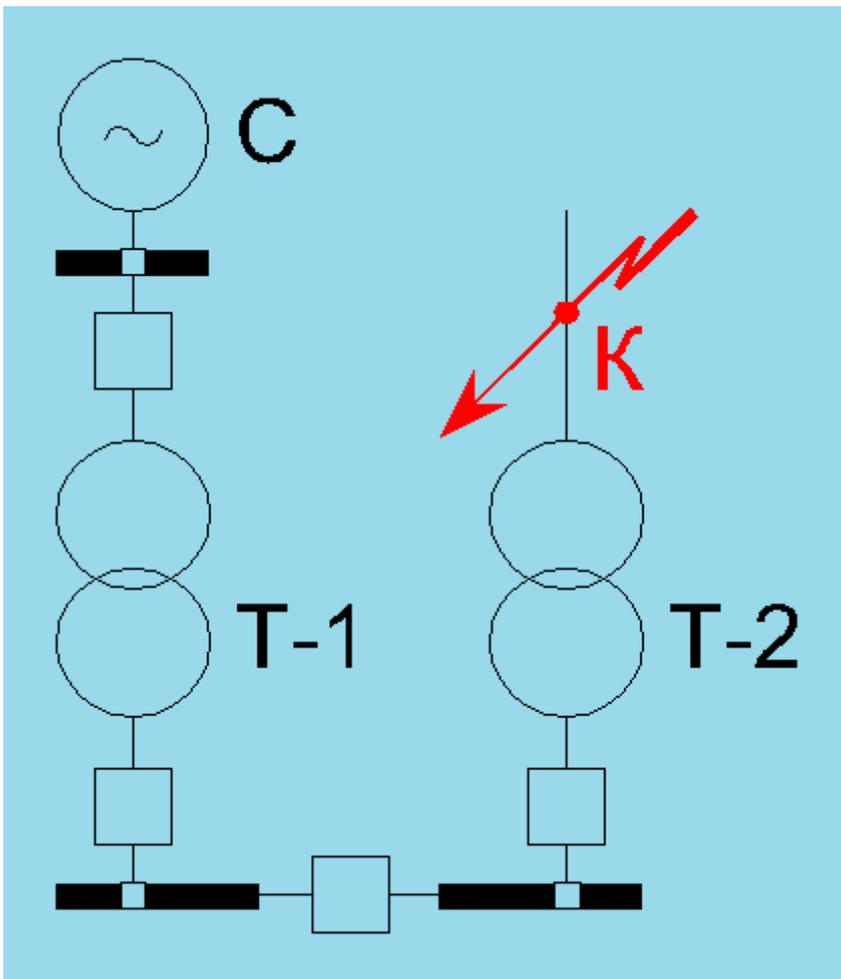


Методика расчета токов КЗ на стороне ВН трансформатора при питании со стороны СН или НН



ТВМ

Версия 1

09.10.18.

Методика расчета токов КЗ на стороне ВН трансформатора при питании со стороны СН или НН

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно нормальным режимом работы понижающих трансформаторов с высшим напряжением 110-220 кВ является раздельная работа на сторонах СН и НН 6-35 кВ. Данный режим является расчетным для устройств РЗА трансформаторов и сети 110-220 кВ. При этом допускается кратковременная параллельная работа трансформаторов на стороне СН или НН на время производства оперативных переключений.

Если по режимам работы сетей 6-35 кВ необходима длительная параллельная работа трансформаторов на стороне СН или НН в нормальном или ремонтных режимах, то при этом необходимо выполнение ряда технических мероприятий как в устройствах РЗА трансформаторов, работающих параллельно на стороне СН или НН, так и в устройствах РЗА питающей сети 110-220 кВ.

Как минимум, необходимо проверить чувствительность ДЗТ трансформатора и МТЗ на стороне СН или НН трансформатора или МТЗ на секционном выключателе СН или НН ко всем видам КЗ (трехфазным, двухфазным, двухфазным на землю, однофазным) на стороне ВН при отсутствии питания со стороны ВН при наличии питания со стороны СН или НН от другого трансформатора (рис. 1).

Далее приведена методика расчета всех видов КЗ на стороне ВН трансформатора при питании со стороны СН или НН.

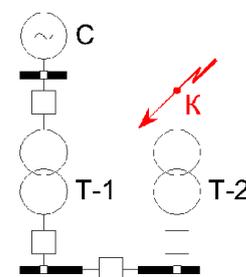


Рис. 1. КЗ на стороне ВН трансформатора.

2. Основные положения.

1. Принятая расчетная схема КЗ на стороне ВН трансформатора при питании со стороны СН или НН от другого трансформатора приведена на рис. 1. Место КЗ при этом может быть как на системе шин ВН, отключенной действием ДЗШ, так и на выводах ВН трансформатора при отключенном выключателе ВН трансформатора. Ток КЗ протекает от энергосистемы через два последовательно включенных трансформатора.

2. Нейтрали на стороне ВН обоих трансформаторов заземлены.

3. В схемах замещения учитываются только индуктивные сопротивления.

4. Рассчитываются только минимальные токи всех видов КЗ (трехфазного, двухфазного, двухфазного на землю, однофазного) для проверки чувствительности защит. Максимальные токи КЗ не рассчитываются.

5. Питающая энергосистема со стороны ВН учитывается эквивалентными параметрами в минимальном режиме.

6. Сопротивления трансформаторов рассчитываются с учетом РПН. Причем, так как невозможно заранее предвидеть, в каком положении РПН токи КЗ будут минимальными, необходимо выполнять расчеты токов КЗ с учетом сопротивлений трансформаторов в двух крайних положениях РПН.

7. Нагрузка не учитывается.

3. Схемы и группы соединения обмоток трансформаторов.

В зависимости от схемы и группы соединения обмоток трансформаторов возможны три типовых принципиально различных варианта расчетных схем:

1. Токи КЗ протекают по обмоткам трансформаторов, имеющим схему и группу соединения $Y/\Delta-11$ (рис. 2). При этом трансформаторы могут быть как двухобмоточными (рис. 2а), так и трехобмоточными (рис. 2б).

