УДК 621.331 : 621.311.075 : 621.316.97 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18

Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий в тяговой сети переменного тока

Ю. И. ЖАРКОВ, Н. А. ПОПОВА, Е. П. ФИГУРНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

Аннотация. При вычислении токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока предполагается, что каждая из тяговых подстанций получает питание от несвязанных между собой источников внешнего электроснабжения с известными сопротивлениями. В ряде случаев, особенно при питании группы тяговых подстанций от высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения, система внешнего электроснабжения оказывает влияние не только на величину токов короткого замыкания, но и на их перераспределение между смежными тяговыми подстанциями той межподстанционной зоны, где рассматривается это замыкание. Такое неучтенное перераспределение может оказывать негативное влияние на защиту от коротких замыканий.

Рассматриваются схемы замещения тяговой сети с учетом сопротивлений системы внешнего электроснабжения. Обращается особое внимание, что в схемах замещения прямой и обратной последовательности значение приведенного сопротивления одной фазы многообмоточного трансформатора, вычисленное по напряжению короткого замыкания, не зависит от схемы соединения его обмоток. Отмечается, что в ряде случаев полную схему внешней системы электроснабжения получить затруднительно. Учитывая, что короткое замыкание в тяговой сети для системы внешнего электроснабжения является удаленным, предлагается в качестве источников питания рассматривать опорные сетевые или тяговые подстанции, от которых по высоковольтным линиям электропередачи осуществляется питание тяговых подстанций. Сопротивление опорных подстанций как источников питания должно учитывать подключенную эквивалентную энергосистему.

Такое эквивалентирование необходимо осуществлять по известным значениям токов или мощностей короткого замыкания на вводах опорной подстанции либо, если такие сведения отсутствуют, по номинальным значениям отключаемых токов или мощностей выключателей присоединений высоковольтных линий.

Рассматриваются следующие схемы питания тяговых подстанций:

- каждая от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения;
- от двухцепной высоковольтной линии продольного электроснабжения при ее питании от разных опорных подстанций;
- от опорной сетевой подстанции двумя линиями получает питание опорная тяговая подстанция, а от нее двумя линиями по кольцевой схеме получают питание тяговые подстанции.

Эти три общих случая охватывают все наиболее распространенные схемы питания тяговых подстанций. Для каждого из них приведены формулы, позволяющие определить результирующее эквивалентное сопротивление схемы внешнего электроснабжения, которое должно учитываться в схеме замещения тяговой сети.

Ключевые слова: тяговая сеть; короткие замыкания; система внешнего электроснабжения; схемы внешнего питания; схемы замещения; сопротивления; токи

E-mail: asel@rgups.ru (Н. А. Попова)

Введение. Традиционная схема питания межподстанционной зоны от тяговой подстанции А до смежной тяговой подстанции В при коротком замыкании тяговой сети (между контактной КС и рельсовой РС сетями) приведена на рис. 1. Она предполагает, что силовые тяговые трансформаторы $Т_А$ и $Т_В$ получают питание от не связанных между собой систем внешнего электроснабжения соответственно $ЭС_А$ и $ЭС_В$ [1, 2, 3, 4].

Искомой величиной являются линейные токи $I_А$ и $I_В$, вычисляемые, например, в соответствии с [2, 3, 5]. По этим токам находят токи питающих линий контактной сети, значения которых используются для выбора уставок защиты от коротких замыканий.

В [6] справедливо отмечается, что принятая на рис. 1 схема подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения не является единственной и в целом ряде случаев, например приведенном в [6], не обеспечивает требуемой точности. Питание смежных тяговых подстанций может осуществляться от одной системы внешнего электроснабжения, от одноцепной или двухцепной линии продольного электроснабжения при одностороннем, кольцевом или двустороннем питании и т. п. [1, 7]. Эти обстоятельства в общем случае влияют не только на значения токов $I_А$ и $I_В$, но и на их соотношения, что может негативно сказаться на обосновании выбора уставок защит от коротких замыканий, рассчитанных не для каждого из реальных случаев подключения тяговой подстанции к системе внешнего электроснабжения, а в предположении, что такое подключение осуществлено по схеме, приведенной на рис. 1.

В статье рассматривается и обосновывается методика составления схем замещения и расчета их параметров, предусматривающая и другие возможные способы присоединения тяговых подстанций к системе

внешнего электроснабжения с учетом реальных условий эксплуатации и проектирования, а также взаимодействия с территориальными сетевыми и (или) иными энергоснабжающими организациями, к электрическим сетям которых эти подстанции подсоединены.

Схемы замещения. Расчет токов короткого замыкания в трехфазных электроустановках напряжением свыше 1 кВ осуществляется на основании схем замещения, правила составления которых приведены в [8] и описаны также в [9, 10, 11]. Согласно [8] для любого короткого замыкания в общем случае требуется составлять три схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательности. Конечный результат получают методом наложения. Схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей следует выполнять в однолинейном (однофазном) исполнении. Никакой погрешности при этом не возникает. Обоснование применимости однофазных схем замещения приведено, например, в [11]. Вместе с тем следует отметить, что найденные для схемы замещения токи являются реальными только для той части схемы, ступень напряжения которой принята в качестве основной. Короткое замыкание в тяговой сети является для электроустановок несимметричным (двухфазным $K^{(2)}$) с обмоткой трансформатора, соединенной треугольником. В этом случае токи нулевой последовательности отсутствуют, а сопротивления прямой и обратной последовательностей учитываемых элементов одинаковы. Поэтому для расчета достаточно составлять только одну схему замещения для прямой последовательности.

В упрощенном виде схема замещения при коротком замыкании на выводах понижающего трансформатора приведена на рис. 2, *а*. Отличительной особенностью схемы в трехлинейном исполнении является соединение ЭДС, соответствующее прямой последовательности: источники фазных ЭДС соединены звездой. Из рис. 2, *а* следует [11]:

$$I_{\text{к}} = \frac{\left|\dot{E}_b - \dot{E}_c\right| 10^{-3}}{2\left(X'_{\text{С}} + X_{\text{т}}\right)} = \frac{\sqrt{3}E10^{-3}}{2\left(X'_{\text{С}} + X_{\text{т}}\right)} = \frac{\sqrt{3}E10^{-3}}{X_{\text{п}}}, \text{А}, \quad (1)$$

где E — модуль фазовой ЭДС источника питания $\left(E = \left|\dot{E}_a\right| = \left|\dot{E}_b\right| = \left|\dot{E}_c\right|\right)$, кВ; $X_{\text{п}}$ — входное сопротивление тяговой подстанции, равное $2(X'_{\text{С}} + X_{\text{т}})$, Ом.

