

К выбору вида схемы замещения тяговой подстанции при расчете токов короткого замыкания в системе электроснабжения 25 кВ

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

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

Аннотация. При вычислении токов короткого замыкания в тяговой сети учитывается входное сопротивление тяговой подстанции на основании схемы замещения системы внешнего электроснабжения. Традиционно эквивалентная схема замещения трехфазной системы имеет вид звезды, в которой результирующие сопротивления в каждой фазе включены последовательно с источником фазной электродвижущей силы, а эти источники имеют общую точку. При схеме замещения в виде треугольника в каждой его стороне результирующие сопротивления включены последовательно с источником линейной электродвижущей силы. Важно отметить, что ни тот, ни другой вид схемы замещения не определяются схемой соединения обмоток трансформатора тяговой подстанции и следует лишь учесть отсутствие цепи для токов нулевой последовательности.

Если составляющие схем замещения приведены к одной ступени напряжения, то сопротивления в схеме замещения в виде треугольника имеют значения в три раза больше, чем в схеме замещения в виде звезды, а входные сопротивления тяговой подстанции для той и другой схемы замещения абсолютно одинаковы. Поэтому схема замещения в виде треугольника при расчете коротких замыканий в тяговой сети не имеет преимуществ по сравнению с традиционной схемой замещения в виде звезды.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения; короткие замыкания; система внешнего электроснабжения; схема замещения, входные сопротивления тяговых подстанций; линейные токи

Введение. При вычислении токов короткого замыкания в тяговой сети необходимы сведения не только о схеме питания и сопротивлениях этой сети, но и о входном сопротивлении тяговой подстанции, которое рассчитывается с учетом сопротивления трансформатора и питающей системы внешнего электроснабжения. Упрощенная схема замещения тяговой сети при коротком замыкании приведена на рис. 1. Вычисление сопротивлений тяговой сети (ТС) подробно описано в [1, 2]. Сопротивления трансформаторов тяговых подстанций и питающих их систем внешнего электроснабжения входят составной частью в сопротивления $Z_{н,А}$ и $Z_{н,В}$, которые называют также входными сопротивлениями тяговых подстанций $Z_{вх}$. Входные сопротивления вычисляют на основании схем замещения системы электроснабжения (электроустановки) при корот-

ком замыкании. Сравнению таких схем замещения и посвящена настоящая статья.

Схемы и условные обозначения видов коротких замыканий и замыканий в электроустановках представлены в [3, Приложение 2 (справочное)]. Более подробно подобные схемы для различных видов коротких замыканий приведены, например, в [4, 5]. Такие схемы в трехфазном исполнении имеют вид звезды, в которой источники фазных электродвижущих сил (ЭДС) одним выводом соединены в общую точку, а к другому выводу каждого из источников присоединены последовательно фазные сопротивления элементов системы электроснабжения. Схема замещения в виде звезды удобна для вычисления токов симметричных и несимметричных коротких замыканий. Необходимые формулы для вычисления параметров таких схем замещения и токов короткого замыкания стандартизированы и приведены в [6]. Они использованы в [1, 2].

Трехфазная схема замещения в виде звезды для тяговой подстанции приведена на рис. 2, а. Значения ЭДС и сопротивлений должны быть приведены к ступени напряжения 27,5 кВ.

Короткое замыкание в ТС воспринимается трансформатором подстанции и системой внешнего электроснабжения как двухфазное. Обмотка трансформатора, питающая тяговую сеть, соединена в звезду, т. е. не имеет заземленной нулевой точки, поэтому и в схеме замещения на рис. 2, а нулевая точка не заземлена.

Возможен и другой вид трехфазной схемы замещения системы электроснабжения, а именно в виде треугольника, каждая из сторон которого содержит линейную ЭДС, а также соединенные с ней последовательно сопротивления системы внешнего электроснабжения и трансформатора. Такая схема использована в [7, 8] и является рекомендуемой (не обязательной) в [9]. Схема замещения в виде треугольника для тяговой подстанции приведена на рис. 2, б. Значения ЭДС и сопротивления тоже следует приводить к ступени напряжения 27,5 кВ.

Особо отметим, что индексы Y и Δ в данном случае относятся не к обмоткам трансформатора, а к трехфазным схемам замещения внешней системы электроснабжения.

■ E-mail: asel@rgups.ru (Н. А. Попова)

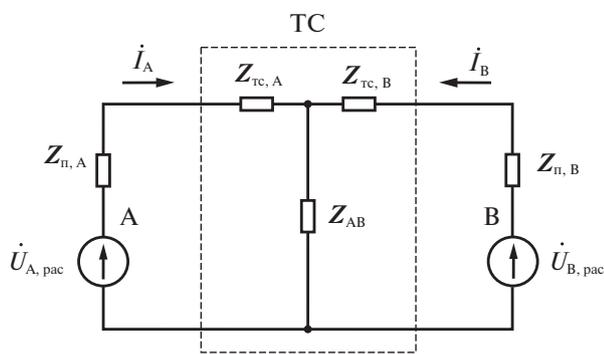


Рис. 1. Упрощенная схема замещения ТС при коротком замыкании:

