

УДК 621.311, 621.314.2

А. С. Серебряков, В. Л. Осокин

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Теоретическое обоснование основных соотношений для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями

Дано теоретическое обоснование выбора уставок релейной защиты на первичной и вторичной обмотках трансформаторов с их соединением по схеме Y/D-11. Дано обоснование правомочности преобразования схем соединения обмоток и неизменности потерь в линии электропередачи и трансформаторе при таком преобразовании и несимметричной нагрузке или коротком замыкании. Дано теоретическое обоснование основных соотношений, необходимых для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями и систем распознавания режима электрической сети, обнаружения предаварийного режима и принятия оптимального решения для управления технологическими процессами в системе электроснабжения.

Схема соединения обмоток трансформатора, несимметричная нагрузка трансформатора, сопротивление короткого замыкания трансформатора, потери мощности в линии электропередачи, потери мощности в трансформаторе, информационное обеспечение интеллектуальных систем управления и защиты в электроэнергетике

Повысить эффективность систем электроснабжения потребителей электроэнергии в современных условиях можно за счет широкого внедрения автоматизированных систем управления, основанных на цифровых информационных технологиях. Проблема интеллектуализации и внедрения оптимального управления технологическими процессами в системе электроснабжения, включая цифровую защиту и автоматику, требует надежного теоретического обоснования основных положений, на которых строятся управляющие системы. В настоящее время разработано достаточно методов повышения эффективности систем электроснабжения за счет внедрения информационных технологий. Однако не все вопросы теоретического обеспечения и обоснования положений, на которых строятся эти системы, решены до конца. В частности, среди специалистов до сих пор нет однозначного решения и теоретического обоснования выбора уставок релейной защиты на первичной и вторичной сторонах трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/D-11. Нет обоснования правомочности преобразования схем соединения обмоток трансформатора из треугольника в звезду и обоснования неизменности потерь в линии электропередачи при таком преобразовании и несимметричной нагрузке или коротком замыкании.

Цель настоящей статьи – дать теоретическое обоснование основных соотношений, необходимых для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями. Эти же теоретические обоснования могут лечь в основу информационных систем распознавания режима электрической сети, обнаружения предаварийного режима и принятия оптимального решения для управления технологическими процессами в системе электроснабжения.

Схема соединений обмоток трансформаторов Y/D-11 применяется для питания участков железной дороги, электрифицированной на переменном токе с напряжением 25 кВ [1]. От этих же трансформаторов может получать электрическую энергию и нетяговая нагрузка, в том числе расположенные рядом с железной дорогой ремонтные заводы, а также сельскохозяйственные потребители электроэнергии. Наиболее опасны для тяговых трансформаторов в эксплуатации аварийные режимы, вызванные короткими замыканиями (КЗ) [1]–[7]. Чаще всего они происходят при замыкании контактного провода на рельс. Для разработки систем быстрого обнаружения и ликвидации КЗ необходимо исследовать количественные соотношения при возникающих аварийных режимах. В начале исследования обратимся к нормативным документам на силовые трансформаторы.

В национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 52719–2007 «Трансформаторы силовые» [8] приведена формула для расчета максимально возможного установившегося значения линейного тока трансформатора при внешнем коротком замыкании:

$$I_K = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}(Z_T + Z_C)}, \quad (1)$$

где I_K – линейный ток короткого замыкания, кА;
 $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное линейное напряжение, кВ;

$$Z_T = \frac{U_K U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} \quad (2)$$

– фазное сопротивление КЗ трансформатора, отнесенное к рассматриваемой обмотке с напряжением $U_{\text{НОМ}}$, Ом (U_K – напряжение КЗ трансформатора, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ · А);

$$Z_C = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_C} \quad (3)$$

– фазное сопротивление КЗ питающей сети, отнесенное к рассматриваемой обмотке для случая, когда параметры энергосистемы заданы мощностью КЗ, Ом (S_C – мощность трехфазного КЗ питающей сети на вводе трансформатора, МВ · А). Если параметры энергосистемы заданы сопротивлением, то его предварительно приводят к рассматриваемой обмотке.

