

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:31:49

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника Передача и распределение электрической энергии в системах
электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

1	Общие понятия и обозначения. Условные обозначения элементов РЗ. Правила чтения принципиальных схем РЗ.	
2	Приведение именованных единиц к относительным, относительных единиц к именованным, относительных номинальных величин к относительным параметрам (э. д. с., напряжений, токов, мощностей и сопротивлений) элементов электрических цепей.	4
3	Определение начального сверхпереходного тока в генераторе и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах системы.	9
4	Определение расчётных нагрузок на трансформаторы тока.	16
5	Расчёт полной и токовой погрешностей трансформаторов тока по кривым 10%-й погрешности.	20
6	Определение ступеней селективности максимальной токовой защиты (МТЗ) с зависимой и независимой от тока характеристиками времени срабатывания.	24
7	Расчет уставок максимальной токовой защиты .	27
8	Расчет токов срабатывания и зоны действия максимальных фазных отсечек линии с двухсторонним питанием .	32
9	Расчёт уставок пусковых токовых реле поперечной направленной дифференциальной защиты от междуфазных К.З. на параллельных линиях	
10	Расчёт уставок токовых ступенчатых защит трансформатора и линий. Составление карт уставок защит трансформатора и линий.	
	Рекомендуемая литература	36

РАЗДЕЛ 1.1. Общие вопросы выполнения РЗ.

Тема 1.1.1. Общие понятия и обозначения. Условные обозначения элементов РЗ. Правила чтения принципиальных схем РЗ.

Общие понятия и обозначения.

Схема – графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

Правила выполнения и оформления схем регламентируют стандарты седьмой (7) классификационной группы ЕСКД ГОСТ 2.7XX-XX.

-схему выполняют без соблюдения масштаба и действительного пространственного расположения составных частей изделия.

-количество схем определяет конструктор, оно должно быть минимально, но содержать полный объем информации для проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта изделия.

-на схеме используются стандартные графические условные обозначения; если использовать нестандартные, то должны быть соответствующие пояснения.

-на схеме допускается помещать технические данные на всю схему или отдельные ее элементы. Технические данные помещают либо возле условных графических изображений, либо на свободном поле.

Элемент схемы - составная часть схемы, которая выполняет определенную функцию в изделии и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное назначение (резистор, конд., ИМС, Тр, ...).

Устройство - совокупность элементов, представляющая единую конструкцию (блок, плата, ...). В изделии может и не иметь определенного функционального назначения.

Функциональная группа – совокупность элементов, выполняющих в изделии определенную функцию.

Функциональная цепь – линия, канал, тракт.

Линия взаимосвязи – отрезок линии на схеме, указывающий на наличие связи между функциональными частями изделия.

Линия эл. связи – линия на схеме указывающая путь прохождения тока или сигнала.

По основному назначению схемы подразделяются на:

(Э1) Структурные – которые определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Э1 отображает принцип работы изделия в самом общем виде. На схеме изображают все основные функциональные части изделия, а также основные взаимосвязи между ними.

Направление хода процессов изображают стрелками.

(Э2) Функциональные – поясняющие происходящие процессы при различных предусмотренных режимах работы.

Графическое построение схемы должно отражать последовательность, функциональных процессов, иллюстрируемых схемой.

Функциональные части изображают в виде УГО, установленных в стандартах, отдельные функциональные части допускают изображать в виде прямоугольников с соответствующими надписями.

(Э3) Принципиальные (полные) – отделяет полный состав элементов и связей между ними и дает детальное представление о работе изделия.

На ней изображаются все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления контроля в изделии заданных электрических процессов, все связи между ними, а также элементы подключения (разъемы, зажимы), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Электрические элементы изображают УГО (условными графическими обозначениями) вид и размеры которых установлены ЕСКД.

(Э4) Монтажные (электрических соединений) - показывает соединение составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели и т.д., которыми осуществляются эти соединения. На схемах изображают устройства и элементы, входящие в состав изделия, их вход и выходы элементов и соединения между ними.

Проводам, жгутам и кабелям на схеме присваивают порядковые номера. Нумерация проводится в пределах изделия отдельно для кабелей и проводов.

Провода, входящие в жгут, нумеруются в пределах жгута, жилы кабеля в пределах кабеля.

Номера проводов и жил кабелей проставляют около обоих концов их изображений: «откуда идет», «куда идет».

(Э5)Подключения - показывает внешние подключения изделия. На схемах должны быть изображены изделия, его вход и выход элементы (соединения, разъемы, зажимы и т.д.) подводимые к ним концы проводов и кабелей внешнего монтажа с адресами.

(Э6)Общие - на которых изображаются устройства и элементы, входящие в комплекс, а так же соединяющие их провода, жгуты и кабели.

Графические обозначения. Электрические элементы и устройства на схемах изображаются в виде условных графических обозначений (УГО), установленных стандартами ЕСКД или построенных на их основе. При необходимости применяют нестандартные УГО, но на свободном поле схемы должны быть приведены соответствующие пояснения.

При выполнении иллюстрационных схем на больших форматах можно все УГО пропорционально увеличить по сравнению с приведёнными в ЕСКД.

Допускается на схемах увеличивать размеры обозначений отдельных элементов, если необходимо графически выделить особое или важное значение этого элемента

При необходимости также допускается уменьшение графических обозначений элементов.

Линии связи должны состоять из вертикальных и горизонтальных отрезков. Допускается в отдельных случаях применять наклонные отрезки, но их длину и количество следует ограничивать.

Для уменьшения количества линий, изображаемых на схеме, применяется условное графическое слияние отдельных линий в групповые линии.

Допускается обрывать линии связи, если они затрудняют чтение схемы.

Обрывы линий заканчиваются стрелками $\rightarrow a \dots a \leftarrow$.

Элементы (устройства, функциональные группы), входящие в изделие, на схемах должны иметь буквенные, буквенно – цифровые или цифровые обозначения.

Элементы разбиты по видам на группы, имеющие обозначения из одной буквы. Для уточнения вида элементов применяют двухбуквенные и многобуквенные коды.

РАЗДЕЛ 1.2. Расчет и построение векторных диаграмм при КЗ в системах ЭС.

Тема 1.2.1. Приведение именованных единиц к относительным, относительных единиц к именованным, относительных номинальных величин к относительным параметрам (э. д. с., напряжений, токов, мощностей и сопротивлений) элементов электрических цепей.

Параметры различных элементов электроэнергетических систем, а также параметры режима (напряжения, тока, мощности и т.д.) как и других физических величин, могут быть выражены как в системе ИМЕНОВАННЫХ, так и в системе ОТНОСИТЕЛЬНЫХ единиц, т.е. в долях от определенных значений этих же величин, принятых за единицу измерения. При этом точность результатов расчетов не зависит от используемой системы единиц измерения. Применение системы относительных единиц упрощает расчеты. Чтобы получить относительные значения различных физических величин, необходимо предварительно выбрать значения соответствующих величин, принятые за БАЗИСНЫЕ, т.е. в качестве единиц измерения.

Так, чтобы выразить параметры различных элементов схемы замещения электрической цепи и параметры режима в системе относительных единиц, необходимо иметь 4 базисные единицы:

- базисное напряжение, U_B ;
- базисный ток, I_B ;
- базисную мощность (трехфазной системы), S_B ;
- базисное сопротивление, Z_B ;

Две из них выбираются произвольно, а две другие определяются из соотношения для мощности трехфазной системы:

$$S_{\phi} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \quad [1.1.]$$

И формулы закона Ома:

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}I_{\phi}} \quad [1.2.]$$

Выбранные базисные единицы служат единицами измерения как полных величин, так и их составляющих. Иногда относительные значения величин выражают в %-х от соответствующих базисных единиц.

При выбранных базисных единицах относительные значения ЭДС, напряжения, тока, мощности и сопротивления определяют путем деления, значения соответствующей величины в именованных единицах на базисную единицу той же размерности:

$$E_{*б} = \frac{E}{U_б}; \quad [1.3.]$$

$$U_{*б} = \frac{U}{U_б}; \quad [1.4.]$$

$$I_{*б} = \frac{I}{U_б}; \quad [1.5.]$$

$$S_{*б} = \frac{S}{U_б}; \quad [1.6.]$$

$$Z_{*б} = \frac{Z}{U_б}, \quad [1.7.]$$

Где: * - указывает, что величина выражена в относительных единицах,

б – указывает, что она приведена к базисным условиям.

Из [1.4] и [1.6] следует, что относительные фазные и междуфазные напряжения одинаковы, так же численно одинаковы относительная фазная мощность и мощность трех фаз.

Из [1.2] и [1.7] можно получить расчетные формулы для вычисления относительного сопротивления, приведенного к базисным условиям:

$$Z_{*б} = \frac{Z}{Z_б} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_б}{U_б} \quad [1.8.]$$

Если [1.8] умножим на $\frac{U_б}{U_б}$, то

$$Z_{*б} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} I_б \cdot U_б}{U_б \cdot U_б} = Z \cdot \frac{S_б}{U_б^2}, \quad [1.9.]$$

Где: Z – заданное сопротивление на фазу [Ом],

$I_б$ - базисный ток [А, кА],

$U_б$ - базисное напряжение [В, кВ],

$S_б$ - базисная мощность трех фаз [В · А, МВ · А].

Задача 1.1. Индуктивное сопротивление линии электропередачи 110 кВ, $X_L=18$ Ом.

Выразить сопротивление линии $X_{л*}$ в относительных единицах, приняв за базисные трехфазную мощность $S_{\phi} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и междуфазное напряжение $U_{\phi} = 115 \text{ кВ}$.

$$x_{\phi л*} = x_{л} \cdot \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2} = 18 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,136.$$

Часто параметры элементов электроэнергетических схем, вводимых в расчетную схему, заданы не в именованных единицах, а в %-х или относительных единицах при номинальных условиях. Это означает, что при выражении их в %-х или в относительных единицах в качестве базисных единиц были приняты номинальное напряжение $U_{НОМ}$ и номинальный ток $I_{НОМ}$ или номинальная мощность $S_{НОМ}$, т.е.

$$I_{\phi} = I_{НОМ}, U_{\phi} = U_{НОМ}, S_{\phi} = S_{НОМ}. \quad [1.10]$$

Подставляя в [1.8] и [1.9] вместо базисных величин номинальные данные элемента согласно [1.10], получим расчетные формулы номинальных относительных сопротивлений:

$$Z_{* НОМ} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}}{U_{НОМ}}, \quad [1.11]$$

$$Z_{* НОМ} = Z \cdot \frac{S_{НОМ}}{U_{НОМ}^2}. \quad [1.12]$$

Т.к. полное сопротивление трансформаторов численно равно U_k , трансформатора, то выражение его в %-х:

$$Z\% = 100 Z_{*} \quad [1.13]$$

По формулам [1.11].....[1.13] можно определить сопротивления элементов в именованных единицах по известным сопротивлениям в относительных единицах:

$$Z = \frac{Z_{* НОМ} \cdot U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} = \frac{Z\% \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} [\text{Ом}], \quad [1.14]$$

$$Z = Z_{* НОМ} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{Z\% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} [\text{Ом}]. \quad [1.15]$$

Для расчетов различных режимов электроэнергетических систем и токов К.З. прежде всего необходимо привести ЭДС и сопротивления всех элементов исходной расчетной схемы к одним базисным условиям.

