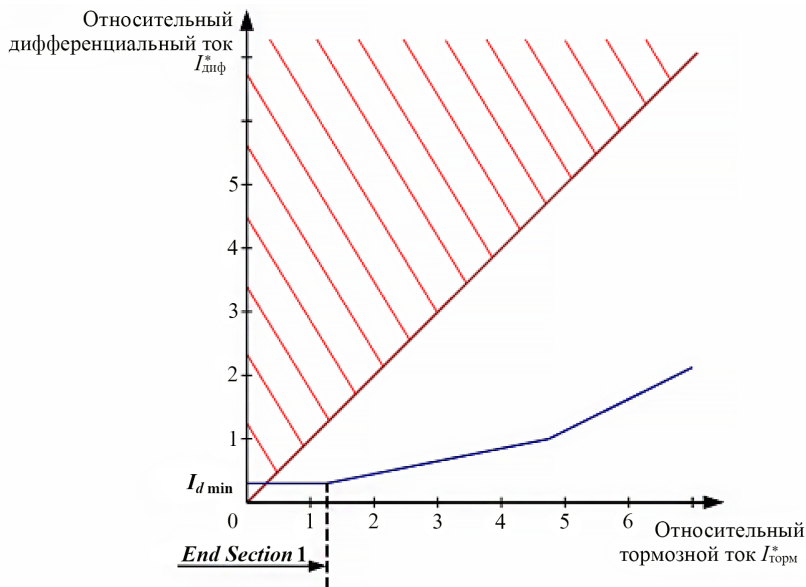


Рис. 2.1. Область тормозной характеристики, соответствующая внутренним КЗ

По условию отстройки от максимального тока небаланса при внешних повреждениях параметр срабатывания можно находить по выражению:

$$I_{d unre} \geq K_{отс} \cdot K_{нб(1)} \cdot I_{КЗ \max}^* \cdot 100 \% = 1,2 \cdot 0,65 \cdot \frac{728}{80,33} \cdot 100 = 707 \%,$$

где $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки; $K_{нб(1)}$ – отношение амплитуды первой гармоники тока небаланса к приведенной амплитуде периодической составляющей сквозного тока. Согласно рекомендациям фирмы «ABB», для трансформаторов с расщепленной обмоткой коэффициент отстройки принимается равным 0,65 при использовании со всех сторон ТТ с вторичным номинальным током 5 А; $I_{КЗ \max}^*$ – относительный максимальный ток при внешнем КЗ, определяется по формуле:

$$I_{КЗ}^* = \frac{I_{КЗ \max}}{I_{ном.осн}},$$

где $I_{K3 \max}$ — максимальный ток при внешнем КЗ, приведенный к основной стороне (сторона ВН); $I_{\text{ном.осн}}$ — номинальный ток основной стороны (сторона ВН) защищаемого трансформатора.

Значение тока срабатывания дифференциальной отсечки в процентах рекомендуется округлять до десятков, принимается $I_{d \text{ unre}} = 707\%$ ($I_{d \text{ unre}} = 7,1$).

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТРДН-25000/110/10.
2. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-63000/110/35/6.
3. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТРДН-63000/220/10.
4. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-40000/110/10/6.
5. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТРДН-25000/110/10.
6. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-63000/220/110/6.
7. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-80000/220/10/6.
8. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-40000/35/10/6.
9. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-80000/110/10/6.
10. Рассчитать уставки дифференциальной защиты трансформатора типа ТДТН-63000/220/35/10.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение дифференциальной защиты.
2. Принцип действия дифференциальной защиты.
3. Что такое продольная дифференциальная защита?
4. Что такое поперечная дифференциальная защита?
5. В чем заключается принципиальное отличие дифференциальной защиты от остальных видов токовых защит?

Практическое занятие 3

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Цель — приобретение навыка расчета максимальной токовой защиты силовых трансформаторов и секционных выключателей.

Задача. Освоить методику определения токов срабатывания в схемах максимальной токовой защиты.

Рекомендуемая литература

1. *Андреев, В. А.* Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учеб. пособие для вузов / В. А. Андреев. — Москва : Высшая школа, 2008. — 252 с. — ISBN 978-5-06-005828-4.
2. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / под общ. ред. В. В. Дрозда. — Москва : Альвис, 2012. — 631 с. — URL: www.iprbookshop.ru/22702.html (дата обращения: 29.04.2022). — ISBN 978-5-904098-21-6.
3. *Соловьев, А. Л.* Методические указания по выбору параметров срабатывания релейной защиты и автоматики современного микропроцессорного многофункционального устройства типа SEPAM производства компании Schneider Electric : метод. указания с примерами / А. Л. Соловьев. — [Б. м.] : Schneider Electric, 2006. — (Техническая коллекция Schneider Electric ; вып. 3. Методика расчета уставок защит Sepam). — 70 с.

ЗАДАНИЕ 1

Рассчитать уставки максимальной токовой защиты силового трансформатора.

На двухобмоточных понижающих трансформаторах защита устанавливается со стороны источника питания, тогда в зону ее действия попадет и сам трансформатор. В сетях с глухозаземленной нейтралью используется трехрелейная схема для отключения трансформатора при КЗ в любой фазе, а в сетях с изолированной нейтралью применяют двухрелейное исполнение по схеме неполной «звезды». В трансформаторах с расщепленной обмоткой НН в дополнение к токовой защите, расположенной со стороны питания,

устанавливаются защиты со стороны каждой обмотки НН с целью селективного отключения поврежденной цепи. На трехобмоточных трансформаторах устанавливается три комплекта защит. Комплект токовых защит со стороны питания резервирует комплекты двух обмоток (СН, НН), а также основную защиту трансформатора (например, дифференциальную защиту).

Выдержка времени комплекта со стороны ВН выбирается на ступень селективности $\Delta t = 0,5$ с наибольшей из выдержек времени двух других комплектов. Чувствительность защиты оценивается коэффициентом

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з}}}. \quad (3.1)$$

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5 при КЗ на шинах и не менее 1,2 при КЗ в конце зоны резервирования. При недостаточной чувствительности токовые защиты дополняются «пуском» по напряжению.

Пример

Рассчитать уставки токовой отсечки и максимальной токовой защиты трансформатора типа TS-400, выполненной с помощью микропроцессорного устройства SEPAM.

Исходные данные:

- мощность трансформатора: $S_{\text{ном}} = 400$ кВА;
- схема соединения обмоток трансформатора 10/0,4 – $\Delta/Y_{\text{н}}$;
- ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме:
 $I_{\text{КЗ min}} = 11,47$ кА;
- напряжение: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ;
- напряжение короткого замыкания для двухобмоточного трансформатора типа TS-400: $U_{\text{к}} \% = 4\%$;
- длина линии: $L = 300$ м;
- кабель – АПвВнг, 3×95 мм²;
- коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_{\text{ТТ}} = 100/5$;
- вторичные обмотки трансформаторов тока выполнены по схеме «полная звезда»;
- тип защиты – SEPAM.

Чтобы токовая отсечка (ТО) срабатывала селективно, нужно отстраивать ее от токов КЗ за трансформатором, то есть на стороне 0,4 кВ. Также нужно обеспечить, чтобы токовая отсечка не срабатывала во время бросков тока намагничивания. Уставка срабатывания ТО должна выбираться больше тока трехфазного КЗ на стороне 0,4 кВ. Зона действия токовой отсечки охватывает питающий кабель 10 кВ от ячейки 10 кВ до силового трансформатора и часть обмоток трансформатора. Для начала рассчитывается ток трехфазного КЗ на стороне 0,4 кВ (рис. 3.1).