Для определения максимально возможного установившегося значения линейного тока при симметричном трехфазном внешнем КЗ в соответствии со стандартом, как показывают (1) и (2), не нужно знать схему соединения обмоток трансформатора. Линейные токи на стороне выбранного напряжения в этом случае будут одинаковы при любых схемах соединения вторичной обмотки – звездой или треугольником. Фазные токи в обмотке будут равны линейным токам при соединении обмотки звездой или будут меньше линейных токов в $\sqrt{3}$ раз при соединении обмотки в треугольник. В этом случае такой подход оправдан тем, что максимальный ток КЗ определяется для симметричного режима трехфазного короткого замыкания в соответствии с требованиями ГОСТ к стойкости трансформатора при коротких замыканиях.

Однако при несимметричных КЗ картина получается несколько иная и приведенная формула (2) для определения сопротивления КЗ трансформатора относится только к случаю соединения вторичной обмотки трансформатора по схеме Y. Таким образом, (1) также автоматически по умолчанию становится формулой для расчета тока короткого замыкания при соединении первичной и вторичной обмоток трансформатора по схеме «звезда». В скобках формулы (1) в знаменателе дроби получается сопротивление одной фазы эквивалентной звезды, отнесенное к выбранному напряжению.

Рассмотрим подробнее режим несимметричного короткого замыкания. Рассчитаем ток двухфазного КЗ на примере тяговой подстанции электрифицированного участка железной дороги с напряжением 25 кВ. Обмотки тягового трансформатора соединены по схеме Y/D-11. Номинальная мощность трансформатора 40 МВ · А; напряжение КЗ $U_K = 10\%$; номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}} = 27.5$ кВ; $S_C = 750$ МВ · А – мощность трехфазного КЗ питающей сети на вводе трансформатора.

Будем считать, как это делается в ряде случаев, что схема соединений обмоток трансформатора предварительно преобразована в схему Y/Y-12 (рис. 1). Коэффициент трансформации фазных напряжений для схемы Y/Y-12 будет равен $n_Y = w_1/w_2 = 110/27.5 = 4$. При соединении обмоток трансформатора по схеме «звезда–звезда» ток короткого замыкания I_K , равный току в каждой из двух фаз трансформатора и линии электропередачи (рис. 1), составит

$$I_K = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{пY}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2(Z_{TY} + Z_{CY})}. \quad (4)$$

Здесь индексы пY, тY и сY – относятся к сопротивлениям подстанции, трансформатора и питающей сети при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y-12.

В руководящих указаниях по релейной защите систем тягового электроснабжения [4] дана формула для определения сопротивления $Z_{пY}$ тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании (рис. 1) без указания на схему соединения вторичной обмотки. Сопротивление подстанции $Z_{пY}$ равно удвоенному значению сумм сопротивлений фазы трансформатора Z_T и системы внешнего электроснабжения Z_C :

$$Z_{\Pi} \approx X_{\Pi} = 2 \left[\frac{U_{\text{к}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{Н}}} + \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{С}}} \right] = 2(Z_{\text{Т}} + Z_{\text{С}}), \quad (5)$$

где Z_{Π} – полное сопротивление подстанции; X_{Π} – индуктивное сопротивление подстанции; $U_{\text{к}}$ – паспортное значение сопротивления КЗ трансформатора, %; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора, т. е. напряжение в режиме холостого хода, кВ; $S_{\text{Н}}$ – номинальная мощность трансформатора; $S_{\text{С}}$ – мощность КЗ на вводе в подстанцию.

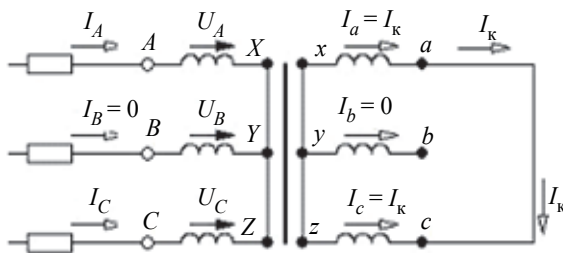


Рис. 1

Ток двухфазного короткого замыкания согласно [4] определяют по формуле

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2(Z_{\text{Т}} + Z_{\text{С}})}. \quad (6)$$

Здесь Z_{Π} – полное сопротивление подстанции.