Для приведения относительного сопротивления любого элемента, заданного при номинальных условиях, к базисным в [1.8] и [1.9] подставляем значение Z соответственно из [1.14] и [1.15]

$$Z_{* \delta} = Z_{* ном} \cdot \frac{I_{\delta} \cdot U_{ном}}{I_{ном} \cdot U_{\delta}}, \quad [1.16]$$

$$Z_{* \delta} = Z_{* ном} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\delta}^2}. \quad [1.17]$$

Для приведения напряжения, заданного в относительных единицах при номинальных условиях, к базисным условиям воспользуемся определением относительного номинального напряжения:

$$U_{* ном} = \frac{U}{U_{ном}} \quad [1.18]$$

Значение U из [1.18] подставляем в [1.4] и получим формулу пересчета к базисным условиям.

$$U_{* \delta} = U_{* ном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}. \quad [1.19]$$

Аналогично $E_{* \delta} = E_{* ном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}. \quad [1.20]$

Задача 1.2. Определить полное сопротивление трехфазного двухобмоточного трансформатора в именованных единицах, приведенное к сторонам ВН и НН, а также в относительных единицах к базисным условиям.

Номинальная мощность трансформатора $S_{Т.ном} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А};$

Номинальный коэффициент трансформации $k = \frac{U_{ном.ВН}}{U_{ном.НН}} = \frac{115}{6,6} \text{ кВ};$

Напряжение короткого замыкания $U_{К.} = 10,5\%;$

$S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$

$U_{\delta} = 6,3 \text{ кВ}.$

Полагая $U_{К.} \% = Z\%$, согласно [1.15] определяем полное сопротивление трансформатора в именованных единицах, приведенное к ВН и НН:

$$Z_{ВН} = \frac{U_{К.} \cdot \% \cdot U_{ном.ВН}^2}{100 \cdot S_{ном}} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 16} = 87 [\text{Ом}];$$

Относительное сопротивление трансформатора, приведенное к базисным условиям определяем согласно [1.17], заменим $Z_{* НОМ}$ на $U_{* К.}$

$$Z_{* б.Т} = 0,105 \cdot \frac{100 \cdot 6,6^2}{16 \cdot 6,3^2} = 0,72.$$

Задача 1.3. Определить реактивное сопротивление x_p и индуктивность L_p двух реакторов.

Номинальный ток $I_{НОМ.p1} = I_{НОМ.p2} = 0,4kA$;

Номинальное напряжение $U_{НОМ.p1} = 6kV$, $U_{НОМ.p2} = 10kV$;

Относительное реактивное сопротивление, приведенное к номинальным данным $x_{НОМ.p1} = x_{НОМ.p2} = 5\%$.

Для определения индуктивности необходимо знать реактивное сопротивление реактора, выраженное в именованных единицах, которое определяем согласно [1.14]:

$$x_{p1} = \frac{x_{НОМ.p1} \cdot U_{НОМ.p1}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{НОМ.p1}} = \frac{5 \cdot 6}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,433[Ом];$$

$$x_{p2} = \frac{x_{НОМ.p2} \cdot U_{НОМ.p2}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{НОМ.p2}} = \frac{5 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,723[Ом].$$

При одинаковых относительных номинальных сопротивлениях их абсолютные значения в именованных единицах больше у реактора с большим номинальным напряжением.

Поэтому, если в сетях 6кВ необходимо значительно ограничить $I_{К.З.}$, то не возбраняется в этой сети установить токоограничивающий реактор с $U_{НОМ} = 10kV$.

Задача 1.4. Определить относительное сопротивление реактора, приведенное к базисным условиям: $U_{\delta} = 10,5kV$; $S_{\delta} = 100MB \cdot A$.

Номинальное напряжение реактора $U_{НОМ.p} = 10kV$;

Номинальный ток реактора $I_{НОМ.p} = 0,6kA$;

Номинальное сопротивление реактора $x_{НОМ.p} = 4\%$.

Базисный ток реактора определяем согласно [1.1]

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5[kA].$$

Относительное сопротивление реактора, приведенное к базисным условиям определяем согласно [1.16], заменив $Z_{* НОМ}$ на $U_{* К.}$:

$$x_{* \delta, p} = x_{* \text{ном}, p} \cdot \frac{I_{\delta} \cdot U_{\text{ном}, p}}{I_{\text{ном}, p} \cdot U_{\delta}} = 0,04 \cdot \frac{5,5 \cdot 10}{0,6 \cdot 10,5} = 0,349.$$

РАЗДЕЛ 1.2. Расчет и построение векторных диаграмм при КЗ в системах ЭС.

Тема 1.2.2. Определение начального сверхпереходного тока в генераторе и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах системы.

Под начальным сверхпереходным током понимают действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент К.З.

Для вычисления токов К.З. при наличии в схеме трансформаторов и автотрансформаторов такую цепь представляют схемой замещения. В схеме замещения все магнито-связанные электрические цепи замещают одной эквивалентной электрически связанной цепью.

Составление такой схемы сводится к приведению параметров всех элементов и ЭДС различных ступеней трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, которую принимают за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношений, вытекающих из общих теории трансформаторов. В Р.З. расчет токов К.З. выполняют с учетом действительных коэффициентов трансформации.

При вычислении сверхпереходных токов генератор в схеме замещения представляют сверхпереходный ЭДС E_d'' и сверхпереходным индуктивным сопротивлением x_d'' .

Задача 2.1. Определить начальный сверхпереходной ток в генераторе Г (Рис. 2.1.) и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном К.З. на шинах IV (точка К).

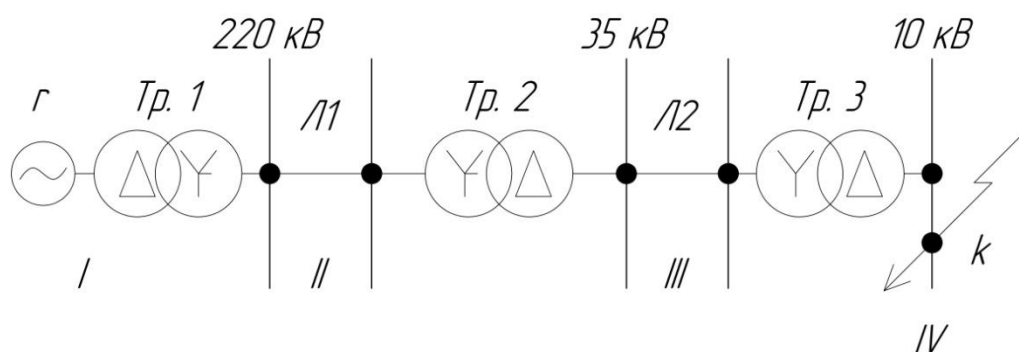


Рис. 2.1. Рассчитываемая схема с трансформаторными связями.

Исходные данные:

- Генератор Г:

$$- S = 117,5 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

- $U = 13,8 \text{ кВ};$

- $x_{*d}'' = 0,138;$

- $\cos \varphi = 0,85;$

- Трансформатор Тр 1:

- $S = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А};$

- $k = 242 / 13,8 \text{ кВ} / \text{кВ};$

- $U_{k.} = 11\%;$

- Линия Л1:

- $\ell = 140 \text{ км};$

- $x_{y\varnothing} = 0,4 \text{ Ом} / \text{км}.$

- Трансформатор Тр 2:

- $S = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$

- $k = 230 / 38,5 \text{ кВ} / \text{кВ};$

- $U_{k.} = 12\%;$

- Линия Л2:

- $\ell = 20 \text{ км};$

- $x_{y\varnothing} = 0,4 \text{ Ом} / \text{км}.$

- Трансформатор Тр 3

- $S = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А};$

- $k = 35 / 11 \text{ кВ} / \text{кВ};$

- $U_{k.} = 7,5\%.$

На основании вышеизложенного составляем схему замещения

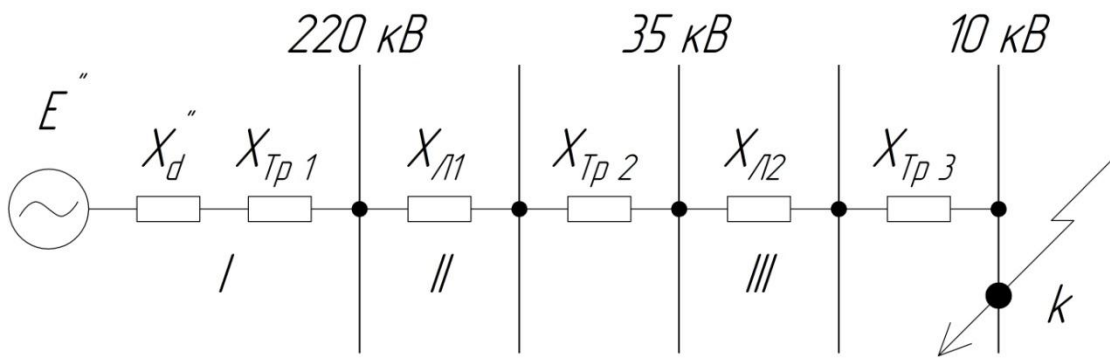


Рис. 2.2. Схема замещения без трансформаторных связей

и рассчитываем параметры отдельных элементов этой схемы.

За основную ступень принимаем ступень напряжения I , т.е. напряжение генератора

$U_I = U_{осн.} = U_{Г.н.м.} = 13 \text{ кВ}$; и к этому напряжению приводим все элементы схемы. При этом:

- во всех случаях трансформаторы с соединением обмоток $Y - \Delta$ учитываются по схеме $Y - Y$;
- коэффициенты трансформации трансформаторов определяются в направлении от основной ступени напряжения.