Если трансформаторы трехобмоточные, то они соединены между собой (секционным или шиносоединительным выключателем) на стороне НН (обмотки НН соединены в треугольник). Обмотки СН трансформаторов (соединенные в звезду с изолированной нейтралью) работают в режиме холостого хода (ток нагрузки не учитывается) и на протекание токов КЗ никак не влияют. Даже если сеть СН работает не с изолированной, а с компенсированной нейтралью, и в нейтрали СН включен дугогасящий реактор, это практически никак не влияет на протекание токов КЗ (прямой, обратной и нулевой последовательностей).

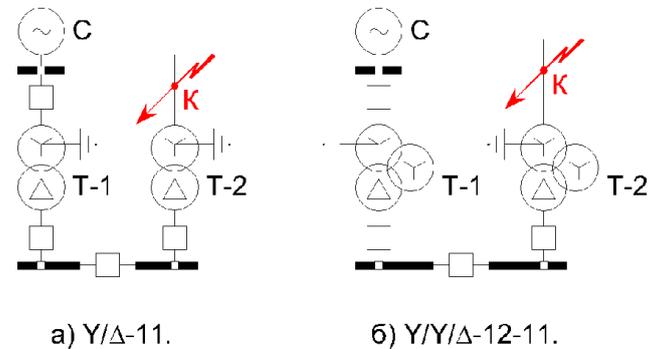


Рис. 2. Трансформаторы $Y/\Delta-11$.

2. Токи КЗ протекают по обмоткам трансформаторов, имеющим схему и группу соединения $Y/Y-12$ (рис. 3). При этом трансформаторы могут быть только трехобмоточными, соединенными между собой (секционным или шиносоединительным выключателем) на стороне СН.

В обмотках СН трансформаторов протекают токи прямой и обратной последовательностей, а ток нулевой последовательности (при КЗ на землю) отсутствует, так как данные обмотки соединены в звезду с изолированной нейтралью. Даже если сеть СН работает с компенсированной нейтралью, и в нейтрали СН включен дугогасящий реактор, это практически никак не влияет на протекание токов нулевой последовательности при КЗ на землю на стороне ВН.

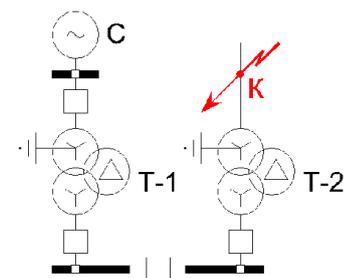


Рис. 3. Трансформаторы $Y/Y/\Delta-12-11$.

Обмотка НН трансформатора Т-2, соединенная в треугольник, работает в режиме холостого хода и не влияет на протекание токов КЗ прямой и обратной последовательностей. Но данную обмотку надо учитывать в схеме замещения нулевой последовательности при расчетах КЗ на землю, так как в ней протекают токи нулевой последовательности.

3. Токи КЗ протекают по обмоткам, имеющим схему и группу соединения $Y/\Delta-11$ (рис. 4). Трансформаторы с расщепленной обмоткой НН.

Третьи обмотки трансформаторов, соединенные в треугольник, работают в режиме холостого хода и не влияют на протекание токов КЗ прямой и обратной последовательностей. Но данные обмотки надо учитывать в схеме замещения нулевой последовательности при расчетах КЗ на землю, так как в данных обмотках протекают токи нулевой последовательности.

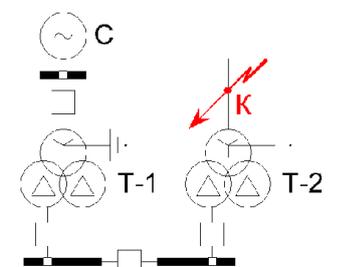


Рис. 4. Трансформаторы $Y/\Delta/\Delta-11-11$ с расщепленной обмоткой НН.

4. Параметры схем замещения.

1. Эквивалентные параметры питающей энергосистемы (ЭДС системы E_C , сопротивления системы X_{C1} , X_{C2} , X_{C0} прямой, обратной и нулевой последовательности) в минимальном режиме работы принимаются по данным РДУ или сетевой организации.

2. Сопротивления прямой последовательности трансформаторов рассчитываются по паспортным данным трансформаторов с учетом РПН.

3. Сопротивления обратной последовательности трансформаторов равны сопротивлениям прямой последовательности.

4. Сопротивления нулевой последовательности обмоток трехфазных трансформаторов в соответствии с /1, стр. 34/ могут приниматься примерно равными 0,85-0,9 от сопротивлений прямой последовательности соответствующих обмоток.

Сопротивления нулевой последовательности группы однофазных трансформаторов равны соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

В схемах замещения нулевой последовательности трансформаторов учитываются только те обмотки, по которым могут протекать токи нулевой последовательности, то есть, обмотки, соединенные по схеме звезда с заземленной нейтралью или треугольник. Соответственно, сопротивления прямой последовательности обмоток трансформаторов для расчета сопротивлений нулевой последовательности принимаются в зависимости от рассмотренных выше трех расчетных схем:

- для схемы рис. 2 – сопротивление ВН-НН.

- для схемы рис. 3 – также сопротивление ВН-НН (хотя в схемах замещения прямой и обратной последовательностей используется сопротивление ВН-СН), так как токи КЗ прямой и обратной последовательностей протекают по обмоткам ВН и СН, а токи нулевой последовательности протекают по обмотке ВН и замыкаются в треугольнике обмотки НН.

- для схемы рис. 4 - сопротивление ВН-НН при параллельном соединении обмоток НН (хотя в схемах замещения прямой и обратной последовательностей используется сопротивление ВН-НН при раздельной работе обмоток НН), так как токи КЗ прямой и обратной последовательностей протекают по обмотке ВН и по одной обмотке НН, а токи нулевой последовательности протекают по обмотке ВН и замыкаются в обеих обмотках НН, соединенных в треугольник.