Следовательно, сопротивление Z_{Π} тяговой подстанции, как следует из [4], равно удвоенному сопротивлению $Z_{\text{Т}}$ одной фазы трансформатора и сопротивлению $Z_{\text{С}}$ линии электропередачи.

Удвоение сопротивления фазы в формулах (4)–(6) по сравнению с (1) для схемы соединения «звезда–треугольник» не очевидно и в некоторых случаях вызывает сомнения. До сих пор многим специалистам по электроснабжению непонятно, откуда в формуле получается эта двойка и каким следует считать напряжение 27.5 кВ на выводах тягового трансформатора – фазным или линейным. Однако справедливость (4)–(6) становится очевидной, если предположить, что вторичная обмотка трансформатора «треугольник» предварительно преобразована в «звезду» (рис. 1), как это делается для расчетов некоторых режимов тяговой сети. Для схемы соединения «звезда» видно, что при двухфазном КЗ одинаковый ток, равный току КЗ, протекает по обеим фазам трансформатора и питающей его линии. Следовательно, удвоение сопротивления обоснованно и о таком преобразовании схемы следовало бы сказать в руководящих документах. Следовало бы

также сказать, что сопротивления $Z_{\text{Т}}$ и $Z_{\text{С}}$ – это фазные сопротивления КЗ трансформатора и питающей линии в предположении, что вторичная обмотка трансформатора соединена по схеме «звезда», т. е. $Z_{\text{Т}} = Z_{\text{ТY}}$, $Z_{\text{С}} = Z_{\text{СY}}$ и $Z_{\Pi} = Z_{\Pi Y}$.

Рассмотрим реальный пример расчета тока короткого замыкания для тягового трансформатора с параметрами: $U_1 = U_2 = 110/27.5$ кВ; $U_{\text{к}} = 10.5$ %; $S_{\text{НОМ}} = 40$ МВ · А. Мощность трехфазного КЗ питающей энергосистемы на вводе трансформатора $S_{\text{С}} = 750$ МВ · А. Коэффициент трансформации фазных напряжений при соединении вторичной обмотки звездой $n_{\text{Y}} = \frac{110}{27.5} = 4$.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора при соединении вторичной обмотки звездой будет в соответствии с (2) и (5) равно

$$Z_{\text{Т}} = Z_{\text{ТY}} = \frac{U_{\text{к}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} = \frac{10.5 \cdot 27.5^2}{100 \cdot 40} = 2 \text{ Ом}.$$

Сопротивление КЗ одной фазы системы внешнего электроснабжения

$$Z_{\text{С}} = Z_{\text{СY}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{С}}} = \frac{27.5^2}{750} = 1 \text{ Ом}.$$

Реальное сопротивление одного провода (или одной фазы) линии электропередачи составляет

$$Z_{\text{С}} n_{\text{Y}}^2 = 1 \cdot 4^2 = 16 \text{ Ом}.$$

Сопротивление подстанции $Z_{\Pi Y} = Z_{\Pi} = 2(Z_{\text{Т}} + Z_{\text{С}}) = 2(2 + 1) = 6 \text{ Ом}$.

Ток короткого замыкания по (4) будет равен

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi Y}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2(Z_{\text{Т}} + Z_{\text{С}})} = \frac{27.5}{2(1+2)} = \frac{27.5}{6} = 4.58 \text{ кА}.$$

Такой же ток будет протекать в двух фазах ax и cz вторичной обмотки трансформатора

$$I_a = I_c = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2(Z_{\text{ТY}} + Z_{\text{СY}})} = \frac{27.5}{2(1+2)} = 4.58 \text{ кА}.$$

Токи в двух фазах A и C первичной обмотки будут равны:

$$I_{1\text{к}} = I_A = I_C = \frac{I_{\text{к}}}{n_{\text{Y}}} = \frac{4.58}{4} = 1.15 \text{ кА}.$$