В соответствии с [8] в формуле (1) учтены только индуктивные сопротивления, поскольку при вычислении токов короткого замыкания в высоковольтных установках значениями активного сопротивления из-за его малости пренебрегают. Это правило не касается сопротивлений тяговой сети.

Знаменатель выражения (1) соответствует так называемому входному сопротивлению $X_{\text{п}}$ тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании, состоящему из удвоенной суммы фазных сопротивлений питающей

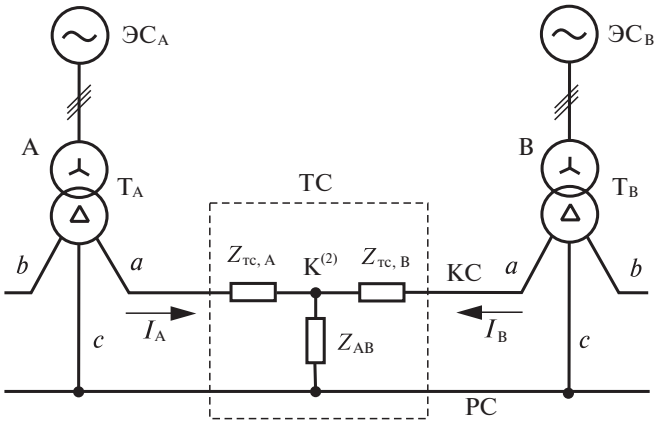

Рис. 1. Расчетная схема питания межподстанционной зоны при коротком замыкании в тяговой сети: ЭС$_A$, ЭС$_B$ — система внешнего электроснабжения тяговых подстанций А и В соответственно; Т$_A$ и Т$_B$ — силовые тяговые трансформаторы; КС — контактная сеть; РС — рельсовая сеть; ТС — Т-образная схема замещения тяговой сети многопутного участка при коротком замыкании; $K^{(2)}$ — расчетная точка двухфазного короткого замыкания; $Z_{\text{тс, А}}, Z_{\text{тс, В}}, Z_{AB}$ — эквивалентные комплексные сопротивления схемы замещения тяговой сети многопутного участка

Fig. 1. Calculated power supply scheme of the inter-station zone in case of a short circuit in the traction network: ЭС$_A$, ЭС$_B$ — external power supply system of the traction substations A and B respectively; Т$_A$ and Т$_B$ — power traction transformers; КС — catenary; РС — rail network; ТС — T-shaped scheme of replacing traction network of a multi-track section during a short circuit; $K^{(2)}$ — calculated point of a two-phase short circuit; $Z_{\text{тс, А}}, Z_{\text{тс, В}}, Z_{AB}$ — equivalent complex resistances for replacing the traction network of the multi-track section

системы внешнего электроснабжения $X_{\text{С}}$ и трансформатора $X_{\text{т}}$, рис. 2, *а, б*. Расчет может выполняться как в относительных, так и в именованных единицах. Как правило, для расчетов токов короткого замыкания в тяговой сети используются именованные единицы, причем все они должны быть приведены к единым базисным условиям. Для элементов цепи системы внешнего электроснабжения и тяговых трансформаторов приведение следует осуществлять по условиям [8]:

$$\overset{\circ}{E} = E\frac{U_{\text{ср. ном}}}{U_{\text{ср.}N}}; \ \overset{\circ}{X} = X\frac{U^2_{\text{ср. ном}}}{U^2_{\text{ср.}N}}; \ \overset{\circ}{X} = X_{*(\text{ном})}\frac{U^2_{\text{ср. ном}}}{S_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где E, X — значения фазных ЭДС, кВ, и сопротивлений, Ом, на той ступени напряжения, на которой находится данный элемент; $X_{*(\text{ном})}$ — сопротивление элемента, выраженное в относительных единицах при номинальных условиях; $U_{\text{ср. ном}}$ — среднее номинальное линейное напряжение, кВ, сети той ступени напряжения, которая принята за основную (27,5 кВ); $U_{\text{ср.}N}$ — среднее номинальное линейное напряжение, кВ, той ступени напряжения, где находится элемент, параметры которого подлежат приведению (для системы внешнего электроснабжения 37, 115, 230 кВ); $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность элемента, МВ·А. Кружок над соответствующей величиной обозначает, что она приведена к базисным значениям.

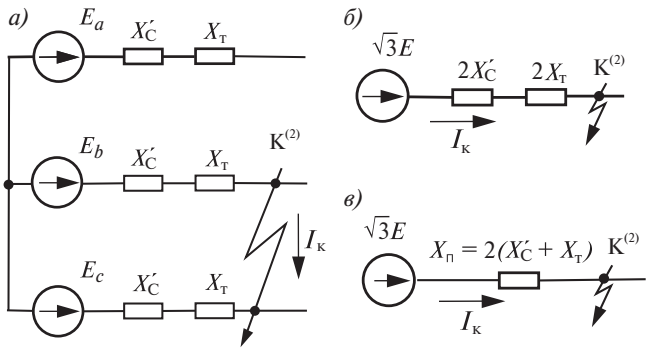

Рис. 2. Трехлинейная (*а*) и однолинейные (*б*, *в*) упрощенные схемы замещения прямой последовательности, при двухфазном коротком замыкании: E_a, E_b, E_c — фазные ЭДС источников питания; X'_C — индуктивное сопротивление фазы системы внешнего электроснабжения, приведенное к базовому напряжению; $X_т$ — индуктивное сопротивление фазы понижающего трансформатора, приведенное к базовому напряжению; $X_п$ — входное сопротивление тяговой подстанции

Fig. 2. Three-line (*a*) and single-line (*б*, *в*) simplified equivalent sequence replacement schemes with two-phase short circuit: E_a, E_b, E_c – phase EMF of power sources; X'_C — phase inductive resistance of external power supply system, reduced to the base voltage; $X_т$ — phase inductive resistance of the step-down transformer, reduced to the base voltage; $X_п$ — input resistance of traction substation

К сожалению, в ряде публикаций такие требования соблюдены не в полной мере, что и приводит к расхождениям при составлении схем замещения и в результатах расчетов, о которых отмечено в [5].