5. Расчет эквивалентных сопротивлений схемы замещения.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$X_1 = X_{C1} + X_{T1.1} + X_{T2.1}$$

где: X_{C1} – эквивалентное сопротивление прямой последовательности питающей энергосистемы.

$X_{T1.1}$ - сопротивление прямой последовательности трансформатора Т-1.

$X_{T2.1}$ - сопротивление прямой последовательности трансформатора Т-2.

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$X_2 = X_1$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_0 = X_{T2.0}$$

где: $X_{T2.0}$ - сопротивление нулевой последовательности трансформатора Т-2.

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при КЗ на землю на стороне ВН трансформатора Т-2 равно сопротивлению нулевой последовательности только трансформатора Т-2, так как ток нулевой последовательности протекает между точкой КЗ на землю и обмоткой ВН трансформатора Т-2 и замыкается в обмотке НН трансформатора Т-2, соединенной в треугольник. Далее, в линейных проводах на стороне НН, в трансформаторе Т-1 и в питающей энергосистеме ток нулевой последовательности отсутствует.

6. Расчет токов КЗ (схема рис. 2а).

6.1. Трехфазное КЗ.

Трехфазное КЗ – режим симметричный, в токах КЗ имеются составляющие только прямой последовательности. Токи обратной и нулевой последовательностей отсутствуют. Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot X_1} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = 0$$

$$I_{0.ВН} = 0$$

где: E_C – эквивалентная линейная ЭДС питающей энергосистемы.

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = I_{1.ВН}$$

$$I_{B.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$I_{C.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1.НН} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ}$$

$$I_{2.НН} = 0$$

$$I_{0.НН} = 0$$

где: K_T – коэффициент трансформации трансформатора Т-2.

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{A.НН} = I_{1.НН}$$

$$I_{B.НН} = I_{1.НН} \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$I_{C.НН} = I_{1.НН} \cdot e^{j120^\circ}$$

6.2. Двухфазное КЗ фаз В и С.

Двухфазное КЗ – режим несимметричный, в токах КЗ имеются составляющие прямой и обратной последовательности. Ток нулевой последовательности отсутствует. Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot (X_1 + X_2)} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{E_C}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot X_1} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = -I_{1.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j180^\circ}$$

$$I_{0.ВН} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = I_{1.ВН} + I_{2.ВН} = 0$$

$$I_{B.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{j120^\circ} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{C.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{j90^\circ}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1.НН} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ}$$

$$I_{2.НН} = I_{2.ВН} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j180^\circ} \cdot e^{-j30^\circ} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ}$$

$$I_{0.HH} = 0$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$\begin{aligned} I_{A.HH} &= I_{1.HH} + I_{2.HH} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j90^\circ} \\ I_{B.HH} &= I_{1.HH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.HH} \cdot e^{j120^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = \\ &= I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} = 2 \cdot I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} \\ I_{C.HH} &= I_{1.HH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.HH} \cdot e^{-j120^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = \\ &= I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j90^\circ} \end{aligned}$$

6.3. Однофазное КЗ фазы А.

Однофазное КЗ – режим несимметричный, в токах КЗ имеются составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$\begin{aligned} I_{1.BH} &= \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot (X_1 + X_2 + X_0)} \cdot e^{-j90^\circ} \\ I_{2.BH} &= I_{1.BH} \\ I_{0.BH} &= I_{1.BH} \end{aligned}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$\begin{aligned} I_{A.BH} &= I_{1.BH} + I_{2.BH} + I_{0.BH} = 3 \cdot I_{1.BH} \\ I_{B.BH} &= I_{1.BH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.BH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{0.BH} = I_{1.BH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.BH} = 0 \\ I_{C.BH} &= I_{1.BH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.BH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{0.BH} = I_{1.BH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.BH} = 0 \end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$\begin{aligned} I_{1.HH} &= I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \\ I_{2.HH} &= I_{2.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} \\ I_{0.HH} &= 0 \end{aligned}$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$\begin{aligned} I_{A.HH} &= I_{1.HH} + I_{2.HH} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} \cdot I_{1.BH} \cdot K_T \\ I_{B.HH} &= I_{1.HH} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.HH} \cdot e^{j120^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = \\ &= I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j90^\circ} = 0 \\ I_{C.HH} &= I_{1.HH} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.HH} \cdot e^{-j120^\circ} = I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = \\ &= I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} + I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{-j150^\circ} = \sqrt{3} \cdot I_{1.BH} \cdot K_T \cdot e^{j180^\circ} \end{aligned}$$

6.4. Двухфазное КЗ на землю фаз В и С.

Двухфазное КЗ на землю – режим несимметричный, в токах КЗ имеются составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$\begin{aligned} I_{1.BH} &= \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot \left(X_1 + \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 + X_0} \right)} \cdot e^{-j90^\circ} \\ I_{2.BH} &= -I_{1.BH} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} = I_{1.BH} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \\ I_{0.BH} &= -I_{1.BH} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} = I_{1.BH} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \end{aligned}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$\begin{aligned}
 I_{A.ВН} &= I_{1.ВН} + I_{2.ВН} + I_{0.ВН} = I_{1.ВН} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} + I_{1.ВН} \cdot \left(\frac{X_0}{X_2 + X_0} + \frac{X_2}{X_2 + X_0} \right) \cdot e^{j180^\circ} = I_{1.ВН} + I_{1.ВН} \cdot e^{j180^\circ} = 0 \\
 I_{B.ВН} &= I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{0.ВН} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot \left(e^{-j120^\circ} + \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{-j60^\circ} + \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \right) \\
 I_{C.ВН} &= I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{0.ВН} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot \left(e^{j120^\circ} + \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j60^\circ} + \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \right)
 \end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$\begin{aligned}
 I_{1.НН} &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \\
 I_{2.НН} &= I_{2.ВН} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} = I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ} \cdot K_T \cdot e^{-j30^\circ} = I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} \\
 I_{0.НН} &= 0
 \end{aligned}$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$\begin{aligned}
 I_{A.НН} &= I_{1.НН} + I_{2.НН} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot \left(e^{j30^\circ} + \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j150^\circ} \right) \\
 I_{B.НН} &= I_{1.НН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.НН} \cdot e^{j120^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{-j90^\circ} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot \left(1 + \frac{X_0}{X_2 + X_0} \right) \cdot e^{-j90^\circ} \\
 I_{C.НН} &= I_{1.НН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.НН} \cdot e^{-j120^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = \\
 &= I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j150^\circ} + I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot K_T \cdot e^{j30^\circ} = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot \left(e^{j150^\circ} + \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j30^\circ} \right)
 \end{aligned}$$

7. Расчет токов КЗ (схема рис.3).