Ток в фазе *B* будет равен нулю. Если принять активное сопротивление одной фазы питающей линии $R_c = 4$ Ом, то потери мощности в линии электропередачи согласно закону Джоуля–Ленца составят

$$\Delta P_{cY} = R_c (I_A^2 + I_C^2) = 4(1.15^2 + 1.15^2) = 10.5 \text{ МВт.}$$

В [7] было показано, что ток двухфазного короткого замыкания, рассчитанный по (4), совпадает по значению с током, рассчитанным для схемы «звезда–треугольник» без преобразования схемы соединения вторичной обмотки в звезду. В [7] при рассмотрении короткого замыкания в одном плече тяговой подстанции предполагалось, что нагрузка в другом плече трансформатора отсутствует.

При условии, что фазные токи намагничивания трансформатора равны нулю и в первичной и вторичной обмотках отсутствуют токи нулевой последовательности, в каждой фазе должно существовать равенство первичной и вторичной МДС. Это значит, что для приведенного трансформатора должно существовать равенство первичных и вторичных токов в каждой фазе [9], [10]. В этом случае каждая фаза работает независимо. Токи нулевой последовательности в обмотку, соединенную треугольником, из других обмоток не трансформируются. Следовательно, сумма мгновенных токов в ней равна нулю и каждая фаза трансформатора работает независимо.

Расчетная схема тягового трансформатора при соединении вторичной обмотки треугольником и двухфазном коротком замыкании приведена на рис. 2, где I_k – ток одного плеча при коротком замыкании. Коэффициент трансформации фазных напряжений при соединении обмоток по схеме Y/D-11 составляет

$$n_{\Delta} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 27.5} = 2.309.$$

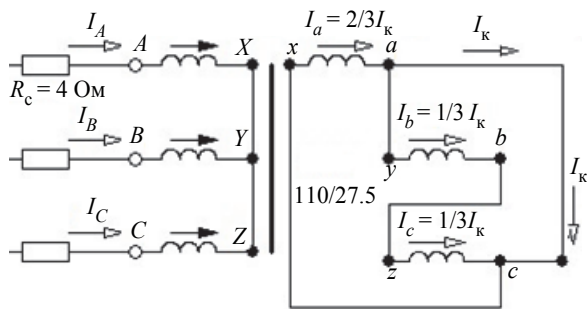


Рис. 2

Известно [10], что при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником и двухфазном коротком замыкании ток в обмотке трансформатора протекает по двум параллельным ветвям: в «своей фазе» *ax* протекает фазный ток, равный $\frac{2}{3} I_k$, а в двух других последовательно соединенных фазах *by* и *cz* – одинаковый ток $\frac{1}{3} I_k$.

Это объясняется тем, что сопротивление двух последовательно включенных фаз *by* и *cz* в два раза больше, чем сопротивление одной фазы *ax*. Обозначим сопротивление одной фазы трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда–треугольник» как $Z_{\phi \Delta}$. Учитывая, что ток короткого замыкания в соответствии с (6) равен

$$I_k = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi \Delta}},$$

а ток в «своей» фазе обмотки трансформатора, соединенной треугольником, $I_a = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\phi \Delta}} = \frac{2}{3} I_k =$

$= \frac{2}{3} \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\Pi \Delta}}$, получим выражение для сопротивле-

ния подстанции:

$$Z_{\Pi \Delta} = \frac{2}{3} Z_{\phi \Delta} = \frac{2}{3} (Z_{T \Delta} + Z_{c \Delta}) = \frac{2}{3} \left[\frac{3U_k U_{\text{НОМ}}^2}{100S_H n} + \frac{3U_{\text{НОМ}}^2}{S_c} \right] = 2(Z_T + Z_c). \quad (7)$$

Здесь $Z_{\phi \Delta} = 3(Z_T + Z_c) = 3(2 + 1) = 9$ Ом – суммарное сопротивление фазы при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником, приведенное к напряжению $U_{\text{НОМ}}$; $Z_{T \Delta} =$

$= \frac{3U_k U_{\text{НОМ}}^2}{100S_H} = 3Z_{TY} = 6$ Ом – сопротивление фазы трансформатора при соединении его вторич-

ной обмотки треугольником; $Z_{c \Delta} = \frac{3U_{\text{НОМ}}^2}{S_c} =$

$= 3Z_c = 3$ Ом – сопротивление фазы питающей сети при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником.