В связи с многочисленной неопределенностью в исходных данных и условиях, при которых возникает короткое замыкание, схема замещения составляется и рассчитывается с большим числом допущений и приближений, подробно описанных в [8, 9, 10]. Для тяговой сети они дополняются следующими [1, 2, 12]:

• не учитывается нагрузка неповрежденных плеч питания силовых (тяговых) трансформаторов (на рис. 1 фаза *b*), питающих контактную сеть смежных межподстанционных зон;

• не учитывается тяговая нагрузка в межподстанционной зоне с коротким замыканием.

Первое допущение связано с тем, что при коротком замыкании в отличие от нормального режима нагрузка смежных плеч питания оказывает крайне малое влияние на значения токов коротких замыканий $I_А$ и $I_В$. Второе допущение учитывает, что при резком снижении напряжения в контактной сети с коротким замыканием силовая цепь электровозов запирается, либо переходит в режим, благоприятствующий повышению чувствительности защиты.

Расчетными точками короткого замыкания при выборе уставок релейной защиты являются шины поста секционирования и шины смежной тяговой подстанции. Эквивалентное сопротивление цепи короткого замыкания от источника выработки электроэнергии в системе внешнего электроснабжения до точки короткого замыкания в тяговой сети получается, как правило, настолько большим, что короткое замыкание считают удаленным [8] с периодической составляющей тока короткого замыкания, неизменной по амплитуде. В этих условиях расчетной схеме питания, приведенной на рис. 1, соответствует трехлинейная схема замещения прямой последовательности, показанная на рис. 3, *а*. Приняв

$$\dot{U}_{А,\,рас} = \dot{E}'_{С,\,А(a)} - \dot{E}'_{С,\,А(c)},\ кВ;$$
$$\dot{U}_{В,\,рас} = \dot{E}'_{С,В(a)} - \dot{E}'_{С,В(c)},\ кВ, \qquad (3)$$

представим трехлинейную схему замещения в однолинейном исполнении (рис. 3, *б*), в которой

$$X_{п,\,А} = 2\left(X'_{С,\,А} + X_{т,\,А}\right), Ом;$$
$$X_{п,\,В} = 2\left(X'_{С,\,В} + X_{т,\,В}\right), Ом. \qquad (4)$$

Обозначим

$$Z_А = jX_{п,\,А} + Z_{тс,\,А},\ Ом;$$
$$Z_В = jX_{п,\,В} + Z_{тс,\,В},\ Ом. \qquad (5)$$

где $Z_{тс,\,А}$, $Z_{тс,\,В}$ — эквивалентные комплексные сопротивления схемы замещения тяговой сети многопутного участка. (Здесь и далее все сопротивления, обозначенные буквой Z, являются комплексными.)

Искомые токи $I_А$ и $I_В$ для этой схемы замещения вычисляют по формулам

$$\dot{I}_А = \frac{\dot{U}_{А,\,рас}\left(1+\dfrac{Z_{АВ}}{Z_В}\right) - \dot{U}_{В,\,рас}\dfrac{Z_{АВ}}{Z_В}}{Z_А + Z_{АВ}\left(1+\dfrac{Z_{АВ}}{Z_В}\right)}10^3,\ А; \qquad (6)$$

$$\dot{I}_В = \frac{\dot{U}_{В,\,рас}\left(1+\dfrac{Z_{АВ}}{Z_А}\right) - \dot{U}_{А,\,рас}\dfrac{Z_{АВ}}{Z_А}}{Z_В + Z_{АВ}\left(1+\dfrac{Z_В}{Z_А}\right)}10^3,\ А. \qquad (7)$$

Значения токов, вычисленных по (6) и (7) не зависят от схемы соединения обмоток тяговых трансформаторов, поскольку сопротивление этих трансформаторов входит составной частью в сопротивления $Z_А$ и $Z_В$. При вычислении наибольших значений токов $I_А$ и $I_В$ для максимального режима работы системы внешнего электроснабжения принимают линейные напряжения $U_{А,\,рас} = U_{В,\,рас} = 28{,}2$ кВ. Наименьшее значение этих токов для минимального режима работы этой системы определяют при $U_{А,\,рас} = U_{В,\,рас} = 26{,}2$ кВ.

Сопротивление тяговой сети. Сопротивления $Z_{тс,\,А}$, $Z_{тс,\,В}$, $Z_{АВ}$ (рис. 3) зависят от конфигурации сети,