При всех видах КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2 в схеме рис. 3 полные фазные токи и их симметричные составляющие на сторонах ВН трансформаторов Т-1, Т-2 равны соответствующим токам в схеме рис. 2а.

7.1. Трехфазное КЗ.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot X_1} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = 0$$

$$I_{0.ВН} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = I_{1.ВН}$$

$$I_{B.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$I_{C.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1.СН} = I_{1.ВН} \cdot K_T$$

$$I_{2.СН} = 0$$

$$I_{0.СН} = 0$$

где: K_T – коэффициент трансформации трансформатора Т-2 между обмотками ВН и СН.

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A.СН} = I_{1.СН}$$

$$I_{B.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$I_{C.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{j120^\circ}$$

7.2. Двухфазное КЗ фаз В и С.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot X_1} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j180^\circ}$$

$$I_{0.ВН} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = 0$$

$$I_{B.ВН} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{C.ВН} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{j90^\circ}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1.СН} = I_{1.ВН} \cdot K_T$$

$$I_{2.СН} = I_{2.ВН} \cdot K_T = I_{1.ВН} \cdot K_T \cdot e^{j180^\circ}$$

$$I_{0.СН} = 0$$

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A.СН} = I_{A.ВН} \cdot K_T = 0$$

$$I_{B.СН} = I_{B.ВН} \cdot K_T = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{-j90^\circ} \cdot K_T$$

$$I_{C.СН} = I_{C.ВН} \cdot K_T = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН} \cdot e^{j90^\circ} \cdot K_T$$

7.3. Однофазное КЗ фазы А.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot (X_1 + X_2 + X_0)} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = I_{1.ВН}$$

$$I_{0.ВН} = I_{1.ВН}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = 3 \cdot I_{1.ВН}$$

$$I_{B.ВН} = 0$$

$$I_{C.ВН} = 0$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1.СН} = I_{1.ВН} \cdot K_T$$

$$I_{2.СН} = I_{2.ВН} \cdot K_T = I_{1.ВН} \cdot K_T = I_{1.СН}$$

$$I_{0.СН} = 0$$

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A.СН} = I_{1.СН} + I_{2.СН} = 2 \cdot I_{1.СН}$$

$$I_{B.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.СН} \cdot e^{j120^\circ} = I_{1.СН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{1.СН} \cdot e^{j120^\circ} = I_{1.СН} \cdot e^{j180^\circ}$$

$$I_{C.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.СН} \cdot e^{-j120^\circ} = I_{1.СН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{1.СН} \cdot e^{-j120^\circ} = I_{1.СН} \cdot e^{j180^\circ}$$

7.4. Двухфазное КЗ на землю фаз В и С.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot \left(X_1 + \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 + X_0} \right)} \cdot e^{-j90^\circ}$$

$$I_{2.ВН} = I_{1.ВН} \cdot \frac{X_0}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ}$$

$$I_{0.ВН} = I_{1.ВН} \cdot \frac{X_2}{X_2 + X_0} \cdot e^{j180^\circ}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН} = 0$$

$$I_{B.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{0.ВН}$$

$$I_{C.ВН} = I_{1.ВН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.ВН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{0.ВН}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1.СН} = I_{1.ВН} \cdot K_T$$

$$I_{2.СН} = I_{2.ВН} \cdot K_T$$

$$I_{0.СН} = 0$$

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A.СН} = I_{1.СН} + I_{2.СН}$$

$$I_{B.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.СН} \cdot e^{j120^\circ}$$

$$I_{C.СН} = I_{1.СН} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.СН} \cdot e^{-j120^\circ}$$

8. Пример расчета (схема рис. 2а).

8.1. Основные положения.

1. Трансформаторы Т-1, Т-2 двухобмоточные.
2. Все параметры трансформаторов Т-1, Т-2 одинаковы.
3. Схема и группа соединения обмоток трансформаторов - Y/Δ-11.

4. С целью упрощения в данном примере расчеты токов КЗ выполнены только для одного крайнего положения РПН трансформаторов. В другом крайнем положении РПН трансформаторов все расчеты выполняются аналогично.

8.2. Параметры трансформаторов Т-1, Т-2.

Тип: ТДН-10000/110.

Номинальная мощность:

$$S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ МВА}$$

Номинальные напряжения:

$$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ} \pm 9 \times 1,78\%$$

$$U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ}$$

Номинальные токи:

$$I_{\text{ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 50,20 \text{ А}$$

$$I_{\text{НН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 549,9 \text{ А}$$

Схема и группа соединения обмоток: Y/Δ-11.

Напряжение короткого замыкания:

$$U_{\text{К}} = 10,5\%$$

Диапазон регулирования напряжения на стороне ВН:

$$\Delta U = 9 \cdot 1,78 / 100 = 0,1602$$

Напряжения стороны ВН трансформатора в 1 и в 19 положении РПН:

$$U_{\text{ВН}(1)} = U_{\text{ВН}} \cdot (1 + \Delta U) = 115 \cdot (1 + 0,1602) = 133,4 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ВН}(19)} = U_{\text{ВН}} \cdot (1 - \Delta U) = 115 \cdot (1 - 0,1609) = 96,58 \text{ кВ}$$

Принимается напряжение стороны ВН трансформатора в 1 положении РПН, равное максимально допустимому напряжению сети 110 кВ:

$$U_{\text{ВН}(1)} = 126 \text{ кВ}$$

Коэффициенты трансформации трансформатора в 1 и в 19 положении РПН:

$$K_{\text{T}(1)} = \frac{U_{\text{ВН}(1)}}{U_{\text{НН}}} = \frac{126}{10,5} = 12$$

$$K_{\text{T}(19)} = \frac{U_{\text{ВН}(19)}}{U_{\text{НН}}} = \frac{96,58}{10,5} = 9,198$$

8.3. Параметры схем замещения.