Из (7) видно, что фазное сопротивление преобразованной звезды будет в три раза меньше фазного сопротивления обмотки, соединенной в треугольник, так как при соединении звездой в $\sqrt{3}$ раз уменьшается фазное напряжение и, соот-

ветственно, число витков в фазе, а также в $\sqrt{3}$ раз увеличивается сечение провода обмотки для прохождения увеличившегося $\sqrt{3}$ раз фазного тока, который стал равен линейному току. Коэффициент трансформации n также увеличивается в $\sqrt{3}$ раз. Соответственно, сопротивление приведенной обмотки уменьшается в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза.

Итак, сопротивление подстанции при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником будет равно $Z_{\Pi \Delta} = \frac{2}{3} Z_{\Phi \Delta} = \frac{2}{3} 9 = 6$ Ом. Ток КЗ будет равен $I_K = \frac{U_{НОМ}}{Z_{\Pi \Delta}} = \frac{27.5}{6} = 4.58$ кА.

Таким образом, сопротивление подстанции Z_{Π} и ток короткого замыкания I_K будут одинаковыми при соединении вторичной обмотки треугольником или с преобразованием ее в звезду. Следовательно, тяговый трансформатор с трехфазным питанием независимо от схемы соединения вторичной обмотки можно представить эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода $U_{НОМ} = 27.5$ кВ, а внутреннее сопротивление определяется по (5).

Однако, несмотря на одинаковый ток КЗ, токи во вторичной и первичной обмотках трансформатора будут разными, что необходимо учитывать при создании схем релейной защиты и выборе уставок ее срабатывания. Для схемы Y/Y токи в обмотках трансформатора были определены ранее. Для схемы Y/D токи в фазах вторичной обмотки будут равны

$$I_a = \frac{2}{3} I_K = \frac{2}{3} \cdot 4.58 = 3.06 \text{ кА};$$

$$I_b = I_c = \frac{1}{3} I_K = \frac{4.58}{3} = 1.53 \text{ кА}.$$

Токи в фазах первичной обмотки будут равны

$$I_A = \frac{I_a}{n_{\Delta}} = \frac{3.06}{2.309} = 1.32 \text{ кА};$$

$$I_B = \frac{I_b}{n_{\Delta}} = \frac{1.53}{2.309} = 0.66 \text{ кА};$$

$$I_C = \frac{I_c}{n_{\Delta}} = \frac{1.53}{2.309} = 0.66 \text{ кА}.$$

Потери мощности в линии электропередачи при соединении вторичной обмотки тягового трансформатора треугольником согласно закону Джоуля–Ленца составят

$$\Delta P_{C \Delta} = 4(1.32^2 + 0.66^2 + 0.66^2) = 10.5 \text{ МВт}.$$

В обоих случаях соединения – звездой и треугольником, потери мощности получаются одинаковыми. Видно, что в преобразованной схеме (см. рис. 1) при коротком замыкании ток в первичной и во вторичной обмотках протекает только по двум фазам, хотя в действительности при соединении тяговой обмотки треугольником ток реально протекает во всех трех фазах (рис. 2). У ряда специалистов появились сомнения, могут ли быть одинаковыми потери мощности в линии электропередачи в трансформаторе при передаче энергии по двум и по трем фазам [11].

Высказываются сомнения, что мощности потерь должны быть разными, поскольку мощность короткого замыкания одна и та же, но передается в одном случае по трем проводам ЛЭП, а в другом – по двум проводам. Одинаковыми они быть не могут [11].

Поэтому задача данной статьи состоит в доказательстве правильности определения потерь в исходной и преобразованной схемах и доказательстве их равенства. Проанализируем сначала потери в линии электропередачи.

При соединении вторичной обмотки трансформатора в звезду потери в двух проводах линии электропередачи по закону Джоуля–Ленца будут равны

$$\Delta P_{C Y} = 2R_c \frac{I_K^2}{n_Y^2}, \quad (8)$$

где R_c – активное сопротивление одного провода линии электропередачи, которое ранее не учитывалось ввиду того, что оно составляет менее одной трети полного сопротивления линии; $n_Y = \frac{110}{27.5} = 4$ – коэффициент трансформации фазных напряжений при соединении вторичной обмотки трансформатора в звезду.