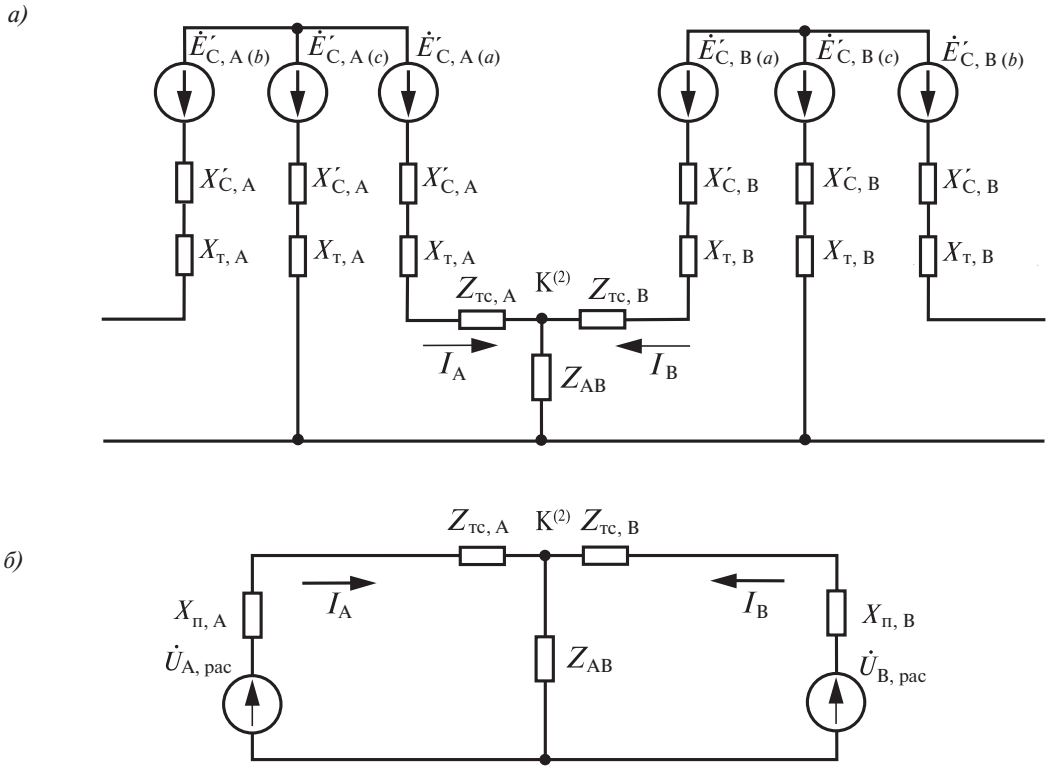

Рис. 3. Трехлинейная (*а*) и эквивалентная однолинейная (*б*) схемы замещения тяговой сети межподстанционной зоны при коротком замыкании:
$\dot{E}'_{C,A(a)}, \dot{E}'_{C,A(b)}, \ldots, \dot{E}'_{C,B(c)}$ — приведенные к ступени среднего номинального напряжения тяговой сети фазовые ЭДС (фазы *a*, *b* и *c*) систем внешнего электроснабжения тяговых подстанций А и В соответственно; $\dot{U}_{A,рас}, \dot{U}_{B,рас}$ — расчетные напряжения тяговых подстанций А и В соответственно; $X'_{C,A}, X'_{C,B}$ — эквивалентные индуктивные, приведенные к среднему номинальному напряжению холостого хода на шинах, питающих контактную сеть, сопротивления фазы систем внешнего электроснабжения для тяговых подстанций А и В соответственно; $X_{т,A}, X_{т,B}$ — эквивалентные индуктивные, приведенные к ступени среднего номинального напряжения тяговой сети, сопротивления фазы силовых (тяговых) трансформаторов тяговых подстанций А и В соответственно; $X_{п,A}, X_{п,B}$ — эквивалентные сопротивления тяговых подстанций А и В соответственно

Fig. 3. Three-line (*a*) and equivalent single-line (*б*) circuit of traction network of the inter-station area in case of short circuit:
$\dot{E}'_{C,A(a)}, \dot{E}'_{C,A(b)}, \ldots, \dot{E}'_{C,B(c)}$ — phase EMF voltage (phase *a*, *b* and *c*) of the external power supply systems of the traction substations A and B respectively, reduced to the level of the average nominal voltage of the traction network; $\dot{U}_{A,рас}, \dot{U}_{B,рас}$ — calculated voltages of the traction substations A and B respectively; $X'_{C,A}, X'_{C,B}$ — equivalent inductive phase resistance of external power supply systems for traction substations A and B respectively, reduced to the average nominal open circuit voltage on the buses supplying the contact network; $X_{т,A}, X_{т,B}$ — equivalent inductive phase resistance of the power (traction) transformers of the traction substations A and B respectively, reduced to the level of the average nominal voltage of the traction network; $X_{п,A}, X_{п,B}$ — equivalent resistance of the traction substations A and B respectively

схемы питания, расчетной точки короткого замыкания. Формулы для их вычисления приведены в [2, 3], а также в стандарте ОАО «РЖД» СТО РЖД 07.021.1–2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».

Сопротивление трансформаторов. В каждой фазе схемы замещения системы электроснабжения мощный трансформатор учитывается сопротивлением $X_т$, определяемым по так называемому сопротивлению короткого замыкания $X_к$. При определении этого параметра $X_к$ для трансформатора со схемой соединения обмоток Y / Δ могут возникать, как показывает практика, некоторые сложности, поэтому остановимся на этом более подробно. Сопротивление трансформатора $X_т$ с любой схемой соединения обмоток принято вычислять на основании данных опыта короткого замыкания по формуле [12], на одну фазу

$$X_к = \frac{U_к 10^3}{I_к} = X_{*(ном)} \frac{U_ф 10^3}{I_ф} = \frac{u_к}{100} \frac{U_ф 10^3}{I_ф}, \text{ Ом}, \quad (8)$$

где $U_к$ — фазное напряжение, кВ, подводимое к трансформатору при замкнутой накоротко обмотке вторичного напряжения и при условии, что фазный ток $I_к$, А, при коротком замыкании равен своему номинальному значению $I_ф$, $I_к = I_ф$; $X_{*(ном)}$ — относительное значение сопротивления фазы трансформатора, равное $u_к/100$; $U_ф$ — номинальное значение напряжения фазы, кВ.

Напряжение короткого замыкания $u_к$, %, для каждой обмотки указывается в паспорте трансформатора. Значение $X_к$ удобно выразить через линейные номинальные величины напряжения $U_{ном}$ и тока $I_{ном}$, имея в виду, что для схемы соединения обмоток в звезду $U_ф = U_{ном}/\sqrt{3}$, $I_ф = I_{ном}$, а для соединения в треугольник $U_ф = U_{ном}$, $I_ф = I_{ном}/\sqrt{3}$. Тогда для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y имеем

$$X_{к,Y} = \frac{u_к}{100}\frac{U_ф 10^3}{I_ф} = \frac{u_к}{100}\frac{U_{ном}10^3}{I_{ном}\sqrt{3}} \times$$
$$\times\left(\frac{U_{ном}}{U_{ном}}\right) = \frac{u_к}{100}\frac{U^2_{ном}}{S_{ном}}, \qquad (9)$$

а для трансформатора со схемой соединения обмоток Y / Δ получаем

$$X_{к,\Delta} = \frac{u_к}{100}\frac{U_ф 10^3}{I_ф} = \frac{u_к}{100}\frac{U_ф 10^3}{I_ф}\left(\frac{U_ф}{U_ф}\right) =$$
$$= \frac{u_к}{100}\frac{U^2_{ном}}{S_1} = \frac{u_к}{100}\frac{3U^2_{ном}}{S_{ном}}, \qquad (10)$$

где $S_{ном}$, S_1 — номинальная мощность трансформатора и мощность одной его фазы, МВ·А.

Значения $X_{к,Y}$ и $X_{к,\Delta}$ отличаются в 3 раза. Поскольку $u_к/100 = X_{*(ном)}$, то выражение (9) приведено к базисным параметрам для схемы замещения системы электроснабжения (рис. 3). При этом в каждой фазе сопротивление $X_{к,Y}$ включено последовательно с фазной ЭДС источника питания.

Иначе обстоит дело с сопротивлением $X_{к,\Delta}$, которое не отвечает условиям (2), так как относительное сопротивление $u_к/100$ отнесено здесь не к номинальной мощности трансформатора, а только к мощности одной его фазы. При этом сопротивление $X_{к,\Delta}$ включено последовательно не с фазной, а с линейной ЭДС источника питания и поэтому не может использоваться в схеме замещения, приведенной на рис. 3. Схема замещения энергосистемы, в которой может использоваться сопротивление $X_{к,\Delta}$, должна иметь вид треугольника, причем в каждой фазе сопротивления всех других элементов, определяемые через относительные единицы, должны быть приведены к мощности одной фазы соответствующего элемента или пересчитаны от фазного напряжения к линейному. Такая схема замещения приведена в [13].