8.3.1. Энергосистема.

Параметры энергосистемы в минимальном режиме, приведенные к стороне 110 кВ, принимаются по данным РДУ или сетевой организации. Эквивалентная ЭДС энергосистемы:

$$E_{\text{С}} = 120 \text{ кВ}$$

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности энергосистемы:

$$X_{\text{С},1} = 20 \text{ Ом}$$

8.3.2. Трансформаторы Т-1, Т-2.

Сопротивления прямой последовательности трансформаторов в 1 и в 19 положении РПН, приведенные к стороне 110 кВ:

$$X_{\text{T},1(1)} = \frac{U_{\text{К}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}(1)}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{126^2}{10} = 166,7 \text{ Ом}$$

$$X_{T.1(19)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{ВН(19)}^2}{S_{НОМ}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{96,58^2}{10} = 97,94 \text{ Ом}$$

Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов в 1 и в 19 положении РПН, приведенные к стороне 110 кВ:

$$X_{T.0(1)} = 0,9 \cdot X_{T.1(1)} = 0,9 \cdot 166,7 = 150,0 \text{ Ом}$$

$$X_{T.0(19)} = 0,9 \cdot X_{T.1(19)} = 0,9 \cdot 97,94 = 88,15 \text{ Ом}$$

8.4. Эквивалентные сопротивления схем замещения.

8.4.1. РПН трансформаторов в 1 положении.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{1(1)} = X_{C.1} + X_{T.1(1)} + X_{T.1(1)} = 20 + 166,7 + 166,7 = 353,4 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$X_{2(1)} = X_{1(1)} = 353,4 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0(1)} = X_{T.0(1)} = 150,0 \text{ Ом}$$

8.4.2. РПН трансформаторов в 19 положении.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{1(19)} = X_{C.1} + X_{T.1(19)} + X_{T.1(19)} = 20 + 97,94 + 97,94 = 215,9 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$X_{2(19)} = X_{1(19)} = 215,9 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0(19)} = X_{T.0(19)} = 88,15 \text{ Ом}$$

8.5. Трехфазное КЗ. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН(1)} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot X_{1(1)}} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 353,4} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,1960 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.ВН(1)} = 0$$

$$I_{0.ВН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} = 0,1960 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 0,1960 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 0,1960 \cdot e^{j150^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 0,1960 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 0,1960 \cdot e^{j30^\circ} \text{ кА}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{T(1)} \cdot e^{j30^\circ} = 0,1960 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j30^\circ} = 2,352 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.НН(1)} = 0$$

$$I_{0.НН(1)} = 0$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{A.НН(1)} = I_{1.НН(1)} = 2,352 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{В.НН(1)} = I_{1.НН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 2,352 \cdot e^{-j60^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 2,352 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{С.НН(1)} = I_{1.НН(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 2,352 \cdot e^{-j60^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 2,352 \cdot e^{j60^\circ} \text{ кА}$$

8.6. Двухфазное КЗ фаз В и С. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН(1)} = \frac{E_C}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot X_{1(1)}} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 353,4} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot e^{j180^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j180^\circ} = 0,09802 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0.ВН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{А.ВН(1)} = 0$$

$$I_{В.ВН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН(1)} \cdot e^{-j90^\circ} = \sqrt{3} \cdot 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,1698 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{С.ВН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1.ВН(1)} \cdot e^{j90^\circ} = \sqrt{3} \cdot 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j90^\circ} = 0,1698 \text{ кА}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{j30^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j30^\circ} = 1,176 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{j150^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j150^\circ} = 1,176 \cdot e^{j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0.НН(1)} = 0$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{А.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{j90^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j90^\circ} = 1,176 \text{ кА}$$

$$I_{В.НН(1)} = 2 \cdot I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{-j90^\circ} = 2 \cdot 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{-j90^\circ} = 2,352 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{С.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{j90^\circ} = 0,09802 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j90^\circ} = 1,176 \text{ кА}$$

8.7. Однофазное КЗ фазы А. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН(1)} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot (X_{1(1)} + X_{2(1)} + X_{0(1)})} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot (353,4 + 353,4 + 150,0)} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} = 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} = 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{А.ВН(1)} = 3 \cdot I_{1.ВН(1)} = 3 \cdot 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} = 0,2426 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{В.ВН(1)} = 0$$

$$I_{С.ВН(1)} = 0$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{j30^\circ} = 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j30^\circ} = 0,9703 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.НН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т(1)} \cdot e^{-j30^\circ} = 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{-j30^\circ} = 0,9703 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0.НН(1)} = 0$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{A,НН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1,ВН(1)} \cdot K_{T(1)} = \sqrt{3} \cdot 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 = 1,681 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B,НН(1)} = 0$$

$$I_{C,НН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1,ВН(1)} \cdot K_{T(1)} \cdot e^{j180^\circ} = \sqrt{3} \cdot 0,08086 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j180^\circ} = 1,681 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