Сверхпереходное сопротивление генератора определяем по формуле [1.15]

$$x_d'' = x_d'' \cdot \frac{U_{Г.н.м.}^2}{S_{Г.н.м.}} = 0,138 \cdot \frac{13,8^2}{117,5} = 0,224 [\text{Ом}].$$

По этой же формуле определяем сопротивление трансформатора $Tr 1$, приведенное к его НН

$$x_{Tr1} = \frac{U_{Tr2.к.} \cdot \% \cdot U_{Tr1.н.м.}^2}{100 \cdot S_{Tr1.н.м.}} = \frac{11 \cdot 13,8^2}{100 \cdot 125} = 0,167 [\text{Ом}].$$

Приведенное сопротивление линии $Л1$ определяем по формуле:

$$x_{Л1.прив} = \ell_{Л1} \cdot x_{Л1.уд.} \cdot k_{Tr1}^2 \quad [2.1]$$

$$x_{Л1.прив} = 140 \cdot 0,4 \cdot \left(\frac{13,8}{242} \right)^2 = 0,182 [\text{Ом}].$$

Приведенное сопротивление трансформатора $Tr2$ определяем по формулам [1.15] и [2.1]

$$x_{Tr2.прив} = \frac{U_{Tr2.к.} \cdot \% \cdot U_{Tr2.ВН.}^2}{100 \cdot S_{Tr2.н.м.}} \cdot k_{Tr1}^2 = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 100} \cdot \left(\frac{13,8}{242} \right)^2 = 0,207 [\text{Ом}].$$

Приведенное сопротивление линии $Л2$ определяем по формуле:

$$x_{Л2.прив} = \ell_{Л2} \cdot x_{Л2.уд.} \cdot k_{Tr1}^2 \cdot k_{Tr2}^2 \quad [2.2].$$

$$x_{Л2.прив} = 20 \cdot 0,4 \cdot \left(\frac{13,8}{242}\right)^2 \cdot \left(\frac{230}{38,5}\right)^2 = 0,93[Ом].$$

Приведенное сопротивление трансформатора Тр3 определяем по [1.15] и [2.2]

$$x_{Тр3.прив} = \frac{U_{Тр3к.} \cdot U_{Тр3ВН}^2}{100 \cdot S_{Тр3ном.}} \cdot k_{Тр1.}^2 \cdot k_{Тр2.}^2 = \frac{7,5 \cdot 35^2}{100 \cdot 6,3} \cdot \left(\frac{13,8}{242}\right)^2 \cdot \left(\frac{230}{38,5}\right)^2 = 1,69[Ом].$$

Сверхпереходная ЭДС генератора в относительных единицах, отнесенных к его номинальным параметрам, определяется по формуле:

$$E''_{* Г.ном} = \sqrt{(U_{Г.ном} \cdot \cos \varphi_{Г.ном})^2 + (U_{Г.ном} \cdot \sin \varphi_{Г.ном} + I''_{* Г.ном} \cdot X''_{* d})^2} \quad [2.3]$$

$$E''_{* Г.ном} = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,138)^2} = 1,08.$$

Тогда сверхпереходная междуфазная ЭДС не основной ступени

$$E''_{*} = E''_{* Г.ном} \cdot U_{Г.ном} = 1,08 \cdot 13,8 = 14,9 кВ.$$

Приведенное к I ступени начальное значение сверхпереходного тока в генераторе при металлическом трехфазном К.З. на шинах IV(точка К) определяется по формуле:

$$I_I^{''(3)} = I_{Кприв}^{''(3)} = I_G^{''(3)} = \frac{E''}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma прив}}, \quad [2.4]$$

$$\text{где } x_{\Sigma прив} = x''_d + x_{Тр1} + x_{Л1прив} + x_{Тр2прив} + x_{Л2прив} + x_{Тр3прив}. \quad [2.5]$$

$$x_{\Sigma прив} = 0,224 + 0,167 + 0,182 + 0,207 + 0,93 + 1,69 = 3,4[Ом].$$

$$I_I^{''(3)} = I_{Кприв}^{''(3)} = I_G^{''(3)} = \frac{14,9}{\sqrt{3} \cdot 3,4} = 2,53[кА].$$

Этот ток на основной ступени I генераторного напряжения является действительным током, протекающий через генератор.

Действительный (НЕ ПРЕВИДЕННЫЙ) ток в линии Л1, т.е. на II ступени напряжения, определяется по формуле:

$$I_{II}^{''(3)} = I_{Л1}^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Тр1}. \quad [2.6]$$

$$I_{Л1}^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} = 0,144[кА].$$

Действительный ток в линии Л2 т.е. на III ступени напряжения, определяется по формуле:

$$I_{III}^{''(3)} = I_{Л2}^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Тр1} \cdot k_{Тр2} \quad [2.7]$$

$$I_{Л2}^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5} = 0,862 [кА].$$

Действительный ток на шинах IV, т.е. в месте К.З. определяется по формуле:

$$I_{IV}^{''(3)} = I_k^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Tp1} \cdot k_{Tp2} \cdot k_{Tp3} \quad [2.8]$$

$$I_k^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5} \cdot \frac{35}{11} = 2,75 [кА].$$

Запись формул [2.1.], [2.2.], [2.6.], [2.7.] и [2.8.] предполагает, что коэффициенты трансформации трансформаторов Тр1, Тр2, Тр3 определены в направлении от выбранной основной ступени напряжения и к той ступени, элементы которой подлежат определению.

Задача 2.2. По исходным данным задачи 2.1. произвести расчет в относительных единицах начальных сверхпереходных токов, при трехфазном К.З. на шинах IV(точка К).

Расчет в относительных единицах при наличии в исходной схеме трансформаторных связей так же сводится к составлению схемы замещения без трансформаторных связей.

На этой схеме замещения ЭДС и сопротивления элементов приводятся к принятым базисным условиям.

Сначала необходимо задаться единицей базисной трехфазной мощности $S_\delta [МВ \cdot А]$, которая остается одинаковой на всех ступенях напряжения трансформации, и базисным междуфазным напряжением на какой-либо одной ступени напряжения $U_\delta [кВ]$.

Базисные единицы напряжений и токов на всех других ступенях напряжения $U_{\delta прив}$ и $I_{\delta прив}$ однозначно определяется с учетом действительных коэффициентов трансформации трансформаторов между рассматриваемой ступенью и ступенью, принятой за основную (базисную), по формулам:

$$U_{\delta прив} = U_\delta \cdot (k_{Tp1} \cdot k_{Tp2} \cdot \dots \cdot k_{Tp n}); \quad [2.9]$$

$$I_{\delta прив} = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta прив}}, \quad [2.10]$$

где $k_{Tp1}, k_{Tp2} \dots k_{Tp n}$ - коэффициенты трансформации трансформаторов, определяемые как и в задаче 2.1. в направлении от ступени, где выбраны S_δ и U_δ к ступени, для которой вычисляются базисные единицы $U_{\delta прив}$ и $I_{\delta прив}$.

После того, как определены базисные единицы напряжений и токов для всех ступеней, вычисляются относительные сопротивления, приведенные к базисным условиям, для элементов, находящихся на этих ступенях по формулам, аналогичным [1.9.], [1.17.]

$$Z_{* \delta \text{прив}} = Z \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta \text{прив}}^2}; \quad [2.11]$$

$$Z_{* \delta \text{прив}} = Z_{* \text{ном.}} \cdot \frac{U_{\text{ном.}}^2}{S_{\text{ном.}}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta \text{прив}}^2}, \quad [2.12]$$

Где Z – сопротивление элемента в именованных единицах на рассматриваемой ступени;

$Z_{* \text{ном.}}$ - относительное номинальное сопротивление элемента на той же ступени.

На основании вышеизложенного принимаем $S_{\delta} = 1000 \text{ MB} \cdot \text{A}$ и на I ступени (генераторное напряжение) $U_{\delta I} = 13,8 \text{ кВ}$.

Тогда базисный ток на первой ступени определяем по формуле [1.1]:

$$I_{\delta I} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta I}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 41,8 [\text{кА}].$$

Базисные токи на других ступенях определяем согласно [2.9] и [2.10]:

$$U_{\delta II} = \frac{1}{k_{TpI}} \cdot U_{\delta I} = \frac{1}{\frac{13,8}{242}} \cdot 13,8 = 242 [\text{кВ}];$$

$$I_{\delta II} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta II}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 242} = 2,38 [\text{кА}];$$

$$U_{\delta III} = \frac{1}{k_{Tp1} \cdot k_{Tp2}} \cdot U_{\delta I} = \frac{1}{\frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5}} \cdot 13,8 = 40,5 [\text{кВ}];$$

$$I_{\delta III} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta III}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 40,5} = 14,25 [\text{кА}];$$

$$U_{\delta IV} = \frac{1}{k_{Tp1} \cdot k_{Tp2} \cdot k_{Tp3}} \cdot U_{\delta I} = \frac{1}{\frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5} \cdot \frac{35}{11}} \cdot 13,8 = 12,7 [\text{кВ}];$$

$$I_{\delta IV} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta IV}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 12,7} = 45,5 [\text{кА}];$$

Определяем относительные базисные сопротивления по [2.11] и [2.12]:

$$\text{- генератора: } x_{* \delta I}'' = 0,138 \cdot \frac{13,8^2}{117,5} \cdot \frac{1000}{13,8} = 1,18;$$

- трансформатора Тр1:

$$x_{* \delta Tr1} = \frac{11 \cdot 13,8^2}{100 \cdot 125} \cdot \frac{1000}{13,8^2} = 0,88;$$

- Линии Л1:

$$x_{* \delta Л1} = x_{Л1} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 140 \cdot 0,4 \cdot \frac{1000}{242^2} = 0,955;$$

- Трансформатора Тр2:

$$x_{* \delta Тр2} = \frac{U_k \% \cdot U_{НОМ.ВН}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{242^2} = 1,083;$$

- Линии Л2:

$$x_{* \delta Л2} = x_{Л2} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta III}^2} = 20 \cdot 0,4 \cdot \frac{1000}{40,5^2} = 4,88;$$

- Трансформатора Тр3:

$$x_{* \delta Тр3} = \frac{U_k \% \cdot U_{НОМ.НН}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta IV}^2} = \frac{7,5 \cdot 11}{100 \cdot 6,3} \cdot \frac{1000}{12,7^2} = 8,93.$$

Результирующее относительное базисное сопротивление до точки К.З. равно сумме всех сопротивлений в схеме замещения:

$$x_{* \delta \Sigma} = 1,18 + 0,88 + 0,955 + 1,083 + 4,88 + 8,93 = 17,908.$$

Относительную сверхпереходную ЭДС, приведенную к базисным условиям, определяем согласно [1.20]:

$$E_{* \delta}'' = E_{ГНОМ}'' \cdot \frac{U_{НОМ.}}{U_{\delta I}} = 1,08 \cdot \frac{13,8}{13,8} = 1,08.$$

Относительный начальный сверхпереходной ток, при трехфазном К.З., приведенный к базисным условиям и одинаковый на всех ступенях напряжения, определяем по формуле:

$$I_{* \delta K}^{(3)} = \frac{E_{* \delta}''}{x_{* \delta \Sigma}} = \frac{1,08}{17,908} = 0,0603.$$

Действительные токи на всех ступенях напряжения определяем согласно: [1.5]:

- ток в генераторе:

$$I_{Г}^{(3)} = I_I^{(3)} = I_{* \delta K}^{(3)} \cdot I_{\delta I} = 0,0603 \cdot 41,8 = 0,253[\text{кА}];$$

- ток в линии Л1:

$$I_{Л1}^{(3)} = I_{II}^{(3)} = I_{* \delta K}^{(3)} \cdot I_{\delta II} = 0,0603 \cdot 2,38 = 0,144[\text{кА}];$$

- ток в линии Л2:

$$I_{II2}^{(3)} = I_{III}^{(3)} = I_{*}^{(3)} \cdot I_{\delta K} = 0,0603 \cdot 14,25 = 0,86[\text{кА}];$$

- ток на шинах IV:

$$I_k^{(3)} = I_{IV}^{(3)} = I_{*}^{(3)} \cdot I_{\delta IV} = 0,0603 \cdot 45,5 = 2,75[\text{кА}].$$

Естественно, вычисленные токи совпадают со значениями, которые были получены при расчете в именованных единицах, т.к. точность расчета не зависит от того, в каких единицах этот расчет выполнялся.