Для возможности использования сопротивления $X_{к,\Delta}$ в схеме замещения энергосистемы, предусмотренной стандартом [8], его надо привести к базисным условиям по формулам

$$\overset{\circ}{X}_т = \overset{\circ}{X}_{к,\Delta} = X_{к,\Delta}\frac{S_1}{S_{ном}} = X_{к,\Delta}\frac{U^2_ф}{U^2_{ном}} = \frac{X_{к,\Delta}}{3}. \qquad (11)$$

Из сопоставления выражения (9) с формулами (10) и (11) следует, что при одинаковых значениях $u_к/100$ приведенные к одинаковым базовым условиям сопротивления трансформатора при обмотках, соединенных звездой и соединенных треугольником, одинаковы. Поэтому приведенное сопротивление трансформатора считают не зависящим от схемы соединения его обмоток, что специально оговорено также в [11, 14, 15] и учитывается в [8, 9, 10].

В отдельных случаях, к сожалению, сопротивления $X_{к,\Delta}$, вычисляемые по формуле (10) и не приведенные к базисным условиям, ошибочно используют в схеме замещения, показанной на рис. 3. Это и является неявной причиной расхождения расчетов, отмеченных в [5].

Таким образом, для вычисления сопротивления фазы трансформатора в схеме замещения, приведенной на рис. 3, *а*, сведения о схеме соединения его обмоток не требуются и применяют формулу [8, 9, 10, 11].

$$\overset{\circ}{X}_т = \frac{u_к}{100}\frac{U^2_{ном}}{S_т}, \text{ Ом}. \qquad (12)$$

В этой формуле $u_к$ выраженно в процентах, $U_{ном}$ в кВ, а $S_т$ в МВ·А.

Во избежание иногда встречающегося неточного толкования следует подчеркнуть, что при вычислении по формуле (12) сопротивления двух- или трехобмоточного трансформатора (для любой обмотки или пары обмоток) в схеме замещения системы электроснабжения при двух- или трехфазном коротком замыкании сведений о схеме и группе соединения обмоток трансформатора не требуется.

В дальнейшем предполагаем, что сопротивление всех элементов, входящих в схему замещения по рис. 3, *а* и др., являются приведенными к единым базисным условиям, и кружок над их обозначением ставить не будем.

Эквивалентирование внешней системы электроснабжения. При проектировании тяговой сети на перспективу полная схема внешней системы электроснабжения, принадлежащая территориальным сетевым и (или) иным энергоснабжающим организациям, к электрическим сетям которых подключаются тяговые подстанции, как правило, неизвестна. Не раскрывается она полностью и в период текущей эксплуатации железной дороги. Вместе с тем в [8] допускается эквивалентировать удаленную от места короткого замыкания часть электроэнергетической системы. В настоящее время используется практика такого эквивалентирования с помощью эквивалентных индуктивных приведенных сопротивлений прямой последовательности X'_C ($X'_{C,A}$, $X'_{C,B}$) фазы эквивалентной системы внешнего электроснабжения, указанных на рис. 3, *а*. Значения этих сопротивлений X_C для каждой тяговой подстанции, приведенные к среднему номинальному напряжению сети, питающей тяговую подстанцию, сообщаются сетевой организацией, к которой данная подстанция подключена. Вместо значения X_C сетевая организация может сообщить значение тока $I^{(3)}_к$, кА, или мощности

$S_{к}^{(3)}$, МВ·А, трехфазного короткого замыкания на вводах в данную тяговую подстанцию. В этом случае сопротивление $X_{С}$ согласно [8] вычисляют по формуле

$$X_{С} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3}I_{к}^{(3)}} = \frac{U_{ср.ном}^{2}}{S_{к}^{(3)}}, \text{Ом}, \quad (13)$$

где $U_{ср.ном}$ — среднее номинальное напряжение сети, питающей вводы высокого напряжения тяговой подстанции, кВ.

Сопротивление $X'_{С}$, приведенное к основному напряжению 27,5 кВ тяговой сети в схеме замещения, вычисляют по известной формуле

$$X'_{С} = X_{С}\left(\frac{27{,}5}{U_{ср.ном}}\right)^{2}, \text{ Ом}. \quad (14)$$

Входное сопротивление $X_{п}$ тяговой подстанции (рис. 2, *в* и рис. 3, *б*) в этом случае имеет вид

$$X_{п} = 2\left(X'_{С} + X_{т}\right) = 2\left(\frac{27{,}5^{2}}{S_{к}^{(3)}} + \frac{u_{к}}{100}\frac{27{,}5^{2}}{S_{ном}}\right). \quad (15)$$

Такая формула приведена в [2, 3], а также другим путем получена в [5, 6]. Если при определении $X_{п}$ ошибочно использовать в качестве $X'_{С}$ и $X_{т}$ не приведенные по (2) и схеме замещения по рис. 3, *а* значения [8], а отнесенные к мощности только одной фазы (как сопротивление $Z_{к,\Delta}$), то результат окажется в 3 раза больше. Таким образом, упомянутые выше расхождения в расчетах могут быть обусловлены и тем, что сопротивления, величины которых в именованных единицах определяются через их относительные значения, ошибочно не приводятся к базовым условиям стандартной схемы замещения [8].

Вычисление $X'_{С}$ по параметрам трехфазного короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию является самым простым способом учета влияния системы внешнего электроснабжения на токи короткого замыкания тяговой сети.

В определенных условиях, как было отмечено выше, такой упрощенный подход для некоторых схем внешнего питания тяговых подстанций и двустороннем питании тяговой сети может вызвать погрешность при вычислении искомых токов по формулам (6), (7).