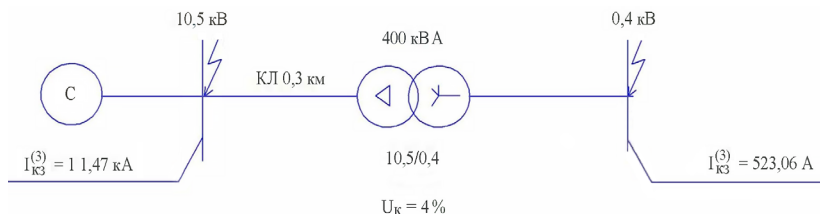


Рис. 3.1. Расчетная схема защищаемой линии

Исходя из расчетной схемы, составляем схему замещения (рис. 3.2).

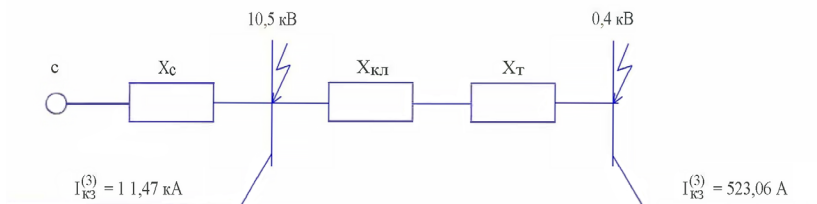


Рис. 3.2. Схема замещения

Расчет ведется в именованных единицах. Активные сопротивления элементов схемы замещения не учитываются.

Определяется сопротивление системы:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ \min}^{(3)}} = \frac{10,5}{1,73 \cdot 11,47} = 0,53 \text{ Ом},$$

где $U_c = 10,5 \text{ кВ}$ – напряжение среднее (для расчета токов КЗ принимается в соответствии с табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Междуфазные напряжения электрических
распределительных сетей трехфазного тока**

Напряжение, кВ		
Номинальное	Наибольшее	Среднее (для расчетов токов КЗ)
0,22/0,127	—	0,22/0,127
0,38/0,22	0,4/0,23	0,4/0,23
0,66/0,38	0,69/0,4	0,69/0,4
3	3,5	3,15
6	6,9	6,3
10	11,5	10,5
20	23,0	20,0
35	40,5	37,0
110	126,0	115,0
150	172,0	154,0
220	252,0	230,0
330	373,0	330,0

Сопротивление кабеля находится по формуле

$$X_K = \frac{1}{n} \cdot X_{уд} \cdot L = \frac{1}{1} \cdot 0,121 \cdot 0,3 = 0,0363 \text{ Ом},$$

где $X_{уд} = 0,121 \text{ Ом/км}$ — удельное сопротивление кабеля АПВнг, $3 \times 95 \text{ мм}^2$ (выбирается из каталожных данных завода-изготовителя); n — количество кабельных линий; L — длина защищаемой линии, км.

Полученная величина сопротивления кабеля невелика, и можно сопротивление кабеля не учитывать при расчете токов КЗ.

Определяется сопротивление двухобмоточного трансформатора, приведенное к ВН:

$$X_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_c^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10,5^2}{0,4} = 11,025 \text{ Ом.}$$

Далее определяется суммарное сопротивление:

$$X_\Sigma = X_c + X_k + X_T = 0,53 + 0,0363 + 11,025 = 11,59 \text{ Ом.}$$

Определяется ток трехфазного КЗ при возникновении повреждения за трансформатором, приведенный к ВН:

$$I_{\text{КЗ max НН}}^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot X_\Sigma} = \frac{10,5 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 11,59} = 523,06 \text{ А.}$$

Далее определяется первичный ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{с.з1}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ max НН}}^{(3)} = 1,1 \cdot 523,06 = 575,37 \text{ А,}$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, для SEPAM равен 1,1–1,15, согласно рекомендациям Schneider Electric.

Вычисляется бросок тока намагничивания трансформатора:

$$I_{\text{с.з2}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot K_{\text{бр}} = 1,1 \cdot 23,12 \cdot 5 = 127,16 \text{ А,}$$

где $K_{\text{бр}} = 3\text{--}5$ – коэффициент броска тока намагничивания, принимается $K_{\text{бр}} = 5$, согласно рекомендациям Schneider Electric.

За расчетный ток принимается наибольший ток срабатывания защиты – 575,37 А.

Определяется ток срабатывания реле:

$$I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_T} = \frac{575,37 \cdot 1}{100/5} = 28,77 \text{ А,}$$

где $K_{\text{сх}} = 1$ – когда вторичные обмотки трансформаторов тока выполнены по схеме «полная звезда»; $n_T = 100/5$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Коэффициент чувствительности защиты рассчитывается для случая двухфазного КЗ для схемы трехрелейного исполнения.

$$K_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{КЗ min}}^{(3)}}{n_T \cdot I_{\text{с.р}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{11470}{100/5 \cdot 28,77} = 17,26.$$

Коэффициент чувствительности соответствует требованиям ПУЭ (раздел 3.2.21, пункт 8), согласно которым он должен быть больше 2.

Выбирается время срабатывания токовой отсечки. В данном случае токовая отсечка будет срабатывать мгновенно, без выдержки времени, то есть $t = 0$ с.

Максимальная токовая защита должна отстраиваться от максимального рабочего тока с учетом того, что возможен самозапуск электродвигателей 0,4 кВ.

Максимальный рабочий ток определяется по формуле

$$I_{\max} = \frac{K_3 \cdot S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}} = \frac{1,1 \cdot 400}{1,73 \cdot 10} = 25,4 \text{ А},$$

где $K_3 = 1,1$.

Определяется первичный ток срабатывания МТЗ:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{K_{\text{н}} \cdot K_{\text{сзп}} \cdot I_{\max}}{K_{\text{в}}} = \frac{1,1 \cdot 1,3 \cdot 25,4}{0,935} = 38,8 \text{ А},$$

где $K_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, для терминалов SEPAM принимается 1,1; $K_{\text{в}}$ — коэффициент возврата, для терминалов SEPAM принимается 0,935; $K_{\text{сзп}}$ — коэффициент самозапуска электродвигателей обобщенной нагрузки, если двигатели не оборудованы устройством самозапуска, принимается $1,2 \div 1,3$.

Определяется ток срабатывания реле:

$$I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{т}}} = \frac{38,8 \cdot 1}{100/5} = 1,94 \text{ А},$$

где $K_{\text{сх}} = 1$, берется по аналогии из расчета ТО; $n_{\text{т}} = 100/5$.

Коэффициент чувствительности необходимо проверять при наименее благоприятных условиях. В данном примере для трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y-11$ наименее благоприятным является однофазное КЗ на землю на стороне 0,4 кВ.

Однофазный ток КЗ на стороне 0,4 кВ примерно равен трехфазному току КЗ, так как у этих трансформаторов полные сопротивления прямой и нулевой последовательности практически равны.