8.8. Двухфазное КЗ на землю фаз В и С. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1,ВН(1)} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot \left(X_{1(1)} + \frac{X_{2(1)} \cdot X_{0(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \right)} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot \left(353,4 + \frac{353,4 \cdot 150,0}{353,4 + 150,0} \right)} \cdot e^{-j90^\circ} =$$

$$= 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot \frac{X_{0(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \cdot e^{j180^\circ} = 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot \frac{150,0}{353,4 + 150,0} \cdot e^{j180^\circ} =$$

$$= 0,04499 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot \frac{X_{2(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \cdot e^{j180^\circ} = 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot \frac{353,4}{353,4 + 150,0} \cdot e^{j180^\circ} =$$

$$= 0,1060 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A,ВН(1)} = 0$$

$$I_{B,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2,ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{0,ВН(1)} =$$

$$= 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,04499 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,1060 \cdot e^{j90^\circ} =$$

$$= 0,1510 \cdot e^{j150^\circ} + 0,04499 \cdot e^{-j150^\circ} + 0,1060 \cdot e^{j90^\circ} = 0,2326 \cdot e^{j137^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2,ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{0,ВН(1)} =$$

$$= 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,04499 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,1060 \cdot e^{j90^\circ} =$$

$$= 0,1510 \cdot e^{j30^\circ} + 0,04499 \cdot e^{-j30^\circ} + 0,1060 \cdot e^{j90^\circ} = 0,2326 \cdot e^{j43^\circ} \text{ кА}$$

Симметричные составляющие токов КЗ в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{1,НН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot K_{T(1)} \cdot e^{j30^\circ} = 0,1510 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j30^\circ} = 1,812 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2,НН(1)} = I_{2,ВН(1)} \cdot K_{T(1)} \cdot e^{-j30^\circ} = 0,04499 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 12 \cdot e^{-j30^\circ} = 0,5399 \cdot e^{j60^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0,НН(1)} = 0$$

Фазные токи в линейных проводах на стороне НН:

$$I_{A,НН(1)} = I_{1,НН(1)} + I_{2,НН(1)} = 1,812 \cdot e^{-j60^\circ} + 0,5399 \cdot e^{j60^\circ} = 1,611 \cdot e^{-j43^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B,НН(1)} = I_{1,НН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2,НН(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 1,812 \cdot e^{-j60^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,5399 \cdot e^{j60^\circ} \cdot e^{j120^\circ} =$$

$$= 1,812 \cdot e^{j180^\circ} + 0,5399 \cdot e^{j180^\circ} = 2,352 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C,НН(1)} = I_{1,НН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2,НН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 1,812 \cdot e^{-j60^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,5399 \cdot e^{j60^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} =$$

$$= 1,812 \cdot e^{j60^\circ} + 0,5399 \cdot e^{-j60^\circ} = 1,611 \cdot e^{j43^\circ} \text{ кА}$$

8.9. Выводы.

1. Величины фазных токов в линейных проводах на стороне НН:

Вид КЗ	трехфазное	двухфазное ф. ВС	однофазное ф. А	двухфазное ф. ВС на землю
$I_{A, \text{ кА}}$	2,352	1,176	1,681	1,611
$I_{B, \text{ кА}}$	2,352	2,352	0	2,352
$I_{C, \text{ кА}}$	2,352	1,176	1,681	1,611

2. Если защита на стороне НН выполнена двухфазной (по схеме неполной звезды), она будет иметь минимальную чувствительность к двухфазным КЗ на стороне ВН ($I_{\text{к.мин}} = 1,176 \text{ кА}$).

3. Если защита на стороне НН выполнена трехфазной (по схеме полной звезды), она будет иметь минимальную чувствительность к однофазным КЗ на стороне ВН ($I_{\text{к.мин}} = 1,681 \text{ кА}$).

9. Пример расчета (схема рис. 3).

9.1. Основные положения.

1. Трансформаторы Т-1, Т-2 трехобмоточные.
2. Параллельная работа трансформаторов на стороне СН.
3. Все параметры трансформаторов Т-1, Т-2 одинаковы.
4. Схема и группа соединения обмоток трансформаторов - Y/Y/Δ-12-11.
5. С целью упрощения в данном примере расчеты токов КЗ выполнены только для одного крайнего положения РПН трансформаторов. В другом крайнем положении РПН трансформаторов все расчеты выполняются аналогично.

9.2. Параметры трансформаторов Т-1, Т-2.

Тип: ТДТН-40000/110.

Номинальная мощность:

$$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}$$

Номинальные напряжения:

$$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ} \pm 9 \times 1,78\%$$

$$U_{\text{СН}} = 38,5 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ}$$

Номинальные токи:

$$I_{\text{ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 200,8 \text{ А}$$

$$I_{\text{СН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 599,8 \text{ А}$$

$$I_{\text{НН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 2099 \text{ А}$$

Схема и группа соединения обмоток: Y/Y/Δ-12-11.

Напряжения короткого замыкания в 1, 10, 19 положениях РПН:

$$U_{\text{к.ВН-СН}(1)} = 11,5\%$$

$$U_{\text{к.ВН-СН}(10)} = 10,5\%$$

$$U_{\text{к.ВН-СН}(19)} = 9,5\%$$

$$\begin{aligned}
 U_{\text{К.ВН-НН}(1)} &= 19,0\% \\
 U_{\text{К.ВН-НН}(10)} &= 17,5\% \\
 U_{\text{К.ВН-НН}(19)} &= 17,0\% \\
 U_{\text{К.СН-НН}} &= 6,5\%
 \end{aligned}$$

Диапазон регулирования напряжения на стороне ВН:

$$\Delta U = 9 \cdot 1,78 / 100 = 0,1602$$

Напряжения стороны ВН трансформатора в 1 и в 19 положении РПН:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ВН}(1)} &= U_{\text{ВН}} \cdot (1 + \Delta U) = 115 \cdot (1 + 0,1602) = 133,4 \text{ кВ} \\
 U_{\text{ВН}(19)} &= U_{\text{ВН}} \cdot (1 - \Delta U) = 115 \cdot (1 - 0,1609) = 96,58 \text{ кВ}
 \end{aligned}$$

Принимается напряжение стороны ВН трансформатора в 1 положении РПН, равное максимально допустимому напряжению сети 110 кВ:

$$U_{\text{ВН}(1)} = 126 \text{ кВ}$$

Коэффициенты трансформации трансформатора в 1 и в 19 положении РПН:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{Т.ВН-СН}(1)} &= \frac{U_{\text{ВН}(1)}}{U_{\text{СН}}} = \frac{126}{38,5} = 3,273 \\
 K_{\text{Т.ВН-СН}(19)} &= \frac{U_{\text{ВН}(19)}}{U_{\text{СН}}} = \frac{96,58}{38,5} = 2,509 \\
 K_{\text{Т.ВН-НН}(1)} &= \frac{U_{\text{ВН}(1)}}{U_{\text{НН}}} = \frac{126}{11} = 11,45 \\
 K_{\text{Т.ВН-НН}(19)} &= \frac{U_{\text{ВН}(19)}}{U_{\text{НН}}} = \frac{96,58}{11} = 8,780 \\
 K_{\text{Т.СН-НН}} &= \frac{U_{\text{СН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{38,5}{11} = 3,500
 \end{aligned}$$

9.3. Параметры схем замещения.