Более точное эквивалентирование удаленной части системы внешнего электроснабжения обеспечивается, если в качестве источников энергии принять так называемые опорные сетевые или тяговые подстанции [1, 7], от которых по высоковольтным линиям электропередачи питаются все транзитные (промежуточные) проходные или на отпайках тяговые подстанции. Эквивалентную приведенную ЭДС фазы $E'_{С,О}$ опорной подстанции принимают равной

$$E'_{С,О} = \frac{27{,}5}{\sqrt{3}}, \text{ кВ}. \quad (16)$$

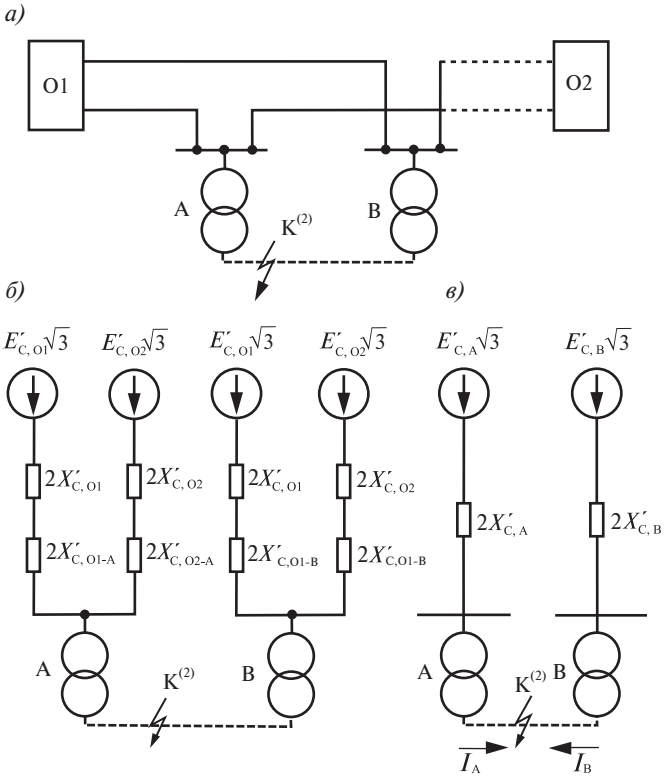

Рис. 4. Упрощенные схемы питания и замещения при двустороннем питании от двухцепной высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения: *а* — схема питания; *б* и *в* — схемы замещения; О1 и О2 — опорные подстанции

Fig. 4. Simplified power supply and replacement schemes with two-way power from a double-circuit high-voltage power line for longitudinal power supply: *а* — power circuit; *б* and *в* — equivalent schemes; О1 и О2 — master substations

Сопротивление фазы $X_{С,О}$ эквивалентной энергосистемы для опорной подстанции вычисляют по формулам (13, 14). Если значения $I_{к}^{(3)}$ и $S_{к}^{(3)}$ неизвестны, то вместо них используют значение номинального отключаемого тока или номинальной отключаемой мощности тех выключателей опорной подстанции, к которым подключены высоковольтные линии электропередачи, питающие тяговые подстанции [9]. Сопротивление высоковольтных линий электропередачи вычисляют по [8, 9]. Сопротивление $X'_{С,О}$ опорной подстанции и линии электропередачи $X'_{С,л}$, приведенные к основному (базовому) напряжению схемы замещения, в качестве которого принято 27,5 кВ, вычисляют по (2).

Рассмотрим далее три наиболее характерных схемы питания тяговых подстанций от опорных:

• каждая тяговая подстанция питается от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения;

• тяговые подстанции получают питание от высоковольтной двухцепной линии электропередачи продольного электроснабжения при ее двустороннем питании от разных опорных подстанций;

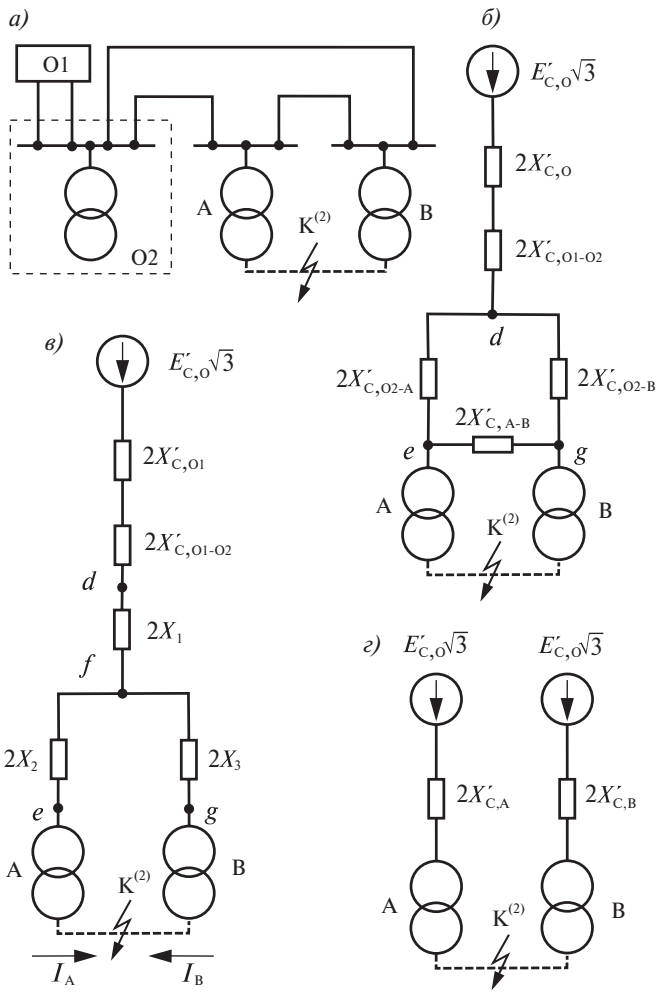

Рис. 5. Упрощенные схемы питания и замещения при одностороннем питании от двухцепной высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения:
а — схема питания; *б, в, г* — схемы замещения
Fig. 5. Simplified power supply and replacement schemes with one-way power from a double-circuit high-voltage power line for longitudinal power supply:
a — power circuit; *б, в, г* — equivalent schemes

• тяговые подстанции получают питание от двух высоковольтных линий электропередачи по кольцевой схеме от одной опорной тяговой подстанции, которая двухцепной линией соединена с опорной сетевой подстанцией.

Если смежные тяговые подстанции получают питание каждая от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения, то эквивалентные приведенные сопротивления $X'_{\text{С, А}}$ и $X'_{\text{С, В}}$, показанные на рис. 3, *а*, вычисляют по формуле

$$X'_{\text{С}} = X'_{\text{С, О}} + X'_{\text{С, л}}, \text{ Ом.} \qquad (17)$$

Для опорной сетевой понизительной подстанции, совмещенной с опорной тяговой подстанцией, очевидно, $X'_{\text{С, л}} = 0$.