Ток в реле при однофазном КЗ за трансформатором определяется по следующей формуле:

$$I_{p.\min} = \frac{I_{K3}^{(1)}}{\sqrt{3} \cdot n_T} = \frac{523}{1,73 \cdot 100/5} = 15,1 \text{ А.}$$

Определяется коэффициент чувствительности при однофазном КЗ за трансформатором для полной «звезды» с тремя реле:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{p.\min}}{I_{c.p}} = \frac{15,1}{1,94} = 7,78.$$

Согласно ПУЭ коэффициент чувствительности МТЗ должен быть больше 1,5 в основной зоне защиты.

Чтобы МТЗ работала селективно, нужно отстраиваться от времени срабатывания предыдущих защит, в данном случае это вводный автомат на стороне 0,4 кВ, время его срабатывания $t_{\text{сз.пред}} = 0,3 \text{ с.}$

Для терминалов SEPAM применяется ступень селективности $\Delta t = 0,3 \text{ с.}$ В результате время срабатывания МТЗ определяется по формуле

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{сз.пред}} + \Delta t = 0,3 + 0,3 = 0,6 \text{ с.}$$

ЗАДАНИЕ 2

Рассчитать параметры максимальной токовой защиты секционного выключателя.

Релейная защита выключателей вводов защищает в основном шины подстанции. Единственной защитой самого вводного выключателя можно считать защиту от перегрузки. Несмотря на это, обычно говорят именно про защиты и автоматику ввода. Ввод интересен тем, что здесь основной защитой становится не МТЗ, а логическая защита шин (ЛЗШ). Она действует на всем защищаемом участке (шины), защищает от всех видов КЗ и срабатывает быстрее всех остальных защит. Если ЛЗШ нет, то МТЗ ввода из резервной защиты превращается в основную.

Дуговая защита применяется на вводе распределительных устройств с воздушной и твердой изоляцией. Дуговая защита действует на отключение ввода и секционного выключателя, если дуговое замыкание происходит в отсеке сборных шин или отсеке выключателя.

Дуговая защита – самая быстродействующая на среднем напряжении. Обычно время ее срабатывания находится в пределах 30–50 мс. Для секционного выключателя (СВ) защиты практически аналогичны защита вводу – 6(10) кВ. Необходимо учитывать, что в СВ сходятся сигналы присоединений обеих секций. Секционный выключатель 6(10) кВ – это своего рода узел, куда сводится множество защитных сигналов. Поэтому в терминале СВ должно быть достаточно дискретных входов.

Пример

Рассчитать параметры максимальной токовой защиты секционного выключателя, выполненной на микропроцессорном терминале SEPAM 1000+S80 компании Schneider Electric.

Исходные данные

1. Параметры питающей системы:

- $U_{\text{ср.ном}} = 6,3 \text{ кВ}$ – среднее номинальное напряжение системы;
- $I_{\text{КЗ max}} = 7900 \text{ А}$ – ток КЗ системы в максимальном режиме на шинах НН;
- $I_{\text{КЗ min}} = 7400 \text{ А}$ – ток КЗ системы в минимальном режиме на шинах НН.

2. Характеристики трансформатора ТДН-16000/110:

- $S_{\text{т.ном}} = 16 \text{ МВА}$ – номинальная мощность трансформатора;
- $U_{\text{ном.ВН}} = 115 \text{ кВ}$ – номинальное напряжение стороны ВН;
- $U_{\text{ном.НН}} = 6,3 \text{ кВ}$ – номинальное напряжение стороны НН;
- $U_{\text{к. min}} = 10,09 \%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора.

3. Характеристики асинхронных двигателей типа 1RA1 компании SIEMENS на I секции шин:

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ	Коэффициент пуска	Номинальное напряжение, кВ
1RA1 350-2HA60	500	94,3	0,89	5,5	6,3
1RA1 352-2HA60	630	94,3	0,9	5,2	6,3
1RA1 402-2HA60	1000	94,9	0,89	4,6	6,3

Характеристики асинхронных двигателей типа 1RA1 компании SIEMENS на II секции шин:

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ	Коэффициент пуска	Номинальное напряжение, кВ
1RA1 350-2HA60	500	94,3	0,89	5,5	6,3
1RA1 350-2HA60	500	94,3	0,89	5,5	6,3
1RA1 352-2HA60	630	94,3	0,9	5,2	6,3
1RA1 402-2HA60	1000	94,9	0,89	4,6	6,3
1RA1 402-2HA60	1000	94,9	0,89	4,6	6,3

4. Два трансформатора напряжением 6/0,4 кВ и мощностью 400 и 2000 кВА на каждой секции шин.

Перед тем как считать ток срабатывания МТЗ СВ, необходимо рассчитать коэффициент самозапуска $K_{сзп}$ для I и II секции шин 6 кВ.

Определяется максимальный рабочий ток для асинхронных двигателей:

$$I_{раб.мах1} = \frac{P_{ном,дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{500}{1,73 \cdot 6,3 \cdot 0,943 \cdot 0,89} = 55 \text{ А};$$

$$I_{раб.мах2} = \frac{P_{ном,дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{630}{1,73 \cdot 6,3 \cdot 0,943 \cdot 0,9} = 68,1 \text{ А};$$

$$I_{раб.мах3} = \frac{P_{ном,дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1000}{1,73 \cdot 6,3 \cdot 0,949 \cdot 0,89} = 109 \text{ А}.$$

Определяется максимальный рабочий ток для трансформаторов 6/0,4 кВ мощностью 400 и 2000 кВА:

$$I_{\text{раб.мах1}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{400}{1,73 \cdot 6,3} = 36,7 \text{ А};$$

$$I_{\text{раб.мах2}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{2000}{1,73 \cdot 6,3} = 184 \text{ А}.$$

Определяется пусковой ток для асинхронных двигателей:

$$I_{\text{пуск 500 кВт}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{раб.мах}} = 5,5 \cdot 55 = 302,5 \text{ А};$$

$$I_{\text{пуск 630 кВт}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{раб.мах}} = 5,2 \cdot 68,1 = 354 \text{ А};$$

$$I_{\text{пуск 1000 кВт}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{раб.мах}} = 4,6 \cdot 109 = 501,4 \text{ А}.$$

Определяется пусковой ток для трансформаторов 6/0,4 кВ.

Для определения пускового тока трансформаторов 6/0,4 кВ необходимо знать характер нагрузки на стороне 0,4 кВ. В случае неизвестности характера нагрузки рекомендуется использовать сопротивление обобщенной нагрузки $x_{\text{нагр}^*} = 0,35$ о. е. Значение сопротивления $x_{\text{нагр}^*} = 0,35$ о. е. соответствует коэффициенту самозапуска $K_{\text{сзп}} = 2,9$.

$$I_{\text{пуск 400 кВА}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{раб.мах}} = 2,9 \cdot 36,7 = 106,43 \text{ А}.$$

$$I_{\text{пуск 2000 кВА}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{раб.мах}} = 2,9 \cdot 184 = 533,6 \text{ А}.$$

Определяется максимальный рабочий ток I секции шин 6 кВ:

$$I_{\text{раб.мах}} = \sum I_{\text{раб.мах } i} = 55 + 68,1 + 109 + 109 + 36,7 + 184 = 561,8 \text{ А}.$$

Сопротивление системы в максимальном режиме

$$x_{\text{с max}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к3 max}}} = \frac{6,3}{1,73 \cdot 7,9} = 0,46 \text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора

$$x_{\text{т min}} = \frac{U_{\text{к min}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,09}{100} \cdot \frac{6,3^2}{16} = 0,25 \text{ Ом}.$$

Рассчитывается суммарный пусковой ток на I секции шин 6 кВ:

$$I_{\text{пуск}} = \sum I_{\text{пуск}} = 302,5 + 354 + 501,4 + 501,4 + \\ + 106,43 + 533,6 = 2299,3 \text{ А.}$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки определяется по следующей формуле:

$$x_{\text{нагр}} = \frac{U_{\text{нагр.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск}}} = \frac{6300}{1,73 \cdot 2299,3} = 1,58 \text{ Ом.}$$

Ток самозапуска равен:

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с max}} + x_{\text{т min}} + x_{\text{нагр}})} = \\ = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot (0,46 + 0,25 + 1,58)} = 1590 \text{ А,}$$

где $U_{\text{с.ном}}$ – среднее номинальное напряжение, В; $x_{\text{с max}}$ – сопротивление системы в максимальном режиме, Ом; $x_{\text{т min}}$ – минимальное сопротивление трансформатора, Ом; $x_{\text{нагр}}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки, Ом.