РАЗДЕЛ 1.3. Элементы устройств в РЗ

Тема 1.3.1. Определение расчётных нагрузок на трансформаторы тока.

На Рис. 3.1. приведена схема соединений ТТ и реле в полную звезду.

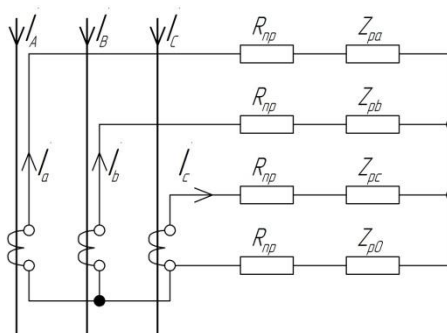


Рис. 3.1. Схема соединений ТТ и реле в полную звезду.

Нагрузка на ТТ зависит от схемы соединений ТТ, от вида К.З., величины внешних сопротивлений проводов R_{np} , сопротивлений реле Z_p и других аппаратов, включенных последовательно в цепи тока каждой фазы и нулевой провод.

В целях упрощения вычислений все внешние сопротивления складываются арифметически (а не геометрически), чем создается некоторый расчетный запас.

Расчетной нагрузкой на ТТ называют наибольшее сопротивление Z_H , вычисляемое по формуле:

$$Z_H = \frac{U_T}{I_T}, \quad [3.1]$$

Т.е. отношение напряжения U_T на зажимах вторичной обмотке ТТ к вторичному току I_T в этой обмотке и составляет нагрузку на ТТ.

Из схемы Рис. 3.1. видим:

- при трехфазной К.З. ток в нулевом проводе равен нулю (токами небаланса пренебрегаем);
- вторичные токи равны по величине и сдвинуты по фазе по отношению друг к другу 120° ;

- напряжение на вторичной обмотке каждого ТТ:

$$U_T^{(3)} = I_T^{(3)} (R_{np} + Z_p);$$

- с учетом [3.1]:

$$Z_H = \frac{U_T^{(3)}}{I_T^{(3)}} = R_{np} + Z_{np} \quad [3.2].$$

Расчетное значение $Z_{H.расч.}$ следует принять для того ТТ, у которого сопротивления реле в фазном проводе наибольшие.

Задача 3.1. Вычислить расчетную нагрузку на ТТ Z_H по исходным данным для схемы Рис. 3.1:

$$Z_{np} = 0,6 \text{ Ом}; Z_{pa} = Z_{pc} = 1,2 \text{ Ом}; Z_{ps} = 0,9 \text{ Ом}; Z_{po} = 1,24 \text{ Ом}.$$

По условию задачи и с учетом переходных сопротивлений контактов $R_k = 0,05 \text{ Ом}$:

$$Z_{H.расч.} = R_{np} + Z_{pa} + R_k = 0,6 + 1,2 + 0,05 = 1,85 \text{ [Ом]}.$$

При двухфазном К.З. $U_T^{(2)} = I_T^{(2)} (R_{np} + Z_p)$. Тогда с учетом [3.1] и [3.2]

$$Z_H^{(2)} = Z_H^{(3)}. \quad [3.3]$$

При однофазном К.З. (например фазы А) вторичный ток К.З. протекает по фазному и нулевому проводу. Тогда $Z_{H.расч.}^{(1)} = I_a^{(1)} (R_{np} + Z_{pa} + Z_{po} + R_{np} + R_k)$

$$\text{или } Z_{H.расч.}^{(1)} = 2R_{np} + Z_{pa} + Z_{po} + R_k \quad [3.4]$$

По условию задачи и с учетом $R_k = 0,05 \text{ Ом}$

$$Z_{H.расч.}^{(1)} = 2 \cdot 0,6 + 1,2 + 1,24 + 0,05 = 3,69 \text{ [Ом]}.$$

Задача 3.2. Вычислить расчетную нагрузку на ТТ Z_H для схемы Рис. 3.2. по исходным данным: $R_{np} = 0,6 \text{ Ом}; Z_{pa} = 1,2 \text{ Ом}; Z_{ps} = 0,9 \text{ Ом}; Z_{pобр} = 0,7 \text{ Ом}.$

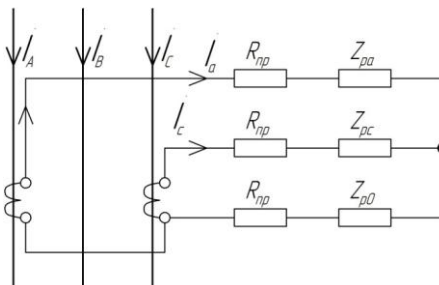


Рис 3.2. Схема соединений ТТ и реле в неполную звезду.

Расчетная наибольшая нагрузка по условию задачи 3.2. имеет место при двухфазном К.З. между фазами А и В, когда вторичный ток фазы А протекает по реле фазы а и реле в обратном проводе.

$$Z_{Ha.расч} = \frac{I_a (R_{np} + Z_{pa} + Z_{p.обр} + R_{np} + R_k)}{I_a}.$$

$$\text{Откуда } Z_{Ha.расч} = 2 \cdot R_{np} + Z_{pa} + Z_{p.обр} + R_k \quad [3.5]$$

С учетом $R_k = 0,05 \text{ Ом}$:

$$Z_{Ha.расч} = 2 \cdot 0,6 + 1,2 + 0,7 + 0,05 = 3,15 [\text{Ом}].$$

Задача 3.3. Для схемы Рис. 3.3. вывести расчетные выражения для нагрузки ТТ при неодинаковых сопротивлениях реле в фазах и вычислить наибольшую расчетную нагрузку по расчетным данным:

$$Z_{np} = 0,4 \text{ Ом}; Z_{pa} = Z_{pc} = 1 \text{ Ом}; Z_{pv} = 0,5 \text{ Ом}; R_k = 0,05 \text{ Ом}.$$

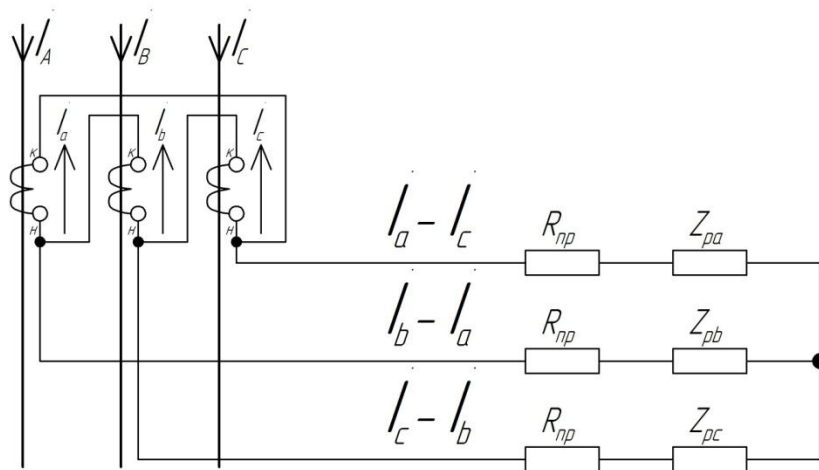


Рис. 3.3. Схема соединений ТТ в Δ, реле в Y.

Более наглядно для расчета схемы соединений ТТ в Δ, реле в Y представлена на Рис. 3.4.

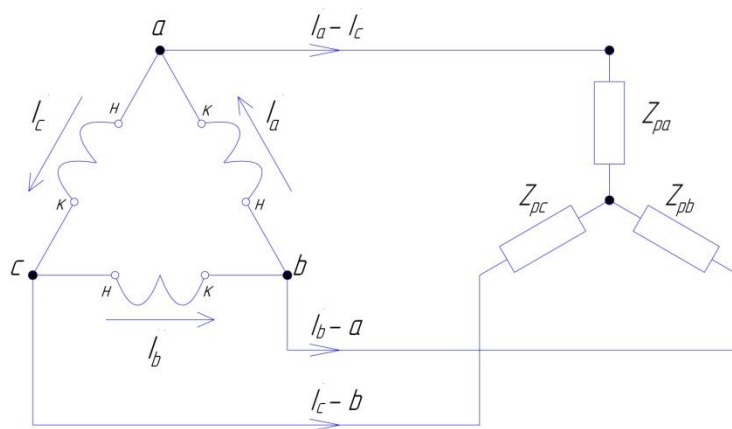


Рис. 3.4. Схема соединений ТТ Δ , реле в Y .

Общее выражение нагрузки на один ТТ, например для фазы а:

$$Z_H = \left| \frac{\dot{U}_a}{\dot{I}_a} \right|$$

Согласно второго закона Кирхгофа (См. Рис. 3.4.)

$$(\dot{I}_a - \dot{I}_c) \cdot (R_{np} + Z_{pa}) - (\dot{I}_b - \dot{I}_a) \cdot (R_{np} + Z_{pb}) = \dot{U}_a,$$

$$\text{Откуда } Z_{Ha} = \left| \frac{(\dot{I}_a - \dot{I}_c) \cdot (R_{np} + Z_{pa}) - (\dot{I}_b - \dot{I}_a) \cdot (R_{np} + Z_{pb})}{\dot{I}_a} \right| \quad [3.6]$$

ТРЕХФАЗНОЕ К.З.