На рис. 4, *а* приведена упрощенная схема питания смежных тяговых подстанций А и В от двухцепной линии продольного электроснабжения при двустороннем питании от опорных (сетевых или тяговых) подстанций О1 и О2. Схему замещения системы внешнего электроснабжения можно представить в виде, приведенном на рис. 4, *б*, в которой каждая из тяговых подстанций подключена к двум источникам питания О1 и О2 с эквивалентными приведенными фазными ЭДС соответственно $E'_{\text{С, О1}}$ и $E'_{\text{С, О2}}$ (линейными напряжениями $E'_{\text{С, О1}}\sqrt{3}$ и $E'_{\text{С, О2}}\sqrt{3}$) и их фазными сопротивлениями $X'_{\text{С, О1}}$ и $X'_{\text{С, О2}}$. Эквивалентное приведенное сопротивление линий электропередачи от тяговой подстанции А до опорной подстанции О1 имеет обозначение $X'_{\text{С, О1–А}}$, а до опорной подстанции О2 обозначено $X'_{\text{С, О2–А}}$. Соответственно, эквивалентное приведенное сопротивление линий электропередачи от тяговой подстанции В до опорной подстанции О1 имеет обозначение $X'_{\text{С, О1–В}}$, а до опорной подстанции О2 обозначено $X'_{\text{С, О2–В}}$.

Эквивалентные ЭДС $E'_{\text{С, О1}}$ и $E'_{\text{С, О2}}$ вычисляют по (16). Если на практике они не одинаковы, то следует учесть их различия. Эквивалентные приведенные сопротивления опорных подстанций $X'_{\text{С, О1}}$ и $X'_{\text{С, О2}}$ вычисляют по формулам (13) и (14). Сопротивление единицы длины участков линий электропередачи, принимаемые по [8, 9], приводят к основному (базовому) напряжению по (2) и умножают на соответствующую длину. Используя правила преобразования схемы замещения, получим результирующую схему замещения системы внешнего электроснабжения, приведенную на рис. 4, *в*, в которой

$$E'_{\text{С, А}} = \frac{E'_{\text{С, О1}}\left(X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–А}}\right) + E'_{\text{С, О2}}\left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–А}}\right)}{X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–А}} + X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–А}}};$$

$$E'_{\text{С, В}} = \frac{E'_{\text{С, О1}}\left(X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–В}}\right) + E'_{\text{С, О2}}\left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–В}}\right)}{X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–В}} + X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–В}}}.$$

$$X'_{\text{С, А}} = \frac{\left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–А}}\right)\left(X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–А}}\right)}{X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–А}} + X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–А}}};$$

$$X'_{\text{С, В}} = \frac{\left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–В}}\right)\left(X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–В}}\right)}{X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–В}} + X'_{\text{С, О2}} + X'_{\text{С, О2–В}}}.$$

Эти значения используются в схеме замещения, показанной на рис. 3, *а*. Значения $E'_{\text{С, А}}$ и $E'_{\text{С, В}}$ при их равенстве принимают по (16).

Схема одностороннего кольцевого питания тяговых подстанций А и В двумя линиями от опорной сетевой подстанции О1 через опорную тяговую подстанцию О2 и ее схема замещения показаны на рис. 5. Фазная ЭДС опорной подстанции О1 обозначена $E'_{\text{С, О1}}$, а ее эквивалентное фазное сопротивление $X'_{\text{С, О1}}$. При-

веденное сопротивление фазы высоковольтной линии между опорными подстанциями О1 и О2 обозначено $X'_{\text{С,О1-О2}}$. Сопротивление фаз высоковольтной линии между опорной подстанцией О2 и тяговыми подстанциями А и В обозначены соответственно $X'_{\text{С, О2–А}}$, $X'_{\text{С, О2–В}}$ и $X'_{\text{С, А–В}}$ (рис. 5, *б*).

Треугольник сопротивлений между точками *d*, *e*, *g* на рис. 5, *б* может быть преобразован в звезду, состоящую из сопротивлений X_1, X_2 и X_3, показанных на рис. 5, *в*. Их значения равны [8]

$$X_1 = \frac{X'_{\text{С, О2–А}} X'_{\text{С, О2–В}}}{X'_{\text{С, О2–А}} + X'_{\text{С, О2–В}} + X'_{\text{А–В}}}, \text{Ом};$$

$$X_2 = \frac{X'_{\text{С, О2–А}} X'_{\text{А–В}}}{X'_{\text{С, О2–А}} + X'_{\text{С, О2–В}} + X'_{\text{А–В}}}, \text{Ом};$$

$$X_3 = \frac{X'_{\text{С, О2–В}} X'_{\text{А–В}}}{X'_{\text{С, О2–А}} + X'_{\text{С, О2–В}} + X'_{\text{А–В}}}, \text{Ом}.$$

Схема, приведенная на рис. 5, *в*, обычным путем преобразуется в схему, показанную на рис. 5, *г*, в которой

$$X'_{\text{С, А}} = \left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–О2}} + X_1\right)\left(1 + \frac{Z_{\text{А, ф}}}{Z_{\text{В, ф}}}\right) + X_2;$$

$$X'_{\text{С, В}} = \left(X'_{\text{С, О1}} + X'_{\text{С, О1–О2}} + X_1\right)\left(1 + \frac{Z_{\text{В, ф}}}{Z_{\text{А, ф}}}\right) + X_3.$$

Комплексные сопротивления $Z_{\text{А, ф}}$ и $Z_{\text{В, ф}}$ для этой схемы вычисляют по выражениям

$$Z_{\text{А, ф}} = j2\left(X_2 + X_{\text{т, А}}\right) + Z_{\text{тс, А}};$$

$$Z_{\text{В, ф}} = j2\left(X_3 + X_{\text{т, В}}\right) + Z_{\text{тс, В}}.$$

Подобным образом определяют значения $X'_{\text{С, А}}$, $X'_{\text{С, В}}$ и для других схем питания тяговых подстанций.

Заключение. 1. При отсутствии сведений о системе внешнего электроснабжения в целом следует ее эквивалентировать относительно опорных сетевых или тяговых подстанций.

2. ЭДС и сопротивление элементов системы внешнего электроснабжения используются, как правило, в именованных единицах и должны быть определены в соответствии с [7, 8, 9, 10]. При этом особое внимание следует обратить на то обстоятельство, что для прямой и обратной последовательности при заданном напряжении короткого замыкания $u_{\text{к}}$, % приведенное сопротивление $X_{\text{т}}$ фазы двух- и многообмоточных трансформаторов от схемы соединения обмоток не зависит.