Коэффициент самозапуска определяется по формуле

$$K_{\text{сзп}} = \frac{I_{\text{сзп}}}{I_{\text{раб.мах}}} = \frac{1590}{561,8} = 2,83.$$

Аналогично определяется $K_{\text{сзп}}$ для II секции шин 6 кВ. В результате расчетов получены значения:

$$I_{\text{раб.мах}} = \sum I_{\text{раб.мах } i} = 55 + 55 + 68,1 + 109 + \\ + 109 + 36,7 + 184 = 616,8 \text{ А;}$$

$$I_{\text{пуск}} = \sum I_{\text{пуск}} = 302,5 + 302,5 + 354 + 501,4 + 501,4 + \\ + 106,43 + 533,6 = 2601,8 \text{ А;}$$

$$x_{\text{нагр}} = \frac{U_{\text{нагр.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск}}} = \frac{6300}{1,73 \cdot 2601,8} = 1,4 \text{ Ом};$$

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с max}} + x_{\text{т min}} + x_{\text{нагр}})} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot (0,46 + 0,25 + 1,4)} = 1726 \text{ А};$$

$$K_{\text{сзп}} = \frac{I_{\text{сзп}}}{I_{\text{раб.мах}}} = \frac{1726}{616,8} = 2,8.$$

Выбираются параметры срабатывания МТЗ секционного выключателя.

Определяется ток срабатывания МТЗ из условия отстройки от самозапуска двигателей нагрузки после восстановления питания действием АВР:

$$I_{\text{с.ш}} = \frac{K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.мах}}}{K_{\text{в}}} = \frac{1,2 \cdot 2,8 \cdot 561,8}{0,935} = 2019 \text{ А};$$

$$I_{\text{ш.ш}} = \frac{K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб.мах}}}{K_{\text{в}}} = \frac{1,2 \cdot 2,8 \cdot 616,8}{0,935} = 2217 \text{ А},$$

где $K_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас; $K_{\text{сзп}} = 2,8$ – коэффициент самозапуска; $K_{\text{в}} = 0,935$ – коэффициент возврата, для микропроцессорных терминалов SEPAM 1000+.

Согласование МТЗ с защитой отходящей линии производится по формуле

$$\begin{aligned} I_{\text{с.з}} &= \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{ток}}} \cdot \left(I_{\text{с.з max}} + \sum I_{\text{раб}} \right) = \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{ток}}} \times \\ &\times \left(I_{\text{с.з max}} + (I_{\text{раб.мах}} - I_{\text{раб.мах присоед}}) \right) = \\ &= \frac{1,2}{1} \cdot (309 + (616,8 - 184)) = 890,16 \text{ А}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{ток}}$ – коэффициент токораспределения, принимается равным 1, когда один источник питания; $I_{\text{с.з max}} = 309 \text{ А}$ – наибольший ток срабатывания защит из присоединений, в примере это трансформатор мощностью 2000 кВА как для первой, так и для второй секции шин; $\sum I_{\text{раб}}$ – суммарный ток нагрузки всех элементов, за исключением

тех, с защитами которых производится согласование. В примере согласование производится с присоединением трансформатора 2000 кВА, максимально рабочий ток для данного присоединения равен $I_{\text{раб.мах присоед}} = 184 \text{ А}$.

Принимается ток срабатывания МТЗ секционного выключателя, равный 2217 А.

Время срабатывания МТЗ секционного выключателя выбирается по условию обеспечения селективности с защитами присоединений обеих секций шин. По условию время срабатывания защит присоединений равно 0,6 с, степень селективности для терминалов SEPAM принимается равной 0,3 с. Следовательно, время срабатывания МТЗ секционного выключателя равно 0,9 с.

В конце расчетов обязательно проводится проверка чувствительности рассчитанной защиты.

Определяется чувствительность МТЗ при двухфазном КЗ в минимальном режиме по формуле

$$K_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{КЗ min}}}{I_{\text{МТЗ.СВ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{7400}{2217} = 2,89 \geq 1,5 \text{ (условие выполняется).}$$

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать уставки токовой отсечки трансформатора типа ТСЗ-2500/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 15,47 \text{ кА}$; длина линии $L = 500 \text{ м}$; кабель – АПВВнг, $3 \times 95 \text{ мм}^2$.
2. Рассчитать уставки токовой отсечки трансформатора типа ТСЗ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 10,47 \text{ кА}$; длина линии $L = 400 \text{ м}$; кабель – АПВВнг, $3 \times 70 \text{ мм}^2$.
3. Рассчитать уставки токовой отсечки трансформатора типа ТСЗ-630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 9,47 \text{ кА}$; длина линии $L = 300 \text{ м}$; кабель – АПВВнг, $3 \times 50 \text{ мм}^2$.
4. Рассчитать уставки токовой отсечки трансформатора типа ТМ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 12,47 \text{ кА}$; длина линии $L = 700 \text{ м}$; кабель – АПВВнг, $3 \times 70 \text{ мм}^2$.

5. Рассчитать уставки токовой отсечки трансформатора типа ТМ – 630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 12,47$ кА; длина линии $L = 600$ м; кабель – АПВВнг, 3×95 мм².
6. Рассчитать уставки МТЗ трансформатора типа ТМ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 11,47$ кА; длина линии $L = 300$ м; кабель – АПВВнг, 3×50 мм².
7. Рассчитать уставки МТЗ трансформатора типа ТМ-630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 9,47$ кА; длина линии $L = 300$ м; кабель – АПВВнг, 3×95 мм².
8. Рассчитать уставки МТЗ трансформатора типа ТСЗ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 10,47$ кА; длина линии $L = 800$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².
9. Рассчитать уставки МТЗ трансформатора типа ТСЗ-2500/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 15,47$ кА; длина линии $L = 500$ м; кабель – АПВВнг, 3×120 мм².
10. Рассчитать уставки МТЗ трансформатора типа ТСЗ-630/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 11,47$ кА; длина линии $L = 700$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².
11. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-2500/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 15,47$ кА; длина линии $L = 500$ м; кабель – АПВВнг, 3×95 мм².
12. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 10,47$ кА; длина линии $L = 400$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².
13. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 9,47$ кА; длина линии $L = 300$ м; кабель – АПВВнг, 3×50 мм².
14. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТМ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 12,47$ кА; длина линии $L = 700$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².

15. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТМ-630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 12,47$ кА; длина линии $L = 600$ м; кабель – АПВВнг, 3×95 мм².
16. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТМ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 11,47$ кА; длина линии $L = 300$ м; кабель – АПВВнг, 3×50 мм².
17. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТМ-630/6/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 6 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 9,47$ кА; длина линии $L = 300$ м; кабель – АПВВнг, 3×95 мм².
18. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-250/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 10,47$ кА; длина линии $L = 800$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².
19. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-2500/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 15,47$ кА; длина линии $L = 500$ м; кабель – АПВВнг, 3×120 мм².
20. Рассчитать уставки токовой отсечки и МТЗ трансформатора типа ТСЗ-630/10/0,4, если ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в минимальном режиме: $I_{\text{КЗ min}} = 11,47$ кА; длина линии $L = 700$ м; кабель – АПВВнг, 3×70 мм².
21. Рассчитать уставки МТЗ секционного выключателя, если известно:
Система: $U_{\text{ср.ном}} = 10,5$ кВ; $I_{\text{КЗ max}} = 7900$ А; $I_{\text{КЗ min}} = 7400$ А. Трансформатор ТРДН-25000/110. Асинхронные двигатели (2 штуки) напряжением 10 кВ, мощностью по 500 кВт на I секции шин, мощностью по 1000 кВт (3 штуки) на II секции шин. Два трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и мощностью 630 и 1000 кВА на каждой секции шин.
22. Рассчитать уставки МТЗ секционного выключателя, если известно:
Система: $U_{\text{ср.ном}} = 10,5$ кВ; $I_{\text{КЗ max}} = 8200$ А; $I_{\text{КЗ min}} = 7800$ А. Трансформатор ТРДН-40000/220. Асинхронные двигатели (по 3 штуки) напряжением 10 кВ, мощностью по 830 кВт на I и II секциях шин. Три трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и мощностью 400, 630 и 1000 кВА (400 кВА на I секции, 630 и 1000 кВА на II секции шин).

23. Рассчитать уставки МТЗ секционного выключателя, если известно:
Система: $U_{\text{ср.ном}} = 6,3 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ max}} = 6900 \text{ А}$; $I_{\text{КЗ min}} = 5400 \text{ А}$. Трансформатор ТДН-25000/35. Асинхронные двигатели (2 штуки) напряжением 6 кВ, мощностью по 1000 кВт на I секции шин. Четыре трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и мощностью 400, 250 и 630 кВА (два по 400 кВА на I секции, 250 и 630 кВА на II секции шин).
24. Рассчитать уставки МТЗ секционного выключателя, если известно:
Система: $U_{\text{ср.ном}} = 6,3 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ max}} = 7600 \text{ А}$; $I_{\text{КЗ min}} = 6800 \text{ А}$. Трансформатор ТРДН-63000/110. Асинхронные двигатели (2 штуки) напряжением 6 кВ, мощностью по 500 кВт на I секции шин, один трансформатор напряжением 6/0,4 кВ, мощностью 400 кВА на II секции шин.
25. Рассчитать уставки МТЗ секционного выключателя, если известно:
Система: $U_{\text{ср.ном}} = 10,5 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ max}} = 10200 \text{ А}$; $I_{\text{КЗ min}} = 9800 \text{ А}$. Трансформатор ТРДН-40000/110. Асинхронные двигатели (по 3 штуки) напряжением 10 кВ, мощностью по 1000 кВт на I и II секциях шин. Два трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и мощностью 250 и 630 кВА (250 кВА на I секции, 630 кВА на II секции шин).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение токовой отсечки.
2. Принцип действия токовой отсечки.
3. Назначение МТЗ.
4. Принцип действия МТЗ.
5. В чем заключается принципиальное отличие МТО от МТЗ?
6. Виды защит выключателя.
7. МТЗ выключателя.
8. Дуговая защита.
9. Логическая защита шин.
10. Устройство резервирования отказа выключателя.

Практическое занятие 4

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Цель – приобретение навыка расчета токовых защит электродвигателей.

Задача. Освоить методику определения токов срабатывания в схемах токовых защит электродвигателей высокого напряжения.

Рекомендуемая литература

1. *Андреев, В. А.* Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учеб. пособие для вузов / В. А. Андреев. – Москва : Высшая школа, 2008. – 252 с. – ISBN 978-5-06-005828-4.
2. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / под общ. ред. В. В. Дрозда. – Москва : Альвис, 2012. – 631 с. – URL: www.iprbookshop.ru/22702.html (дата обращения: 29.04.2022). – ISBN 978-5-904098-21-6.

ЗАДАНИЕ

Рассчитать параметры срабатывания защит двигателей.

Согласно ПУЭ с целью эффективной защиты двигателей от междуфазных коротких замыканий с номинальной мощностью до 5 МВт следует устанавливать максимальную токовую отсечку, коэффициенты которой необходимо выбрать с учетом отстройки от токов внешних коротких замыканий и пусковых токов двигателя.

Междуфазные короткие замыкания (3- и 2-фазные) могут возникать в сетях с заземленной и изолированной нейтралью. Они приводят к значительным повреждениям обмотки, а порой и разрушению магнитопровода статора. Также эти замыкания являются следствием снижения напряжения питающей сети, что снижает эффективность работы других электроприемников. Поэтому защита от междуфазных коротких замыканий в обязательном порядке должна быть установлена.

Пример

Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 6,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.

Ток срабатывания отсечки определяется по формуле

$$I_{\text{co}} \geq K_{\text{отс}} \cdot I''_{\text{max}},$$

где $K_{\text{отс}} = 1,4$ – коэффициент отстройки; I''_{max} – для асинхронного двигателя равен пусковому току.

$$I''_{\text{max}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}}$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Расчет производится в именованных единицах:

$$S_{\text{ном}} = \frac{2,2}{0,97 \cdot 0,88} = 2,6 \text{ МВА};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{2,58}{\sqrt{3} \cdot 6} = 248 \text{ А};$$

$$I''_{\text{max}} = 5,2 \cdot 248 = 1292 \text{ А};$$

$$I_{\text{co}} \geq 1,4 \cdot 1292 = 1809 \text{ А}.$$

Ток срабатывания реле определяется по формуле

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{co}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{ТА}}}.$$

Выбор трансформатора тока производится из набора номинальных значений: 50/5; 100/5; 200/5; 300/5... Выбираем 300/5, так как $I_{\text{ном}} = 248 \text{ А}$. $K_{\text{сх}} = 1$ при соединении трансформаторов тока в «звезду» и $K_{\text{сх}} =$ при соединении трансформаторов тока в «треугольник»; $n_{\text{ТА}}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока.

$$I_{\text{ср}} = \frac{1809 \cdot 1}{60} = 30,15 \text{ A}$$

Проверяется чувствительность защиты:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{min}}^{(2)}}{I_{\text{со}}} > 2,$$

где $K_{\text{ч}} = \frac{6,46 \cdot 10^3}{1809} = 3,57$ – защита по чувствительности проходит.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 3,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 6,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
2. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 2,5 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 5,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 4,2$.
3. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 1,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 8,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
4. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 4,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 6,16 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 3,2$.
5. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 5,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 9,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 6,2$.
6. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 6,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 12,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 4,2$.
7. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 7,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 6,17 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 3,2$.
8. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 8,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 4,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
9. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 9,2 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 3,46 \text{ кА}$; $K_{\text{пуск}} = 2,2$.

10. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 2,2$ МВт; $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 9,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
11. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 2,7$ МВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 3,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 3,2$.
12. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 2,9$ МВт; $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 5,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
13. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 4,8$ МВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 3,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 2,2$.
14. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 12$ МВт; $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 3,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.
15. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки электродвигателя, если известно: $P_{\text{ном}} = 15$ МВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = 7,46$ кА; $K_{\text{пуск}} = 5,2$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Виды защит двигателей.
2. Токовая отсечка двигателей.
3. МТЗ двигателей.
4. Дифференциальная защита двигателей.
5. Тепловая защита двигателей.
6. Выбор параметров МТЗ двигателя.
7. Выбор параметров тепловой защиты двигателя.
8. Условия самозапуска двигателей.
9. Влияние режима самозапуска на расчет релейной защиты двигателей.
10. Проверка чувствительности защиты.

Практическое занятие 5

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

Цель — приобретение навыка расчета токовых защит линий.

Задача. Освоить методику определения токов срабатывания в схемах токовых защит линий высокого напряжения.

Рекомендуемая литература

1. *Андреев, В. А.* Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учеб. пособие для вузов / В. А. Андреев. — Москва : Высшая школа, 2008. — 252 с. — ISBN 978-5-06-005828-4.
2. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / под общ. ред. В. В. Дрозда. — Москва : Альвис, 2012. — 631 с. — URL: www.iprbookshop.ru/22702.html (дата обращения: 29.04.2022). — ISBN 978-5-904098-21-6.

ЗАДАНИЕ

Рассчитать параметры срабатывания защит линий.

Воздушные и кабельные линии электропередачи, имея большую протяженность, подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электрическое оборудование. Особенно это относится к воздушным линиям, которые подвержены повреждениям от грозовых ударов, гололеда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и т. п. Кабельные линии, проложенные в земле, могут повреждаться из-за ухудшения условий: охлаждения, коррозии оболочек кабеля, осадки почвы, а также при земляных работах.

Как указанные выше, так и другие причины повреждений могут вызывать короткие замыкания фаз между собой и на землю. Поэтому для быстрого отключения поврежденных линий они должны быть оборудованы релейной защитой, действующей на отключение.

При этом в электрических сетях, работающих с заземленными нулевыми точками трансформаторов, должна действовать на отключение как защита от междуфазных, так и от однофазных КЗ, а в сети, работающей с изолированными нулевыми точками трансформаторов, только защита от междуфазных КЗ.

Замыкание на землю одной фазы в сети, работающей с изолированными нулевыми точками трансформаторов, не вызывает нарушения работы потребителей электрической энергии. Поэтому защита от замыканий на землю с действием на отключение в этих сетях, как правило, не применяется, но для ускорения отыскания места повреждения устанавливается защита с действием на сигнал.

Защиты линий отличаются многообразием и определяются главным образом схемой работы линии, напряжением сети и ответственностью питаемых потребителей.

Для защиты линий с односторонним питанием применяются: максимальная токовая защита, токовая отсечка, токовая поперечная дифференциальная защита параллельных линий, направленная токовая поперечная дифференциальная защита параллельных линий.

Для защиты линий с двусторонним питанием, кроме указанных выше защит, применяются: максимальная направленная защита, направленная отсечка, продольная дифференциальная защита, дистанционная защита, высокочастотная защита.

Пример 1

Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки (ТО) линии, если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 1254 А.

По условию отстройки от трехфазных КЗ в конце линии ток срабатывания ТО вычисляется по формуле

$$I_{co} \geq K_{отс} \cdot I_{КЗ \max}^{(3)},$$

где $K_{отс} = 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас; $I_{КЗ \max}^{(3)}$ – максимальное значение тока трехфазного КЗ в максимальном режиме системы в конце линии.

Получается:

$$I_{co} \geq K_{отс} \cdot I_{КЗ \max}^{(3)} = 1,3 \cdot 1254 = 1630,2 \text{ А.}$$

Пример 2

Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 1400 \text{ A}$; $K_{\text{ч}} = 1,5$; общее сопротивление равно 5 Ом ; $K_{\text{н}} = 1,2$.

Рассчитывается ток срабатывания:

$$I_{\text{co}} = \frac{I_{K3 \min}^{(2)}}{K_{\text{чA}}},$$

$$I_{\text{co}} = \frac{I_{K3 \min}^{(2)}}{K_{\text{чA}}} = \frac{1400}{1,5} = 933 \text{ A}.$$

Затем определяется напряжение срабатывания:

$$U_{\text{co}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{co}} \cdot (z_{\text{л}} + z_{\text{т}})}{K_{\text{н}}}$$

$$U_{\text{co}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{co}} \cdot (z_{\text{л}} + z_{\text{т}})}{K_{\text{н}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 933 \cdot 5}{1,2} = 6733 \text{ В}.$$

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки линии напряжением 10 кВ , если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 954 A .
2. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки линии напряжением 6 кВ , если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 1154 A .
3. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки линии напряжением 35 кВ , если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 1554 A .
4. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки линии напряжением $0,4 \text{ кВ}$, если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 1254 A .
5. Рассчитать ток срабатывания токовой отсечки линии напряжением 10 кВ , если известно, что ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме равен 1054 A .

6. Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 1200 \text{ A}$; $K_q = 1,3$; общее сопротивление равно 10 Ом ; $K_H = 1,2$.
7. Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 2400 \text{ A}$; $K_q = 1,5$; общее сопротивление равно 3 Ом ; $K_H = 1,2$.
8. Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 1900 \text{ A}$; $K_q = 1,3$; общее сопротивление равно 12 Ом ; $K_H = 1,3$.
9. Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 900 \text{ A}$; $K_q = 1,3$; общее сопротивление равно 3 Ом ; $K_H = 1,1$.
10. Определить напряжение и ток срабатывания комбинированной отсечки, если $I_{K3 \min} = 1300 \text{ A}$; $K_q = 1,4$; общее сопротивление равно $3,5 \text{ Ом}$; $K_H = 1,2$.
11. Оценить возможность применения токовой отсечки, если ток срабатывания равен 1400 A , а ток короткого замыкания равен 900 A .
12. Оценить возможность применения токовой отсечки, если ток срабатывания равен 1000 A , а ток короткого замыкания равен 2400 A .
13. Оценить возможность применения токовой отсечки, если ток срабатывания равен 1500 A , а ток короткого замыкания равен 3950 A .
14. Рассчитать $I_{сзп}$ и $K_{сзп}$ для выбора уставок максимальной токовой защиты линии напряжением 6 кВ , питающей обобщенную нагрузку. Сопротивление нагрузки равно $8,4 \text{ Ом}$, максимальный рабочий ток — 260 A .
15. Рассчитать $I_{сзп}$ и $K_{сзп}$ для выбора уставок максимальной токовой защиты линии напряжением 10 кВ , питающей обобщенную нагрузку. Сопротивление нагрузки равно 5 Ом , максимальный рабочий ток — 300 A .
16. Рассчитать $I_{сзп}$ и $K_{сзп}$ для выбора уставок максимальной токовой защиты линии напряжением 10 кВ , питающей обобщенную нагрузку. Сопротивление нагрузки равно $5,9 \text{ Ом}$, максимальный рабочий ток — 210 A .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Виды защит линий.
2. Токовая отсечка линий.
3. МТЗ линий.
4. Защита от однофазных замыканий на землю.
5. Отличия в построении защит воздушных и кабельных линий.
6. Влияние режима работы нейтрали на выбор устройств релейной защиты.
7. Комбинированные защиты линий по току и напряжению.
8. Проверка чувствительности защит.
9. Учет режима самозапуска в расчетах защит линий.
10. Дистанционные защиты.