Принимаем $\dot{I}_a = I_a \cdot e^{j90^\circ}$, тогда $\dot{I}_b = I_a \cdot e^{j210^\circ}$; $\dot{I}_c = I_a \cdot e^{j330^\circ}$.

$$\dot{I}_a - \dot{I}_c = I_a \cdot e^{j90^\circ} - I_a \cdot e^{-j30^\circ} = I_a \left[0 + j1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j0,5 \right) \right] = I_a \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j1,5 \right) = \sqrt{3} \cdot I_a \cdot e^{j120^\circ}$$

$$\dot{I}_b - \dot{I}_a = I_a \cdot e^{j210^\circ} - I_a \cdot e^{j90^\circ} = I_a \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} - j0,5 - (0 + j1) \right] = I_a \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j1,5 \right) = \sqrt{3} \cdot I_a \cdot e^{j240^\circ}$$

Подставляя полученные значения в [3.6] и обозначая $R_{np} + Z_{pa} = Z_a$, $R_{np} + Z_{pb} = Z_b$ получим:

$$\begin{aligned}
Z_{Ha}^{(3)} &= \left| \frac{\sqrt{3} \cdot I_a \cdot e^{j120^\circ} \cdot Z_a - \sqrt{3} \cdot I_a \cdot e^{j240^\circ} \cdot Z_\epsilon}{I_a \cdot e^{j90^\circ}} \right| = \left| \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot Z_a - \sqrt{3} \cdot e^{j150^\circ} \cdot Z_\epsilon \right| = \\
&= \left| \sqrt{3} \cdot Z_a \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) - \sqrt{3} \cdot Z_\epsilon \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) \right| = \left| \frac{3}{2} \cdot Z_a + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Z_a + \frac{3}{2} \cdot Z_\epsilon - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Z_\epsilon \right| = \\
&= \left| \frac{3}{2} \cdot (Z_a + Z_\epsilon) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Z_a - Z_\epsilon) \right| = \sqrt{\frac{9}{4} (Z_a + Z_\epsilon)^2 + \frac{3}{4} (Z_\epsilon - Z_a)^2} [3.7]
\end{aligned}$$

При равных сопротивлениях во всех фазах, т.е. если $Z_p = Z_{pa} = Z_{p\epsilon} = Z_{pc}$ из [3.7]

получаем классическую формулу $Z_n^{(3)} = 3 \cdot Z_a = 3(R_{np} + Z_p)$ [3.8]

Проведя аналогичные расчеты для фаз в и с получим

$$Z_{H\epsilon} = \sqrt{\frac{9}{4} (Z_\epsilon + Z_c)^2 + \frac{3}{4} (Z_\epsilon - Z_c)^2} [3.7]'$$

$$Z_{Hc} = \sqrt{\frac{9}{4} (Z_c + Z_a)^2 + \frac{3}{4} (Z_c - Z_a)^2} [3.7]''$$

Анализируя [3.7] ; [3.7]' ; [3.7]'' по условию данной задачи, приходим к выводу, что наибольшая нагрузка будет у ТТ фазы С. Т.к. $Z_{pa} = Z_{pc} = 1 \text{ Ом}$, то из [3.7]'' с учетом $R_x = 0,05 \text{ Ом}$ получаем:

$$Z_{н.расч.}^{(3)} = 3 \cdot (0,4 + 1) + 0,05 = 4,25 [\text{Ом}].$$

ДВУХФАЗНОЕ К.З.

Пусть имеем К.З. между фазами А и В. В этом случае $\dot{I}_\epsilon = -\dot{I}_a$. Подставив эти значения в [3.6] получим:

$$Z_n^{(2)} = 3 \cdot R_{np} + Z_{pa} + 2Z_{p\epsilon} [3.9]$$

Если $Z_p = Z_{pa} = Z_{p\epsilon}$, то из [3.8] и [3.9] имеем:

$$Z_{H.расч.}^{(2)} = Z_{H.расч.}^{(3)} [3.10]$$

ОДНОФАЗНОЕ К.З.

Пусть имеем К.З. на фазе А. В этом случае $\dot{I}_\epsilon^{(1)} = -\dot{I}_c^{(1)} = 0$ и из [3.6] имеем:

$$Z_n^{(1)} = 2 \cdot R_{np} + Z_{pa} + 2Z_{p\epsilon} [3.11]$$

При $Z_p = Z_{pa} = Z_{pe}$,

$$Z_n^{(1)} = 2 \cdot (R_{np} + Z_p) \quad [3.12]$$

По условию данной задачи наибольшая нагрузка будет у ТТ фазы С.

$$Z_{H,расч}^{(1)} = 2 \cdot R_{np} + Z_{pc} + Z_{pa} + R_n = 2 \cdot 0,4 + 1 + 1 + 0,05 = 2,85 [\text{Ом}]$$

РАЗДЕЛ 1.3. Элементы устройств в РЗ

Тема 1.3.2. Расчёт полной и токовой погрешностей трансформаторов тока по кривым 10%-й погрешности.

Как отмечалось в разделе 1.3.1., нагрузка вторичной обмотки ТТ складывается из последовательно включенных сопротивлений:

Реле - Z_p , приборов - Z_{np} , жил контрольного кабеля - $Z_{каб}$, переходного сопротивления в местах контактных соединений - R_k :

$$Z_H = Z_p + Z_{np} + Z_k + R_k.$$

Нагрузка вторичной обмотки ТТ зависит так же от схемы их соединения и вида К.З.

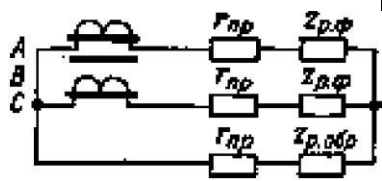
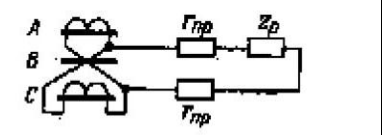
В задаче 3.2. были выведены формулы для определения сопротивлений нагрузки при соединении вторичных обмоток в ТТ Δ , реле в Y для трехфазного, двухфазного и однофазного К.З.

Расчетные формулы для определения сопротивления нагрузки для наиболее распространенных схем соединения вторичных обмоток ТТ и при различных видах К.З. приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Расчетные формулы для определения сопротивления нагрузки в зависимости от схемы соединения ТТ

Схема соединения ТТ и реле.	Вид короткого замыкания	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
1. Полная звезда $K_{сх}=1.0$ 	Трехфазное и двухфазное	$Z_{н,расч} = R_{пр} + Z_p + R_{пер}$ Величина $R_{пер}$ во всех случаях принимается равной 0.1 Ом.
	Однофазное	$Z_{н,расч} = 2R_{пр} + Z_{p,ф} + Z_{p,0} + R_{пер}$

2. Неполная звезда $K_{сх}=1.0$ 	Трехфазное	$Z_{н.расч} = \sqrt{3}R_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + R_{пер}$
	Двухфазное АВ или ВС	$Z_{н.расч} = 2R_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + R_{пер}$
	Двухфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{н.расч} = 2R_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + R_{пер}$
3. На разность токов двух фаз $K_{сх}=1.73$ 	Трехфазное	$Z_{н.расч} = \sqrt{3}(2R_{пр} + Z_{р}) + R_{пер}$
	Двухфазное АС	$Z_{н.расч} = 4R_{пр} + 2Z_{р} + R_{пер}$
	Двухфазное АВ или ВС	$Z_{н.расч} = 2R_{пр} + Z_{р.} + R_{пер}$
4. Треугольник $K_{сх}=1.73$ 	Трехфазное или двухфазное, трехфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{н.расч} = 3R_{пр} + 3Z_{р.} + R_{пер}$
	Однофазное	$Z_{н.расч} = 2R_{пр} + 2Z_{р.} + R_{пер}$

Допустимая нагрузка на ТТ определяется исходя из обеспечения точности измерительных органов релейной защиты при К.З. в расчетных точках электрической сети. Полная погрешность ТТ ξ не должна превышать 10%.

Проверка ТТ по действительным характеристикам намагничивания производится в следующем порядке:

1. Определяется фактическая нагрузка Z_H , подключенная к вторичной обмотке с учетом формул, приведенных в таблице 4.1;
2. Определяется расчетный первичный и вторичный токи К.З., которые равны максимальному току К.З. в конце защищаемой зоны.
3. Определяется расчетный ток намагничивания:
 $I_{2нам.расч} = 0,1 \cdot I_{2К.З.расч}$
4. Строится наиболее низкая характеристика намагничивания проверяемых ТТ и по этой характеристике и по полученному выше току намагничивания определяется соответствующее ему значения напряжения $U_2 = f(I_{нам})$
5. Определяется допустимое сопротивление нагрузки, при по которой погрешность ТТ не будет превышать 10% по формуле:

$$Z_{H.дон} = \frac{U_2 - I_{2расч} \cdot Z_1}{0,9 \cdot I_{2расч}}$$

Для того, чтобы погрешность ТТ не превышала допустимых 10%, рассчитанная в п.1. нагрузка на его вторичную обмотку не должна превышать значения $Z_{H.доп.}$, определенного в п.5.

Задача 4.2. Определить погрешности ТТ типа ТПФ-1/3, 200/5 при одинаковой нагрузке на его вторичные обмотки $Z_H = 1 \text{ Ом}$. Сопротивление вторичных обмоток $Z_2 = 0,3 \text{ Ом}$ для обмотки класса I и $Z_2 = 0,4 \text{ Ом}$ для обмотки класса III.

Расчетный первичный ток. $I_{I \text{ расч.}} = 2000 \text{ А}$

4.2.1. Определяем расчетный вторичный ток $I_{2 \text{ расч.}} = \frac{I_{I \text{ расч.}}}{k_I} = \frac{2000}{200/5} = 50 [\text{А}]$.

4.2.2. Определяем ЭДС вторичных обмоток по формуле

$$E_2 = I_{2 \text{ расч.}} \cdot (Z_2 + Z_H)$$

- для сердечника I класса $E_2 = 50 \cdot (0,3 + 1) = 65 [\text{В}]$,

- для сердечника III класса $E_2 = 50 \cdot (0,4 + 1) = 70 [\text{В}]$.

4.2.3. Из характеристик намагничивания обоих сердечников ТТ (Рис. 4.1.), которые приводятся в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации», определяем ток намагничивания. (принимаем $E_2 = U_2$, т.к. значения их отличаются весьма незначительно).

Для сердечника I класса ток намагничивания при напряжении 65В составляет $I_{н.м.} = 1,1 \text{ А}$.

Таким образом, во вторичной обмотке будет проходить ток не 50А, а $I_2 = 50 - 1,1 = 48,9 [\text{А}]$.

Погрешность ТТ при этом составит $\Delta = \frac{50 - 48,9}{50} \cdot 100\% = 2,2\%$.

Расчетная ЭДС сердечника III класса составляет 70В.