3. Предложенные методики учета параметров системы внешнего электроснабжения могут быть использованы при проектировании электрификации железных дорог и в условиях текущей эксплуатации, а также при авариях на высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1983. 528 с.
2. Фигурнов Е.П. Релейная защита: учеб. для вузов в 2 ч. Ч. 2. 3-е изд. перераб. и доп. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. 604 с.
3. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения / ОАО «РЖД». М.: Трансиздат, 2005. 216 с.
4. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. М.: Трансжелдориздат, 1960. 260 с.
5. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 329–335. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335.
6. Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменных токов при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 3. С. 17–23.
7. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог (сборник справочных материалов) / ОАО «РЖД». М.: Трансиздат, 2004. 384 с.
8. ГОСТ Р 52735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: введен 01.07.2008. М.: Стандартинформ, 2007. 36 с.
9. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / РАО «ЕЭС России». М.: НЦ ЭНАС, 2002. 152 с.
10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.; Л.: Энергия, 1964. 704 с.
11. Тяговые подстанции / Ю.М. Бей [и др.]: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1986. 319 с.
12. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
13. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11 / С.А. Серебряков [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 5. С. 19–25.
14. Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1988. 328 с.
15. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с. (Руководящие указания по релейной защите; вып. 11).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖАРКОВ Юрий Иванович,
д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ПОПОВА Наталия Андреевна,
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ФИГУРНОВ Евгений Петрович,
д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г., актуализирована 19.11.2018 г., принята к публикации 14.01.2019 г.

Accounting power supply schemes for traction substations in the calculation of short circuits in the AC traction network

Yu. I. ZHARKOV, N. A. POPOVA, E. P. FIGURNOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State University of Railway Engineers" (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

Abstract. When calculating short-circuit currents in the AC traction network, it is assumed that each of the traction substations receives power from uncoupled external power supply sources with known resistances. In some cases, especially when powering a group of traction substations from a high-voltage power line of a longitudinal power supply, the external power supply system affects not only the magnitude of short-circuit currents, but also their redistribution between adjacent traction substations of the interstation area where this circuit is considered. Such unrecorded redistribution can have a negative effect on short circuit protection.

The article considers the equivalent circuit of the traction network, taking into account resistance of the external power supply system. Particular attention is paid to the fact that in replacement circuits of direct and negative sequence value of reduced resistance of one phase of a multiwinding transformer, calculated from the short circuit voltage, does not depend on the connection scheme of its windings. It is noted that in some cases it is difficult to obtain a complete scheme of an external power supply system. Considering that the short circuit in the traction network for the external power supply system is remote, it is proposed taking into account the reference network or traction substations as power sources, from which high-voltage transmission lines power the traction substations. Resistance of the supporting substations as power sources must takes into account connected equivalent power system.

Such equivalenting should be carried out by known values of currents or short-circuit powers at the inputs of the reference substation or, if such information is not available, by the rated values of the switched-off currents or powers of the switches of high-voltage line connections.

The following power schemes for traction substations are considered: each from its own supporting substation, which is part of an electrically uncoupled external power supply system; from the double-circuit high-voltage line of longitudinal power supply when it is powered from different supporting substations; from the supporting network substation, the traction substation receives power from two lines, and from this the traction substations receive power from two lines in a circle pattern.

These three common cases cover all the most common power schemes for traction substations. For each of them formulas are given to determine the resulting equivalent resistance of the external power supply circuit, which should be taken into account in the replacement circuit of the traction network.

Keywords: traction network; short-circuits; external power supply system; external power supply schemes; replacement schemes; resistances; currents

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18

REFERENCES

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta* [Power supply of electrified railways. Textbook for universities of railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1983, 528 p.

2. Figurnov E. P. *Releynaya zashchita. Ucheb. dlya vuzov v 2 ch. Ch. 2. 3-e izd. pererab. i dop.* [Relay protection. Textbook for high schools in 2 parts. Part 2. 3rd edition revised and enlarged]. Moscow, GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [State Educational Institution "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport"] Publ., 2009, 604 p.

3. *Guidelines for relay protection of traction power systems.* Moscow, JSC "RZD", Transizdat Publ., 2005, 216 p.

4. Kuchma K. G., Markvardt G. G., Pupynin V. N. *Zashchita ot tokov korotkogo zamykaniya v kontaktnoy seti* [Protection against short-circuit currents in the contact network]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1960, 260 p.

5. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Metodika rascheta tokoraspredeleniya v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Calculation methodology of current distribution in traction networks of AC current]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 6, pp. 329-335. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335.

6. German L. A., Subkhanverdiev K. S. *Calculations of short circuit currents in the traction network of alternating currents when accounting for external power supply.* Electronics and electrical equipment of transport, 2017, no. 3, pp. 17 – 23.

7. *Power equipment for traction substations of railways (collection of reference materials).* Moscow, JSC "RZD", Transizdat Publ., 2004, 384 p.

8. GOST R 52735 – 2007. *Short circuits in electrical installations. Calculation methods for electrical installations of alternating current of voltage above 1 kV.* Put into force 01.07.2008. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 36 p. (in Russ.).

9. RD 153-34.0-20.527-98. *Guidelines for calculating short circuit currents and selecting electrical equipment.* Moscow, NTs ENAS Publ., 2002, 152 p. (in Russ.).

10. Ul'yanov S. A. *Electromagnetic transients in electrical systems.* Moscow, St. Petersburg, Energiya Publ., 1964, 704 p.

11. Bey Yu. M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. *Traction substations. Textbook for high schools.* Moscow, Transport Publ., 1986, 319 p.

12. Vol'dek A. I. *Electric machines.* Textbook for high schools. 2nd edition revised and enlarged. St. Petersburg, Energiya Publ., 1974, 840 p.

13. Serebryakov A. S., German L. A., Osokin V. L., Subkhanverdiev K. S. *Analysis of methods for calculating short-circuit currents of the transformer when connecting the windings according to the scheme Y/Δ-11.* Electronics and electrical equipment of transport, 2017, no. 5, pp. 19 – 25.

14. Karaev R. I., Volobrinskiy S. D., Kovalev I. N. *Electrical networks and power systems.* Textbook for universities. Moscow, Transport Publ., 1988, 328 p.

15. *Calculations of short circuit currents for relay protection and system automation in 110 – 750 kV networks* (Relay Protection Guidelines; is.11). Moscow, Energiya Publ., 1979, 152 p.

E-mail: asel@rgups.ru (N. A. Popova)

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy I. ZHARKOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Nataliya A. POPOVA,
Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Evgeniy P. FIGURNOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Received 29.10.2018
Revised 19.11.2018
Accepted 14.01.2019