Описание текущего контроля

Текущий контроль практических занятий осуществляется путем оценки решения практических задач. Решение практических задач в полном объеме является одним из условий допуска к экзамену.

Студенту даются 2–3 задачи по пройденным темам практических занятий и время для их решения. По результатам решения формируется понимание об усвоении пройденного материала и целесообразности перехода к следующей теме.

При защите практических работ оценивается:

- правильность выполнения расчетных заданий;
- полнота и корректность формулировок выводов;
- правильность ответов на контрольные вопросы.

Критерии и нормы отметки выполнения практических заданий:

Отметка «зачтено» ставится при условиях:

- расчеты выполнены корректно;
- при защите результатов изложение материала ясное, четкое, последовательное;
- используемая терминология технически грамотна и корректна, содержание ответов соответствует сути рассматриваемых вопросов.

Отметка «не зачтено» ставится при условиях:

- в расчетах допущены ошибки;
- при защите результатов изложение материала неясное и не последовательное;
- используемая терминология некорректна, содержание ответов не соответствует сути рассматриваемых вопросов.

Глоссарий

Автомат (греч. *automatos* — самодействующий) — самостоятельно действующее устройство (или совокупность устройств), выполняющее по заданной программе без непосредственного участия человека процессы получения, преобразования, передачи и использования энергии, материала и информации.

Автоматическое включение резерва (АВР) — быстрое автоматическое включение резервных источников энергоснабжения, водоснабжения или резервного оборудования и механизмов. Цель — бесперебойность снабжения потребителей электроэнергией, газообразным топливом, водой и т. д. или предотвращение аварии при внезапном выходе из строя рабочих источников питания, линий электропередачи, водо- и газопроводов, основных механизмов и приборов и пр. Особенно широко АВР применяется в энергетических системах и на электроустановках высокого напряжения различных предприятий (трансформаторов, электродвигателей и другого электрооборудования), реже — в электроустановках низкого напряжения, например 220—380 В.

Автоматическое повторное включение (АПВ) — быстрое автоматическое обратное включение в работу высоковольтных линий электропередачи и электрооборудования высокого напряжения после их автоматического отключения; одно из наиболее эффективных средств противоаварийной автоматики. Повышает надежность электроснабжения потребителей и восстанавливает нормальный режим работы электрической системы. Во многих случаях после быстрого отключения участка электрической системы, на котором возникло короткое замыкание в результате кратковременного нарушения изоляции или пробоя воздушного промежутка, при последующей подаче напряжения повторное короткое замыкание не возникает.

Автоматическое регулирование частоты (АРЧ) — процесс поддержания частоты переменного тока в энергосистеме в пределах, допустимых техническими требованиями и условиями экономичности ее работы.

Безотказность — свойство цифрового устройства непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или *наработки*. В стандарте зафиксировано несколько показателей безотказности, устанавливаемых по отношению ко всем возможным отказам цифрового устройства или к какому-либо типу (типам) цифрового устройства.

Блокирование — в электротехническом изделии или цифровом устройстве осуществление логической функции «запрет». Употребление термина *блокировка* в этом смысле стандартом отнесено к недопустимому.

Блокировка — часть электротехнического изделия (устройства), предназначенная для предотвращения или ограничения выполнения операций одними частями изделия при определенных состояниях или положениях других частей изделий в целях предупреждения возникновения в нем недопустимых состояний или исключения доступа к его частям, находящимся под напряжением.

Блок-контакт — контакт электрического аппарата, предназначенный для переключения цепей управления или сигнализации. Блок-контактами снабжаются контакторы, магнитные пускатели, выключатели высокого напряжения, разъединители и т. д. В одном аппарате обычно имеется несколько блок-контактов, замыкающих и размыкающих управляемые цепи. Блок-контакты изготавливаются на длительно допустимую силу тока до 5–20 А; дугогасительными камерами блок-контакты не снабжаются. Для облегчения гашения дуги могут применяться постоянные магниты.

Векторная диаграмма — графическое изображение значений периодически изменяющихся величин и соотношений между ними при помощи направленных отрезков — векторов.

Вольт-амперная характеристика — зависимость напряжения от тока или тока от напряжения на участке электрической цепи. Вольт-амперная характеристика может изображаться: аналитически — как функция $V = f(I)$, где V — напряжение, I — ток; графически — в виде линии в системе координат (V, I).

Время восстановления цифрового устройства — продолжительность восстановления работоспособного состояния цифрового устройства. Время восстановления цифрового устройства обычно исключают из *наработки*.

Вторичные цепи электростанции (вторичные цепи) — совокупность кабелей, проводов и зажимов, с помощью которых соединяют устройства управления, автоматики, сигнализации, защиты и измерения электростанции (подстанции) во вторичную систему электростанции.

Группа соединения обмоток — несколько схем соединения обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений трансформатора, имеющих одинаковый сдвиг фаз между векторами этих напряжений. Схемы и группы соединений установлены в стандарте и не относятся к действительному расположению обмоток на активной части и выводов на крышке трансформатора. Стандартом предусмотрено 12 групп соединений. Номер группы определяется углом, на который вектор напряжения обмотки НН отстает от вектора напряжения обмотки ВН. Для обозначения номеров группы используют числа от 0 (или 12) до 11 на циферблате часов, отстоящие друг от друга на угол 30° .

Датчик — первичный преобразователь, элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину (давление, температуру, частоту, скорость, перемещение, напряжение, электрический ток и т. п.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы.

Защита от колебаний нагрузки (ЗКН) — алгоритм защиты, обеспечивающий выявление колебаний нагрузки компрессорных или вентиляторных установок (помпажа). В отличие от других алгоритмов, используемых в цифровых устройствах релейной защиты (МТЗ, ДФЗ, ДТО и т. п.), ЗКН является технологической и не связана с аварийными режимами в электрической сети.

Защита резервная — защита, предназначенная для резервирования действия основных защит при КЗ в пределах зоны действия основной защиты, а также для резервирования в полном или частичном объеме основной и резервной защит смежных присоединений. Резервная защита, как правило, выполняется многоступенчатой. Резервная защита ВЛ может дублировать основную защиту при наличии телеускорения, действующего при всех видах короткого за-

мыкания в пределах защищаемой ВЛ, а также выполнять функцию основной защиты, если по условиям устойчивости допускается ее использовать при всех видах КЗ.

Защита с абсолютной селективностью — защита без выдержки времени, зона действия которой не выходит за пределы защищаемого элемента. Основные быстродействующие защиты (например, дифференциальные, высокочастотные), как правило, имеют абсолютную селективность.

Защита с относительной селективностью — защита, защищающая не только «свой» элемент, но и смежные. Селективность обеспечивается выбором выдержек времени.

Защита электрической сети — система мероприятий, предотвращающих и ограничивающих развитие аварии на линиях электропередачи и электрических подстанциях. Имеет целью обеспечить надежность снабжения потребителей электрической энергией должного качества. Подавляющее количество электроэнергии распределяется через электрическую сеть общего пользования. Защита таких сетей имеет важное значение для нормального электроснабжения промышленности, сельского хозяйства, ж.-д. транспорта и др. потребителей и непрерывно совершенствуется. В той или иной мере защищают все электроустановки, в том числе и автономные источники электрической энергии с их малыми сетями.