Однако из характеристики намагничивания этого сердечника видно, что, начиная с $I_{н.м.} \approx 5,5 \text{ А}$, происходит его насыщение, вследствие чего напряжение на вторичной обмотке остается неизменным и равным примерно 51В. Поэтому вторичный ток будет равным:

$$I_2 = \frac{51}{0,4 + 1} = 36,5 [\text{А}].$$

Погрешность же ТТ при этом составит:

$$\Delta = \frac{50 - 36,5}{50} \cdot 100\% = 27\%.$$

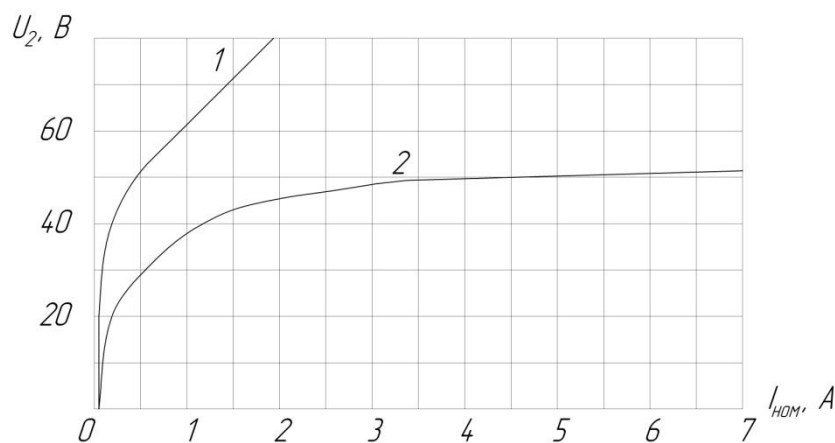


Рис.4.1. Характеристика намагничивания трансформатора тока типа ТПФ-1, 200/5

РАЗДЕЛ 1.5. Максимальная токовая защита (МТЗ)

Тема 1.5.1. Определение ступеней селективности максимальной токовой защиты (МТЗ) с зависимой и независимой от тока характеристиками времени срабатывания.

Задача 5.1. Определить степень селективности Δt между двумя смежными МТЗ с выдержкой времени 1 и 2, представленными на Рис. 5.1. для случаев:

- Защиты имеют независимую от тока характеристику времени срабатывания;
- Защиты имеют ограниченно зависимую от тока характеристику времени срабатывания.

Исходные данные:

- время срабатывания защиты МТЗ1 с независимой характеристикой равно 1,4 С;
- время срабатывания в независимой от тока части ограниченно зависимой характеристики защиты МТЗ 2 равно 1 С;
- эти защиты имеют индукционные реле, которые могут «работать по инерции» после отключения КЗ. Их инерционная ошибка $t_{u.o.} = 0,14C$;
- время отключения выключателя МТЗ 1, т.е. время с момента подачи импульса в катушку выключения выключателя до разрыва тока КЗ контактами выключателя $t_{o.в.} = 0,1C$.

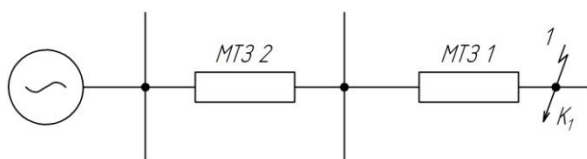


Рис. 5.1. Схема участка радиальной сети с МТЗ 1 и МТЗ 2.

Решение. Для обеспечения селективного действия МТЗ 2, которая установлена ближе к источнику питания, относительно МТЗ 1, необходимо, чтобы при КЗ в точке К1 (справа от выключателя МТЗ 1) и любых значениях $I_{КЗ}$ время действия МТЗ 2 было больше, чем МТЗ 1 на время ступени селективности Δt , т.е. $t_{МТЗ2} = t_{МТЗ1} + \Delta t$.

Степень селективности для защит с независимой характеристикой времени срабатывания составляет:

$$\Delta t_{HE3.} = \Delta t_{p.в.МТЗ1} + \Delta t_{p.в.МТЗ2} + t_{o.в.} + t_{зан.}, \quad [5.1.]$$

Где: $\Delta t_{p.в.МТЗ1}$ - погрешность реле времени защиты МТЗ 1 в сторону увеличения времени срабатывания;

- $\Delta t_{p.в.МТЗ2}$ - погрешность реле времени защиты МТЗ 2 в сторону уменьшения времени срабатывания;

$t_{зан.}$ - время запаса, учитывающее неточность регулировки реле и разброс времени $t_{o.в.}$.

Для снижения выдержек времени устройств РЗ в условиях эксплуатации рекомендуется по возможности (не в ущерб надёжности) снижать степень селективности посредством **фактического учёта** погрешностей реле времени ($\Delta t_{p.в.МТЗ1}$ и $\Delta t_{p.в.МТЗ2}$), времени $t_{o.в.}$ и замены имеющихся реле времени на реле времени с меньшими пределами шкалы, т.к. чем больше предел шкалы времени срабатывания, тем больше её погрешность.

Согласно исходным данным $t_{ср.МТЗ1} = 1,4C$

Следовательно необходимо взять реле времени для МТЗ 1 и МТЗ 2 с пределами шкалы $0,25 \dots 3,5C$, у которых $\Delta t_{p.в.} = \pm 0,06C$.

Тогда, согласно [5.1]

$$\Delta t = 0,06 + 0,06 + 0,1 + 0,1 = 0,32[C].$$

Если взять для МТЗ1 и МТЗ2 реле времени с пределами шкалы $0,5 \dots 9C$, у которых $t_{p.в.} = \pm 0,125C$, то

$$\Delta t = 0,125 + 0,125 + 0,1 + 0,1 = 0,45[C].$$

Если взять реле времени с пределами шкалы $0,1 \dots 1,3 C$, у которых $\Delta t_{p.в.} = \pm 0,03$, то

$$\Delta t = 0,03 + 0,03 + 0,1 + 0,1 = 0,26[C], \text{ но оно не подходит нам по условию задачи.}$$

Для МТЗ с ограниченно зависимой характеристикой времени срабатывания степень селективности

$\Delta t_{зав.}$ в независимой части характеристики определяется по формуле, в которой кроме указанных выше времен учитывается еще и инерционная ошибка реле, т.е.

$$\Delta t_{заг} = \Delta t_{MT31} + t_{MT32} + \Delta t_{O.B} + \Delta t_{н.о.} + \Delta t_{зан} = 1 + 0,5 = 1,5 \quad [5.2]$$

где Δt_{MT31} и Δt_{MT32} - погрешности реле тока защит MT31 и MT32 соответственно в сторону увеличения и уменьшения времени срабатывания.

Реле типа РТ-81 на уставке 1,4С в независимой от тока части характеристики имеет погрешность

$$\Delta t_p = \pm 0,15 C.$$

Реле типа РТВ на любой уставке по времени имеют погрешность в независимой части характеристики $\Delta t_p = \pm 0,15 C$

По условию задачи для реле РТ-81 согласно [5.2]

$$\Delta t_{заг} = 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0,140,1 = 0,64[C]$$

У реле типа РТВ $t_{н.о.} = 0$, следовательно для реле РТВ $\Delta t_{заг} = 0,5 C$

Если защита MT31 быстродействующая то в [5.1] и [5.2] следует принять $\Delta t_{р.в. MT31} = 0$ и $t_{MT31} = 0$

Задача 5.2. Определить выдержки времени максимальных токовых защит сетей 10кВ и 35кВ и трансформаторов Тр1 и Тр2, приведенных на Рис 5.2.

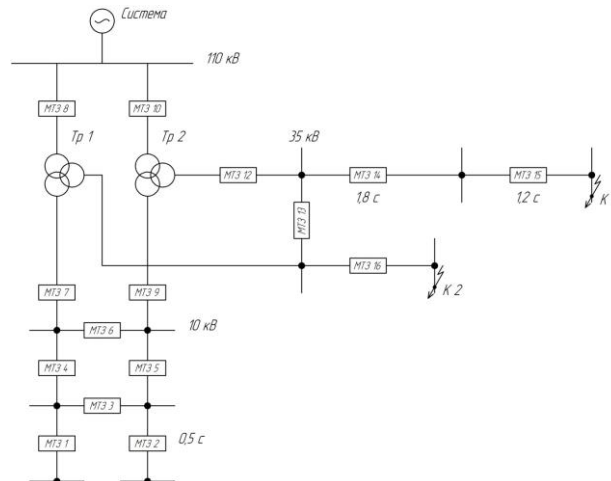


Рис.5.2. Схема питания радиальных сетей 35кВ и 10кВ от понижающей подстанции 110/35/10кВ.

Исходные данные:

- при К.З. в точках К1, К2, К3 начинают одновременно работать последовательно включенные защиты;
- MT31...MT35 выполнены с вторичными реле прямого действия типа РТВ с ограниченно зависимой от тока характеристикой времени действия;
- MT36 ...MT316 имеют независимую от тока характеристику времени действия;

- выдержки времени МТ31 и МТ33 в независимой части характеристики

$$\Delta t_{MT31} = \Delta t_{MT32} = 0,5C$$

- $\Delta t_{MT315} = 1,2C$; $\Delta t_{MT316} = 1,8C$;

- $t_{0,6} = 0,1C$

Решение. Для определения выдержки времени максимальных токовых защит необходимо рассчитать ступень селективности для защит с ограничено зависимой от тока характеристикой времени действия (МТ31...МТ35) и для защит с независимой от тока характеристики времени действия (МТ36...МТ316), что было сделано в задаче 5.1. Там было показано, что ступень селективности в независимой части характеристики реле типа РТВ при $t_{0,6} = 0,1C$ составляет $t_{зав.} = 0,5C$, а для защит с независимой характеристикой времени действия при $t_{0,6} = 0,1C$ составляет $t_{нез.} = 0,32...0,45C$.

А т.к. рекомендовалось учитывать фактическую ошибку реле времени, то в данной задаче принимаем $\Delta t_{нез.} = 0,4C$.

Итак:

- защита МТ33 должна быть отстроена по времени в независимой части своей характеристики от защит МТ31 и МТ32, т.е. $t_{MT33} = t_{MT31} + \Delta t_{зав.} = 0,5 + 0,5 = 1[C]$;

- аналогично защиты МТ34 и МТ35 согласуются по времени с защитой МТ33, т.е. $t_{MT34} = t_{MT35} = t_{MT33} + \Delta t_{зав.} = 1 + 0,5 = 1,5[C]$

Степень селективности между двумя защитами с разными характеристиками времени действия определяем на основании [5.1] и [5.2] по формуле:

$$\Delta t = \Delta t_{MT31} + \Delta t_{р.в. МТ36} + t_{0,6} + t_{зам.} \quad [5.3]$$

Откуда $\Delta t = 0,15 + 0,06 + 0,1 + 0,1 = 0,41[C]$

Степень селективности вычислена из условия применения реле времени с пределами уставок $0,25...3,5C$.