При соединении вторичной обмотки трансформатора в треугольник потери в трех проводах линии электропередачи будут равны

$$\Delta P_{c\Delta} = R_c \frac{I_K^2}{n_\Delta^2} \left[\left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right] = 2R_c \frac{I_K^2}{n_Y^2}, \quad (9)$$

где $n_\Delta = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 27.5} = \frac{n_Y}{\sqrt{3}} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot 2.309$ – коэффициент трансформации фазных напряжений при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником.

Активное сопротивление проводов R_c , которое в приведенных ранее расчетах не учитывалось, независимо от схемы соединения обмоток трансформатора в обоих случаях остается постоянным. Таким образом, как показывают (8) и (9), потери мощности в системе внешнего электроснабжения в обоих случаях будут одинаковы независимо от того, передается ли одна и та же мощность короткого замыкания по двум или по трем проводам.

Это можно доказать также следующим образом. Поставим задачу найти два одинаковых по значению тока, протекающих по двум проводам линии электропередачи, которые вызывают в этих двух проводах такую же потерю мощности, как и при протекании трех токов по трем проводам с одним и тем же сопротивлением. Обозначим искомый ток как неизвестную величину y . Тогда значение y найдется из уравнения

$$R_c \frac{I_K^2}{n_\Delta^2} \left[\left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right] = 2R_c y^2. \quad (10)$$

Отсюда

$$y = \frac{I_K}{\sqrt{3} \cdot n_\Delta} = \frac{I_K}{n_Y}. \quad (11)$$

Следовательно, ток в двух проводах должен быть равен току КЗ, разделенному на коэффициент трансформации фазных напряжений для соединения вторичной обмотки звездой. Аналогично доказывается равенство потерь в первичной и вторичной обмотках трансформатора при соединении его вторичной обмотки звездой или треугольником.

Итак, не вызывает сомнения, что при соединении обмоток треугольником фазное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора, равное линейному напряжению, в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения при соединении звездой. Соответственно, фазное сопротивление $Z_{T\Delta}$ обмотки, соединенной треугольником, в 3 раза, как было показано ранее, больше фазного сопротив-

ления Z_{TY} обмотки, соединенной звездой, т. е. $Z_{T\Delta} = 3Z_{TY}$. Это соотношение справедливо и для активных составляющих обмоток, т. е. для каждой из трех фаз $R_{T\Delta} = 3R_{TY}$. Активное сопротивление одного провода линии электропередачи обозначим $R_c = 4$ Ом. Ток короткого замыкания обозначим I_K . Рассмотрим два случая соединения обмоток трансформатора: Y/Y и Y/D.

Потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора

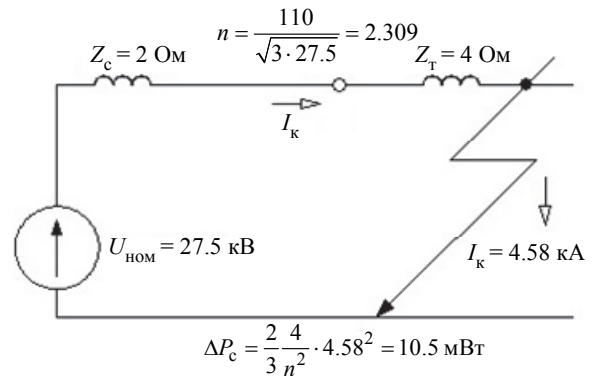
$$\Delta P_{TD} = R_D \left(\frac{2}{3} I_K \right)^2 + R_D \left(\frac{1}{3} I_K \right)^2 + R_D \left(\frac{1}{3} I_K \right)^2 = \frac{2}{3} R_D I_K^2.$$

Или с учетом того, что $R_D = 3R_Y$, получим:

$$\Delta P_{TD} = \frac{2}{3} \cdot 3R_Y I_K^2 = 2R_Y I_K^2 = \Delta P_{TY}.$$

Из приведенных соотношений видно, что потери в проводах линии электропередачи и в обмотках трансформатора одинаковы в обоих случаях.