9.3.1. Энергосистема.

Параметры энергосистемы в минимальном режиме, приведенные к стороне 110 кВ, принимаются по данным РДУ или сетевой организации. Эквивалентная ЭДС энергосистемы:

$$E_C = 120 \text{ кВ}$$

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности энергосистемы:

$$X_{\text{С.1}} = 10 \text{ Ом}$$

9.3.2. Трансформаторы Т-1, Т-2.

Сопротивления прямой последовательности трансформаторов в 1 и в 19 положении РПН, приведенные к стороне 110 кВ:

$$\begin{aligned}
 X_{\text{Т.ВН-СН.1}(1)} &= \frac{U_{\text{К.ВН-СН}(1)}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}(1)}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = 45,64 \text{ Ом} \\
 X_{\text{Т.ВН-СН.1}(19)} &= \frac{U_{\text{К.ВН-СН}(19)}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}(19)}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{96,58^2}{40} = 22,15 \text{ Ом} \\
 X_{\text{Т.ВН-НН.1}(1)} &= \frac{U_{\text{К.ВН-НН}(1)}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}(1)}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{19,0}{100} \cdot \frac{126^2}{40} = 75,41 \text{ Ом} \\
 X_{\text{Т.ВН-НН.1}(19)} &= \frac{U_{\text{К.ВН-НН}(19)}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}(19)}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{17,0}{100} \cdot \frac{96,58^2}{40} = 39,64 \text{ Ом}
 \end{aligned}$$

Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов в 1 и в 19 положении РПН, приведенные к стороне 110 кВ:

$$X_{T.ВН-НН.0(1)} = 0,9 \cdot X_{T.ВН-НН.1(1)} = 0,9 \cdot 75,41 = 67,87 \text{ Ом}$$

$$X_{T.ВН-НН.0(19)} = 0,9 \cdot X_{T.ВН-НН.1(19)} = 0,9 \cdot 39,64 = 35,68 \text{ Ом}$$

9.4. Эквивалентные сопротивления схем замещения.

9.4.1. РПН трансформаторов в 1 положении.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{1(1)} = X_{C.1} + X_{T.ВН-СН.1(1)} + X_{T.ВН-СН.1(1)} = 10 + 45,64 + 45,64 = 101,3 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$X_{2(1)} = X_{1(1)} = 101,3 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0(1)} = X_{T.ВН-НН.0(1)} = 67,87 \text{ Ом}$$

9.4.2. РПН трансформаторов в 19 положении.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{1(19)} = X_{C.1} + X_{T.ВН-СН.1(19)} + X_{T.ВН-СН.1(19)} = 10 + 22,15 + 22,15 = 54,30 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$X_{2(19)} = X_{1(19)} = 54,30 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0(19)} = X_{T.ВН-НН.0(19)} = 35,68 \text{ Ом}$$

9.5. Трехфазное КЗ. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1.ВН(1)} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot X_{1(1)}} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 101,3} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,6839 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.ВН(1)} = 0$$

$$I_{0.ВН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} = 0,6839 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 0,6839 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 0,6839 \cdot e^{j150^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C.ВН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 0,6839 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 0,6839 \cdot e^{j30^\circ} \text{ кА}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1.СН(1)} = I_{1.ВН(1)} \cdot K_{T.ВН-СН(1)} = 0,6839 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 3,273 = 2,238 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2.СН(1)} = 0$$

$$I_{0.СН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A,CH(1)} = I_{1,CH(1)} = 2,238 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B,CH(1)} = I_{1,CH(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 2,238 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 2,238 \cdot e^{j150^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C,CH(1)} = I_{1,CH(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 2,238 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 2,238 \cdot e^{j30^\circ} \text{ кА}$$

9.6. Двухфазное КЗ фаз В и С. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1,ВН(1)} = \frac{E_C}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot X_{1(1)}} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 101,3} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,3420 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot e^{j180^\circ} = 0,3420 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j180^\circ} = 0,3420 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0,ВН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A,ВН(1)} = 0$$

$$I_{B,ВН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1,ВН(1)} \cdot e^{-j90^\circ} = \sqrt{3} \cdot 0,3420 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j90^\circ} = 0,5924 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C,ВН(1)} = \sqrt{3} \cdot I_{1,ВН(1)} \cdot e^{j90^\circ} = \sqrt{3} \cdot 0,3420 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j90^\circ} = 0,5924 \text{ кА}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$I_{1,СН(1)} = I_{1,ВН(1)} \cdot K_{Т,ВН-СН(1)} = 0,3420 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 3,273 = 1,119 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2,СН(1)} = I_{2,ВН(1)} \cdot K_{Т,ВН-СН(1)} = 0,3420 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 3,273 = 1,119 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0,СН(1)} = 0$$

Фазные токи на стороне СН:

$$I_{A,СН(1)} = 0$$

$$I_{B,СН(1)} = I_{B,ВН(1)} \cdot K_{Т,ВН-СН(1)} = 0,5924 \cdot e^{j180^\circ} \cdot 3,273 = 1,939 \cdot e^{j180^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{C,СН(1)} = I_{C,ВН(1)} \cdot K_{Т,ВН-СН(1)} = 0,5924 \cdot 3,273 = 1,939 \text{ кА}$$