Излишнее срабатывание — неправильное срабатывание реле из-за наличия дефектов в измерительных цепях тока и напряжения при отсутствии требования на срабатывание.

Измерительный трансформатор — электрический трансформатор, на первичную обмотку которого воздействует измеряемый ток или напряжение, а вторичная, понижающая, включена на измерительные приборы и реле защиты. Измерительный трансформатор применяют главным образом в распределительных устройствах и в цепях переменного тока высокого напряжения для безопасных измерений силы тока, напряжения, мощности, энергии. На случай повреждения изоляции со стороны высокого напряжения один из зажимов вторичной обмотки заземляют.

Карта уставок — технические данные об основных параметрах срабатывания и алгоритме функционирования устройств РЗА, на-

ходящиеся на шите управления объекта электроэнергетики, центра управления сетями, ДЦ, представленные в наглядной форме, необходимые для оценки действия устройств РЗА или допустимости режима работы оборудования или линий электропередачи (ЛЭП) по условиям настройки устройств РЗА.

Каскадный трансформатор напряжения — это трансформатор, первичная обмотка которого разделена на несколько последовательно соединенных секций, передача мощности от которых к вторичным обмоткам осуществляется при помощи связующих и выравнивающих обмоток.

Каскадный трансформатор тока — это устройство с несколькими последовательными ступенями трансформации тока.

Клапанный датчик дугового замыкания — устройство, обеспечивающее снижение давления в ячейке распределительного устройства. Клапанный датчик дугового замыкания реагирует на увеличение давления газов, возникающих при горении дуги, сопровождающей короткое замыкание. Как известно, при возникновении дугового перекрытия с токами короткого замыкания более 20 кА возможно прожигание металла стенок ячеек и повреждение соседних ячеек.

Класс точности трансформатора тока (напряжения) — обобщенная характеристика трансформатора тока (напряжения), определяемая установленными пределами допускаемых погрешностей при заданных условиях работы.

Комбинированный трансформатор тока и напряжения — устройство, сочетающее трансформатор тока и трансформатор напряжения, объединенные в одном конструктивном исполнении.

Компенсированный трансформатор тока (напряжения) — трансформатор тока (напряжения), точность трансформации тока (напряжения) которого в определенном диапазоне первичного тока (напряжения) обеспечивается с помощью специальных средств.

Кондуктивные помехи — электромагнитные помехи, распространяющиеся по проводящим конструкциям и земле. Кондуктивные помехи в цепях, имеющих более одного проводника, принято классифицировать на два вида: 1) помеха «провод — земля» (синонимы — *несимметричная помеха, синфазная помеха, помеха общего*

вида), напряжение которой прикладывается между каждым из проводников и землей; 2) помеха «провод — провод» (синонимы — *симметричная помеха, противофазная помеха, помеха дифференциально-го вида*), напряжение которой прикладывается между различными проводниками одной цепи.

Контроллер — (англ. *controller*, буквально — управитель), электрический аппарат низкого напряжения, предназначенный для пуска, регулирования скорости, реверсирования и электрического торможения электродвигателей постоянного и переменного тока.

Контроль изоляции — операция, при выполнении которой в общем случае определяют один или несколько показателей качества электрической изоляции: *сопротивления изоляции; абсорбции коэффициента; электрической прочности* при воздействии постоянного, переменного и импульсного напряжения; *тангенса угла диэлектрических потерь*.

Коэффициент возврата электрического реле — отношение значения величины отпущения (возврата) $x_{\text{отп}}$ к значению величины срабатывания $x_{\text{сраб}}$ электрического реле.

Коэффициент запаса КЗ — множитель, помогающий выбрать или задать: уставку срабатывания *измерительного реле* с необходимым запасом; рабочее значение входной воздействующей величины X_p *логического реле*, превышающее величину срабатывания $x_{\text{сраб}}$.

Коэффициент надежности — словосочетание, используемое в некоторых работах по расчету уставок релейной защиты для обозначения множителя, учитывающего погрешности реле защиты, трансформаторов тока и других элементов схемы защиты.

Коэффициент чувствительности K_χ — показатель, с помощью которого принято оценивать *чувствительность* релейной защиты. Для релейных защит, реагирующих на возрастание контролируемой величины, коэффициент чувствительности K_χ определяют как отношение минимально возможного значения сигнала, соответствующего повреждению или ненормальному режиму, к установленному на защите параметру срабатывания (уставке).

Ложное срабатывание — разновидность неправильного срабатывания реле при отсутствии: требования на срабатывание; дефектов в измерительных цепях тока и напряжения.

Отклонение напряжения — величина, равная разности между действительным и заданным значениями напряжения, выраженная в абсолютных значениях или процентах номинального значения.

Плавкий предохранитель — простейшее устройство для защиты электрических цепей и потребителей электрической энергии от перегрузок и токов короткого замыкания. Состоит из одной или нескольких плавких вставок, изолирующего корпуса и выводов для присоединения плавкой вставки к электрической цепи. Некоторые наполняют кварцевым песком для лучшего охлаждения плавкой вставки и гашения дуги; иногда имеют индикаторы срабатывания. Плоские вставки имеют зауженные участки, которые расплавляются в первую очередь. Плавкий предохранитель включается последовательно в электрическую цепь и при расплавлении вставки замыкает ее.

Реле (фр. *relais*, от *relayer* — сменять, заменять) — устройство, содержащее релейный элемент и предназначенное для осуществления скачкообразных изменений состояния какой-либо электрической цепи в результате заданных входных воздействий.

Реле времени — реле выдержки времени, замедляющее реле. Это реле, предназначенное для создания необходимой задержки в передаче воздействия между отдельными узлами автоматических устройств или от одного устройства к другому. Можно выделить три характерные части: воспринимающую — обеспечивающую приведение реле в действие при поступлении управляющего сигнала; замедляющую — реализующую заданную выдержку времени; исполнительную — осуществляющую воздействие на управляемый объект.

Релейная защита электрических систем — совокупность устройств (или отдельное устройство), содержащая реле и способная реагировать на короткие замыкания в различных элементах электрической системы: автоматически выявлять и отключать поврежденный участок.

Ремонтопригодность — приспособленность цифрового устройства релейной защиты к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Основным показателем ремонтопригодности служит среднее время восстановления $T_{\text{в}}$, нормированное значение которого выбирают из ряда 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 ч.

Сдвиг фаз — разность начальных фаз переменных величин, изменяющихся по синусоидальному закону с одинаковой частотой. Сдвиг фаз измеряется в градусах, радианах или долях периода. В электротехнике большое практическое значение имеет сдвиг фаз между напряжением и током, определяющий коэффициент мощности в цепях переменного тока.

Схема соединения обмоток — условное изображение соединений выводов трехфазных обмоток между собой.

Чувствительность — этим термином в ПУЭ обозначают свойство релейной защиты, позволяющее выявлять расчетные виды повреждений и ненормальных режимов энергосистемы в зоне действия релейной защиты. В отличие от других областей техники, где показатель, характеризующий чувствительность, определяют непосредственно, оценка чувствительности того или иного вида релейной защиты осуществляется косвенно, по значению *коэффициента чувствительности*.