Таким образом $t_{MT36} = t_{MT35} + \Delta t = 1,5 + 0,41 = 1,91[C]$

Далее определяем выдержки времени защит с независимой характеристикой времени действия:

$$t_{MT314} = t_{MT315} + \Delta t_{нез.} = 1,23 + 0,4 = 1,6[C]$$

$$t_{MT313} = t_{MT316} + \Delta t_{нез.} = 1,8 + 0,4 = 2,2[C]$$

$$t_{MT311} = t_{MT312} = t_{MT313} + \Delta t_{нез.} = 2,2 + 0,4 = 2,6[C]$$

$$t_{MT37} = t_{MT39} = t_{MT36} + \Delta t_{нез.} = 1,91 + 0,4 = 2,31[C]$$

$$t_{MT38}=t_{MT310}=t_{MT311}+\Delta t_{нез} = 2,6 + 0,4 = 3,0[C]$$

РАЗДЕЛ 1.5. Максимальная токовая защита (МТЗ)

Тема 1.5.2. Расчет уставок максимальной токовой защиты .

Задача 6.1. Определить уставки защит МТЗ 2...МТЗ4 представленной на Рис 6.1. схемы участка радиальной кабельной сети 6 кВ.

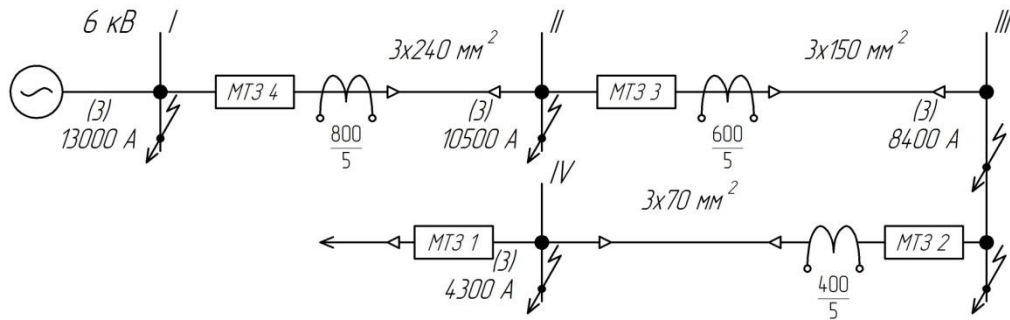


Рис 6.1. Участок радиальной кабельной сети 6 кВ.

Исходные данные:

- МТЗ 1 элементов присоединённых к шинам IV 6кВ является быстродействующей (токовая отсечка);
- время отключения выключателей $t_{0,в}=0,1C$;
- одиночные кабели с алюминиевыми жилами проложенной в земле;
- защиты выполнены по двухфазной двухрелейной системе, представленной на Рис 6.2. с реле типа РТ-81/1 у которых ограниченно зависима от тока характеристика времени срабатывания и мощный переключающий контакт, способный дешунтировать и шунтировать управляемую цепь при токах до 150А;
- величины максимальных рабочих нагрузок на кабели неизвестны;
- данные токов при трехфазных К.З., кабели и ТТ приведены на Рис 6.1;

Решение.

Выбор уставок максимальных токовых защит заключается в определении первичных и вторичных токов срабатывания, времени срабатывания, типов реле, минимальных коэффициентов чувствительности при металлических К.З. в конце защищаемых зон, когда эти защиты действуют в качестве основных и резервных. Кроме того защиты двух и более последовательно соединенных элементов (например трансформатор-линии-двигатели) должны быть согласованы по чувствительности и по времени, т.е. оны должны действовать селективно: отключать место повреждения ближайшим выключателем.

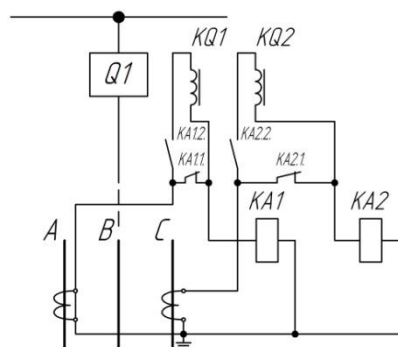


Рис.6.2. Схема двухфазной релейной защиты с дешунтированием катушек дешунтирования выключателя.

Первичный ток срабатывания МТЗ должен быть отстроен, от токов самозапуска полностью заторможенных электродвигателей и другой нагрузки при включении защищаемого элемента после ликвидации К.З. Кроме того, защиты не должны приходить в действие при максимально возможном токе нагрузки. Исходя из этих условий первичный ток срабатывания защиты в симметричном нормальном режиме вычисляется по формуле:

$$I_{с.з} = \frac{k_n \cdot k_z \cdot I_{p.max}}{k_B}, [6.1]$$

Где $k_n = 1,2...1,3$ - коэффициент надежности;

k_z - коэффициент самозапуска нагрузки;

k_B - коэффициент возврата реле;

Ток срабатывания реле вычисляют по формуле:

$$I_{с.р.} = \frac{k_{сх}^{(3)} \cdot k_n \cdot k_z \cdot I_{p.max}}{k_B \cdot k_{ТТ}}, [6.2]$$

где $k_{сх}^{(3)}$ - коэффициент схемы – отношение тока в реле к вторичному току ТТ в симметричном нормальном режиме и при трехфазном К.З. Так при соединении ТТ в Δ или на разность токов двух фаз $k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$; при соединении ТТ в полную или неполную $k_{сх}^{(3)} = 1$.

В тех случаях, когда $I_{p.max}$ (максимальный рабочий ток) неизвестен, его принимают равным длительному допустимому току нагрузки согласно ПУЭ, т.е.

$$I_{p.max} = I_{дл.доп} [6.3.]$$

Коэффициент чувствительности определяют при минимальных токах К.З. по формуле

$$k_4 = \frac{I_p}{I_{c.p.}} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot \frac{I_{к.з. \min}}{k_{TT}}}{k_{cx}^{(3)} \cdot \frac{I_{c.з}}{k_{TT}}} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{к.з. \min}}{k_{cx}^{(3)} \cdot I_{c.з}} \quad [6.4]$$

На основании вышеизложенного

Определяем установки МТЗ 2

Т.к. согласно исходным данным $I_{p.\max}$ и k_3 не заданы, принимаем для всех кабелей ток кабеля $I_{каб.ном} = I_{p.\max} = I_{дл.дон}$ и в соответствии с требованиями, приведенными в «Сборнике директивных материалов. Электрическая часть»

$$I_{c.з.МТЗ2} = 4I_{ном} = 4I_{дл.дон} \quad [6.5]$$

Согласно ПУЭ для алюминиевого кабеля сечением $3 \times 70 \text{ мм}^2$

$$I_{дл.дон} = 190 \text{ А, тогда}$$

$$I_{c.з.МТЗ2} = 4 \times 190 = 760 \text{ А}$$

Ток срабатывания реле согласно [6.2]

$$I_{c.p.} = 1 \cdot \frac{760}{\frac{400}{5}} = 9,5 \text{ [А]}$$

Выдержку времени в независимой части характеристики реле защиты 2 отстраиваемой от быстродействующей защиты элементов, присоединённых к шинам IV согласно [5.2] без учета $\Delta t_{МТЗ1}$ (токовая отсечка согласно исходным данным).

$$\Delta t_{зав.МТЗ2} = \Delta t_{МТЗ2} + \Delta t_{O.B.} + \Delta t_{II.O} + t_{зав} = 0,1 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,45 \text{ [с]}$$

Принимаем минимально возможную уставку в независимой части характеристики времени срабатывания реле РТ-85/1

$$t_{МТЗ2У} = 0,5 \text{ с.}$$

Коэффициент чувствительности вычисляем при двухфазном К.З. на шинах IV согласно [6.4], учитывая, что

$$k_{cx.}^{(2)} = k_{cx.}^{(3)} = 1$$

$$k_{cx}^{(2)} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{к.з. \min}}{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{c.з.МТЗ2}} = \frac{1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4300}{1 \cdot 760} = 4,9;$$

$k_{ч.МТЗ2} = 4,9 > 1,5$, что удовлетворяет требованию ПУЭ. Далее определяем уставки МТЗ 3.

Ток срабатывания защиты вычисляем согласно [6.5]

$$I_{c.з.МТЗ3} = 4I_{дл.дон.} = 4 \cdot 275 = 1100 [A]$$

Эта защита должна быть согласована по чувствительности с МТЗ 2: ее ток срабатывания выбирается на 30%...40% больше, чем ток срабатывания МТЗ 2.

$$I_{c.з.МТЗ3} = k_{н.с.} \cdot I_{c.з.МТЗ2}, \quad [6.6]$$

Где $k_{н.с.} = 1,3...1,4$ - коэффициент надежности согласования РТ-80 и РТ-90, установленных на линиях 6, 10 и 35кВ; для реле РТ-40 и РТВ соответственно $k_{н.с.} = 1,25$ и $1,5$; а, скажем, для реле РТ-40, установленных на линиях 110кВ и выше $k_{н.с.} = 1,1...1,2$.

$$\text{Для МТЗ 3 } I_{c.з.МТЗ3} = 1,4 \times 760 = 1064 [A].$$

Как видим, условие согласования близко к условию отстройки от токов самозапуска нагрузки

$$1064 A \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} 1100 A.$$

Ток срабатывания реле

$$I_{c.р.} = \frac{k_{с.х.}^{(3)} \cdot I_{c.з.МТЗ3}}{k_{ТТ}} = \frac{1 \cdot 1100}{\frac{600}{5}} = 9,15 [A]$$

Далее вычисляем k_{χ} защиты при ее действии в качестве основной при К.З. на шинах III:

$$k_{\chi.осн}^{(2)} = \frac{I_{к.з.III}^{(2)}}{I_{c.з.МТЗ3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8400}{1100} = 6,61 > 1,5.$$

И, в завершении, вычисляем k_{χ} защиты при ее действии в качестве резервной при К.З. на шинах IV:

$$k_{\chi.рез}^{(2)} = \frac{I_{к.з.IV}^{(2)}}{I_{c.з.МТЗ3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4300}{1100} = 3,36 > 1,2.$$

Как видим, коэффициент чувствительности МТЗ 3 удовлетворяет требования ПУЭ, при ее действии как в качестве основной – при К.З. на шинах III, так как в качестве резервной – при К.З. на шинах IV.