9.7. Однофазное КЗ фазы А. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$I_{1,ВН(1)} = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot (X_{1(1)} + X_{2(1)} + X_{0(1)})} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot (101,3 + 101,3 + 67,87)} \cdot e^{-j90^\circ} =$$

$$= 0,2562 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{2,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} = 0,2562 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{0,ВН(1)} = I_{1,ВН(1)} = 0,2562 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$I_{A,ВН(1)} = 3 \cdot I_{1,ВН(1)} = 3 \cdot 0,2562 \cdot e^{-j90^\circ} = 0,7686 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА}$$

$$I_{B,ВН(1)} = 0$$

$$I_{C,ВН(1)} = 0$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$\begin{aligned} I_{1.СН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т.ВН-СН(1)} = 0,2562 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 3,273 = 0,8385 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{2.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} = 0,8385 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{0.СН(1)} &= 0 \end{aligned}$$

Фазные токи на стороне СН:

$$\begin{aligned} I_{А.СН(1)} &= 2 \cdot I_{1.СН(1)} = 2 \cdot 0,8385 \cdot e^{-j90^\circ} = 1,677 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{В.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} \cdot e^{j180^\circ} = 0,8385 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j180^\circ} = 0,8385 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{С.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} \cdot e^{j180^\circ} = 0,8385 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j180^\circ} = 0,8385 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА} \end{aligned}$$

9.8. Двухфазное КЗ на землю фаз В и С. РПН трансформаторов в 1 положении.

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне ВН трансформатора Т-2:

$$\begin{aligned} I_{1.ВН(1)} &= \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot \left(X_{1(1)} + \frac{X_{2(1)} \cdot X_{0(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \right)} \cdot e^{-j90^\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot \left(101,3 + \frac{101,3 \cdot 67,87}{101,3 + 67,87} \right)} \cdot e^{-j90^\circ} = \\ &= 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{2.ВН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot \frac{X_{0(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \cdot e^{j180^\circ} = 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot \frac{67,87}{101,3 + 67,87} \cdot e^{j180^\circ} = \\ &= 0,1958 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{0.ВН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot \frac{X_{2(1)}}{X_{2(1)} + X_{0(1)}} \cdot e^{j180^\circ} = 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot \frac{101,3}{101,3 + 67,87} \cdot e^{j180^\circ} = \\ &= 0,2923 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА} \end{aligned}$$

Фазные токи на стороне ВН:

$$\begin{aligned} I_{А.ВН(1)} &= 0 \\ I_{В.ВН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{0.ВН(1)} = \\ &= 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,1958 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,2923 \cdot e^{j90^\circ} = \\ &= 0,4881 \cdot e^{j150^\circ} + 0,1958 \cdot e^{-j150^\circ} + 0,2923 \cdot e^{j90^\circ} = 0,7369 \cdot e^{j143^\circ} \text{ кА} \\ I_{С.ВН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.ВН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{0.ВН(1)} = \\ &= 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,1958 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,2923 \cdot e^{j90^\circ} = \\ &= 0,4881 \cdot e^{j30^\circ} + 0,1958 \cdot e^{-j30^\circ} + 0,2923 \cdot e^{j90^\circ} = 0,7369 \cdot e^{j37^\circ} \text{ кА} \end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов КЗ на стороне СН:

$$\begin{aligned} I_{1.СН(1)} &= I_{1.ВН(1)} \cdot K_{Т.ВН-СН(1)} = 0,4881 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 3,273 = 1,598 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{2.СН(1)} &= I_{2.ВН(1)} \cdot K_{Т.ВН-СН(1)} = 0,1958 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 3,273 = 0,6409 \cdot e^{j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{0.СН(1)} &= 0 \end{aligned}$$

Фазные токи на стороне СН:

$$\begin{aligned} I_{А.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} + I_{2.СН(1)} = 1,598 \cdot e^{-j90^\circ} + 0,6409 \cdot e^{j90^\circ} = 0,9571 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ кА} \\ I_{В.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} + I_{2.СН(1)} \cdot e^{j120^\circ} = 1,598 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,6409 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = \\ &= 1,598 \cdot e^{j150^\circ} + 0,6409 \cdot e^{-j150^\circ} = 1,997 \cdot e^{j166^\circ} \text{ кА} \\ I_{С.СН(1)} &= I_{1.СН(1)} \cdot e^{j120^\circ} + I_{2.СН(1)} \cdot e^{-j120^\circ} = 1,598 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 0,6409 \cdot e^{j90^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = \\ &= 1,598 \cdot e^{j30^\circ} + 0,6409 \cdot e^{-j30^\circ} = 1,997 \cdot e^{j14^\circ} \text{ кА} \end{aligned}$$

9.9. Выводы.

1. Величины фазных токов на стороне СН:

Вид КЗ	трехфазное	двухфазное ф. BC	однофазное ф. А	двухфазное ф. BC на землю
I_A , кА	2,238	0	1,677	0,9571
I_B , кА	2,238	1,939	0,8385	1,997
I_C , кА	2,238	1,939	0,8385	1,997

2. Если защита на стороне СН выполнена двухфазной (по схеме неполной звезды), она будет иметь минимальную чувствительность к однофазным КЗ на стороне ВН ($I_{K.мин} = 0,8385$ кА).

3. Если защита на стороне СН выполнена трехфазной (по схеме полной звезды), чувствительность защиты будет минимальной также при однофазных КЗ на стороне ВН ($I_{K.мин} = 1,677$ кА), но она будет в два раза больше, чем чувствительность двухфазной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. Москва, Энергия, 1979.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. Москва, Энергия, 1970.
3. Небрат И.Л., Полесицкая Т.П. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты. Учебное пособие. Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов. Санкт-Петербург, 2009.
4. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ. Второе издание, перераб. и доп. Москва, Энергия, 1980. Библиотека электромонтера, выпуск 505.
5. Беляева Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. Второе издание, перераб. и доп. Москва, Энергоатомиздат, 1983. Библиотека электромонтера, выпуск 544.

ТВМ

BrightGreenToad@mail.ru

Версия 1

09.10.18.