Отметим, что и трехфазная схема при соединении вторичной обмотки треугольником и двухфазная схема при соединении вторичной обмотки звездой при расчете тока двухфазного короткого замыкания одинаково легко преобразуются в однофазную схему замещения с теми же потерями мощности (рис. 3). Сопротивление подстанции $Z_{II} = Z_T + Z_C = 4 + 2 = 6$ Ом.



$$\Delta P_c = \frac{2}{3} \frac{4}{n^2} \cdot 4.58^2 = 10.5 \text{ мВт}$$

Рис. 3

Здесь $n_\Delta = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 27.5} = 2.309$.

Потери в линии электропередачи составят

$$\Delta P_c = \frac{2}{3} \frac{R_c}{n_\Delta^2} I_K^2 = \frac{2}{3} \frac{4}{2.309^2} \cdot 4.58^2 = 10.5 \text{ мВт}.$$

Подводя итоги проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. При расчете тока двухфазного короткого замыкания значения тока получаются одинаковыми независимо от принятой схемы соединения вторичной обмотки трансформатора – звездой или треугольником. Обе схемы могут быть преобразованы в однофазную схему замещения.

2. Потери мощности в проводах линий электропередачи системы внешнего электроснабжения при двухфазном коротком замыкании одинаковы для соединения вторичной обмотки звездой или треугольником, т. е. потери при двухфазном коротком замыкании одинаковы при передаче мощности КЗ по двум и по трем проводам.

3. Падения напряжений в проводах при несимметричной нагрузке и двухфазном коротком замыкании будут различными, как и токи в обмотках трансформатора и в проводах линий электропередачи. Поэтому при подготовке математического обеспечения для систем интеллектуальной защиты, расчете уставок и распознавания предаварийных и аварийных режимов следует пользоваться схемой замещения со вторичной обмоткой трансформатора, соединенной треугольником, так как именно она дает верное токораспределение в рассматриваемой системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

2. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / Иркут. ун-т. Иркутск, 2005. 273 с.

3. Герман Л. А., Морозов Д. А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: РОАТ-МИИТ, 2010. 60 с.

4. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: Трансиздат, 2005. 216 с.

5. СТО РЖД 07.021.1–2015. Защита систем электроснабжения железных дорог от коротких замыканий и перегрузок. Ч. 1: Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения.

6. СТО РЖД 07.021.4–2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыка-

ний и перегрузки. Ч. 4: Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока.

7. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/D-11 / А. С. Серебряков, Л. А. Герман, В. Л. Осокин, К. С. Субханвердиев // ЭЭТ. 2017. № 5. С. 19–25.

8. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. URL: <http://megainform.ru/Data2/1/4293841/4293841665.pdf>.

9. Петров Г. Н. Электрические машины. В 3 ч. Ч. 1: Введение. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974. 240 с.

10. Серебряков А. С. Трансформаторы: учеб. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 360 с.

11. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Методика расчета токораспределения в тяговой сети переменного тока // Вестн. ВНИИЖТ. 2017. № 6. С. 329–335.

A. S. Serebryakov, V. L. Osokin

Nizhniy Novgorod State Engineering-Economic University

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE BASIC RELATIONS FOR INFORMATION SUPPORT OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

The theoretical substantiation of the choice of relay protection settings on the primary and secondary side of transformers with the connection of windings according to the scheme Y/D-11 is given. The substantiation of competence of transformation of schemes of connection of windings and invariance of losses in a power line and the transformer at such transformation and asymmetric loading or short circuit is given. The theoretical substantiation of the basic relations necessary for information support of intelligent control systems of transformer substations and systems of recognition of the mode of the electric network, detection of pre-emergency mode and making the optimal decision for control of technological processes in the system of power supply is given.

Connection diagram of the transformer windings, asymmetric load of the transformer, short-circuit resistance of the transformer, power loss in the transmission line, power loss in the transformer, information support of intelligent control and protection systems in the power industry