Степень селективности вычисляем согласно [5.2], учитывая, что при уставке реле РТ-85/1 $t_y = 0,5C$ погрешность $\Delta t_{р.МТЗ2} = \pm 0,1C$:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_{р.МТЗ2} + \Delta t_{р.МТЗ3} + t_{О.В.} + t_{И.О.} + t_{зан.} = \\ &= 0,1 + 0,15 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,6 [C]. \end{aligned}$$

Для обеспечения селективности при любых значениях тока принимаем $t_{заб.} = 0,6C$ в независимой части характеристики. При этом уставка реле составит

$$t_{y.MT33} = t_{y.MT32} + \Delta t_{зав.} = 0,5 + 0,6 = 0,1[C]$$

Определяем уставки МТЗ 4

Аналогично МТЗ 3 определяем ток срабатывания защиты

$$t_{с.з.МТЗ4} = 4 \cdot I_{дл.дон} = 4 \cdot 355 = 1420[A].$$

Ток срабатывания МТЗ 4 в результате согласования ее с МТЗ 3:

$$I_{с.з.МТЗ4} = k_{н.с} \cdot I_{с.з.МТЗ3} = 1,3 \cdot 1100 = 1430[A]$$

$$1420A \xrightarrow{\quad} 1430A$$

Ток срабатывания реле

$$I_{с.р.} = \frac{1420}{\frac{800}{5}} = 8,87[A]$$

$$k_{ч.осн.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{10500}{1420} = 6,40;$$

$$k_{ч.рез.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8400}{1420} = 5,12;$$

$$\Delta t_{зав.} = 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,65[C];$$

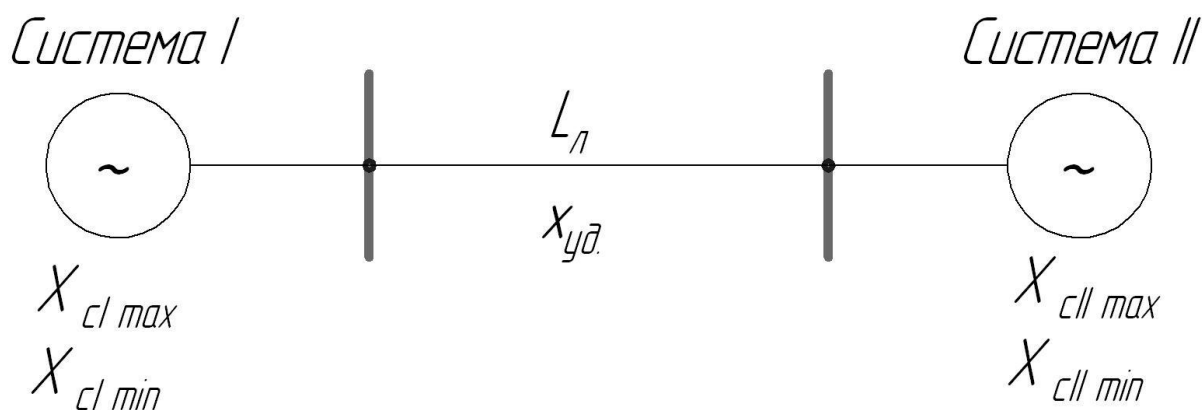
Установка выдержки времени в независимой части характеристики МТЗ4

$$t_{yMT34} = t_{yMT33} + \Delta t_{зав} = 1,1 + 0,65 = 1,75[C]$$

РАЗДЕЛ 1.5. Максимальная токовая защита (МТЗ)

Тема 1.5.3. Расчет токов срабатывания и зоны действия максимальных фазных отсечек линии с двухсторонним питанием

Для линии с двусторонним питанием по исходным данным, вычислить токи срабатывания и зоны действия максимальных фазных отсечек I и II без выдержки времени, установленных на обоих концах линии I и II. При расчете токов срабатывания учесть, что в любой точке К.З. на землю на линии полные токи в поврежденных фазах с обеих сторон линии меньше токов при трехфазных К.З. на линии.



На линии с двухсторонним питанием максимальные фазные токовые отсечки без выдержки времени, устанавливаемые на обоих концах линии, должны быть отстроены:

- от максимальных значение сверхпереходных токов, протекающих по защищаемой линии при трехфазных К.З. на ее концах, что равнозначно к.з. на шинах, к которым она подключена;
- от максимальных значений токов при качаниях генераторов системы I относительно генераторов системы II $I_{кач\ max}$, которые имеют место на линии при расхождении по фазе ЭДС этих систем на 180° в их максимальных режимах. Большее значение тока, вычисленное по этим условиям, принимается за расчетное.

Максимальные токи трехфазного К.З., протекающие по линии от системы I при К.З. у шин II $I_{лк}^{(3)}$ и от системы II при К.З. у шин I $I_{ллк}^{(3)}$:

$$I_{лк}^{(3)} = \frac{U_{ср.\Phi}}{x_{cl\ max} + x_{л}} \quad (1)$$

$$I_{ллк}^{(3)} = \frac{U_{ср.\Phi}}{x_{cII\ max} + x_{л}} \quad (2)$$

Максимальный ток качений

$$I_{кач.\ max} = \frac{2 \cdot 1.1 U_{ср.\ \Phi}}{x_{cl\ max} + x_{л} + x_{cII\ max}} \quad (3)$$

Ток срабатывания отсечки от тока качаний определяется по формуле

$$I_{с.отс.\ I} = I_{с.отс.\ II} = k_n \cdot I_{кач.\ max} \quad (4)$$

Где $k_n = 1, 2 \dots 1, 3$.

Графически для определения зоны действия отсечек вычисляется максимальные токи при трехфазных К.З. $I_{k\ max}^{(3)}$ и минимальные токи при двухфазных К.З. $I_{k\ min}^{(2)}$ в нескольких точках линии.

$$I_{к.л}^{(3)} = \frac{U_{ср.\ \Phi}}{x_c + x_{уд} \cdot m \cdot l} \quad (5)$$

$$I_{к.л}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{к.л}^{(3)} \quad (6)$$

где m — часть длины l ;

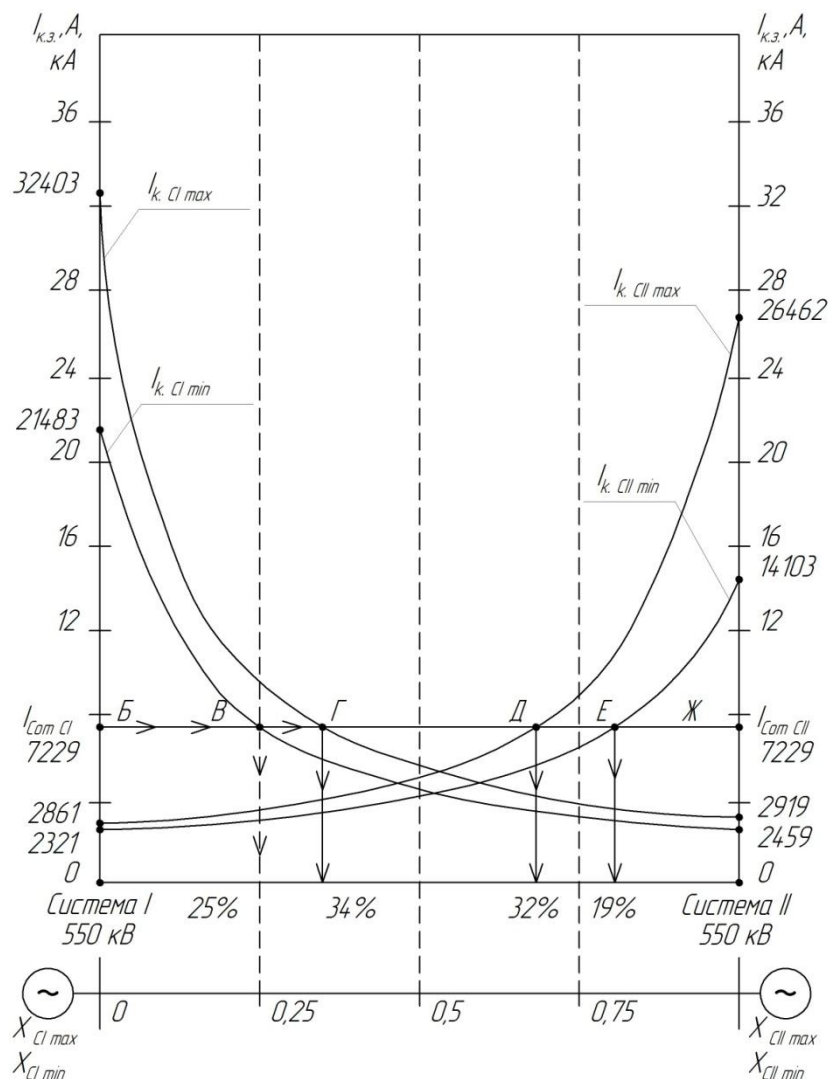
x_c — сопротивление системы в максимальном или минимальном режиме.

Результаты расчета заносим в таблицу

Таблица

Относительная длина линии (м) от шин до точки К.З.	Ток в линии, А при К.З.			
	трехфазное (максимальный режим)		двухфазное (минимальный режим)	
	от системы I	от системы II	от системы I	от системы II
0				
25				
50				
75				
100				

По вычисленным токам (данным таблицы) строят кривые зависимости токов К.З. в линии от её длины.



Относительная длина линий I-II

Проводим линии БВГ и ЖЕД до пересечения с кривыми токов. По точкам пересечения определяем графически зоны действия фазных отсечек.

Результаты, полученные графоаналитическим методом проверяем аналитическим методом по формулам

$$x_{\%отс. I \max}^{(3)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{U_{\text{ср. ф}}}{I_{\text{с. отс. I}}} - x_{\text{с I max}} \right) \quad (7)$$

$$x_{\%отс. I \min}^{(2)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{0.867 \cdot U_{\text{ср. ф}}}{I_{\text{с. отс. I}}} - x_{\text{с I min}} \right) \quad (8)$$

$$x_{\%отс. II \max}^{(3)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{U_{\text{ср. ф}}}{I_{\text{с. отс. II}}} - x_{\text{с II max}} \right) \quad (9)$$

$$x_{\%отс. II \min}^{(2)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{0.867 \cdot U_{\text{ср. ф}}}{I_{\text{с. отс. II}}} - x_{\text{с II min}} \right) \quad (10)$$

Рекомендуемая литература:

Основная литература:

Басс, Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие/ Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев ; ред. А. Ф. Дьяков- М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 0/ 5 экз.

Дополнительная литература:

Грушвицкий, Р.И. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой: Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, Е. П. Угрюмов- СПб.: БХВ-Петербург, 2006. - 11/ 0 экз.

Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы: ред.: В. Г. Герасимов [и др.] - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 0/ 2 экз.

Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства: ред.: В. Г. Герасимов [и др.] - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 0/ 2 экз.

Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии: ред.: В. Г. Герасимов [и др.] - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 0/ 2 экз.

Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии: ред.: В. Г. Герасимов [и др.] - М.: Издательство МЭИ, 2011. - 0/ 2 экз.

Интернет ресурсы:

<http://ftoe.ru> – электротехнический портал.