$\dot{U}_{A, pac}, \dot{U}_{B, pac}$ — расчетные напряжения смежных тяговых подстанций А и В; $Z_{п, A}, Z_{п, B}$ — сопротивления тяговых подстанций с учетом внешней системы электроснабжения; \dot{i}_A, \dot{i}_B — искомые токи тяговых подстанций А и В при коротком замыкании ТС; $Z_{тс, A}, Z_{тс, B}, Z_{AB}$ — сопротивления Т-образной схемы замещения ТС при коротком замыкании

Fig. 1. Simplified equivalent circuit of the traction network (TN) in case of short circuit:

$\dot{U}_{A, pac}, \dot{U}_{B, pac}$ — rated voltages of adjacent traction substations А and В; $Z_{п, A}, Z_{п, B}$ — resistance of traction substations taking into account external power supply system; \dot{i}_A, \dot{i}_B — sought currents of traction substations А and В during a short circuit of the TN; $Z_{тс, A}, Z_{тс, B}, Z_{AB}$ — resistance of the T-shaped equivalent circuit of the TN during short circuit

троснабжения, соответственно на рис. 2, а и рис. 2, б. При этом для вычисления сопротивлений $Z_{т, Y}$ и $Z_{т, \Delta}$ не требуется сведений о схеме соединений обмоток трансформатора. При необходимости отнести какие-либо величины к обмоткам трансформатора следует применять индексы Y и Δ .

Использование в различных литературных источниках разных схем замещения системы электроснабжения, включая и тяговый трансформатор, привело к расхождению во мнениях и ошибочным оценкам, содержащимся, например, в [7, 8].

В частности, неоправданно утверждается, что расчеты входного сопротивления тяговой подстанции по известной методике [1] отличаются от предложенной в [7] в три раза, в то время как рекомендуемая для расчета формула (6) в [7] аналогична приведенной в [1]. В [8] трехфазная схема замещения системы электроснабжения в виде треугольника отождествляется со схемой соединения обмоток трансформатора Y/ Δ , а схема замещения этой системы в виде звезды — со схемой соединения обмоток трансформатора Y/Y, хотя вид трехфазной схемы замещения системы электроснабжения вообще не зависит от схемы соединения обмоток трансформатора, а трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y в системах электроснабжения для тяги не применяются.

Для исключения имеющихся расхождений в статье рассмотрены условия формирования схем замещения системы внешнего электроснабжения при коротком замыкании в ТС, даны сравнение этих схем и расче-

ты входного сопротивления. Кроме того, приведены сведения о распределении тока короткого замыкания по первичной и вторичной обмоткам трансформатора со схемой соединения Y/ Δ –11, необходимые для выбора уставок релейной защиты.

Сопротивление схем замещения. Комплексные значения сопротивлений выделены жирным шрифтом. Особо подчеркнем, что параметры всех элементов в любой схеме замещения должны быть приведены к единым базисным условиям. Сопротивление Z замкнутой накоротко одной фазы трехфазной электроустановки может быть представлено в виде

$$Z = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{I}_\phi}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где \dot{U}_ϕ — приложенное к фазе элемента фазное напряжение, кВ; \dot{I}_ϕ — фазный ток в этом сопротивлении, кА.

Значение Z принято определять не через фазные, а через линейные напряжение и ток. Если рассматриваемый трехфазный элемент системы электроснабжения входит в трехфазную схему замещения, изображенную на рис. 2, а в виде звезды (линейное напряжение $U = \sqrt{3}U_\phi$, линейный ток $I = I_\phi$), то для сопротивления его одной фазы вместо (1) получаем

$$Z_Y = \frac{U}{\sqrt{3}I} = \frac{U^2}{S}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где S — мощность трех фаз элемента, МВ·А.

Если аналогичный элемент системы входит в трехфазную схему замещения, изображенную на рис. 2, б в виде треугольника ($U = U_\phi, I = I_\phi / \sqrt{3}$), причем соблюдается условие, что линейное напряжение U и мощность S трех фаз треугольника остаются теми же, что и для звезды, то для сопротивления одной фазы (стороны) треугольника вместо (1) получим

$$Z_\Delta = \frac{\sqrt{3}U}{I} = \frac{3U}{\sqrt{3}I} = \frac{3U^2}{S}, \text{ Ом}. \quad (3)$$

Таким образом, при одинаковых базисных условиях (одинаковых U и одинаковых S) сопротивление Z_Δ одной фазы какого-либо элемента системы электроснабжения в трехфазной схеме замещения, изображенной в виде треугольника, в три раза больше, чем сопротивление Z_Y одной фазы аналогичного элемента в схеме замещения, изображенной в виде звезды:

$$Z_\Delta = 3Z_Y. \quad (4)$$

Это правило относится к сопротивлениям, выраженным как в именованных, так и в относительных единицах. Например, в схеме замещения системы электроснабжения в виде звезды, все сопротивления которой приведены к напряжению основной ступени ($U = U_{осн}$, кВ), сопротивление фазы Z_t трансформатора вычисляют по формуле [5, 6]:

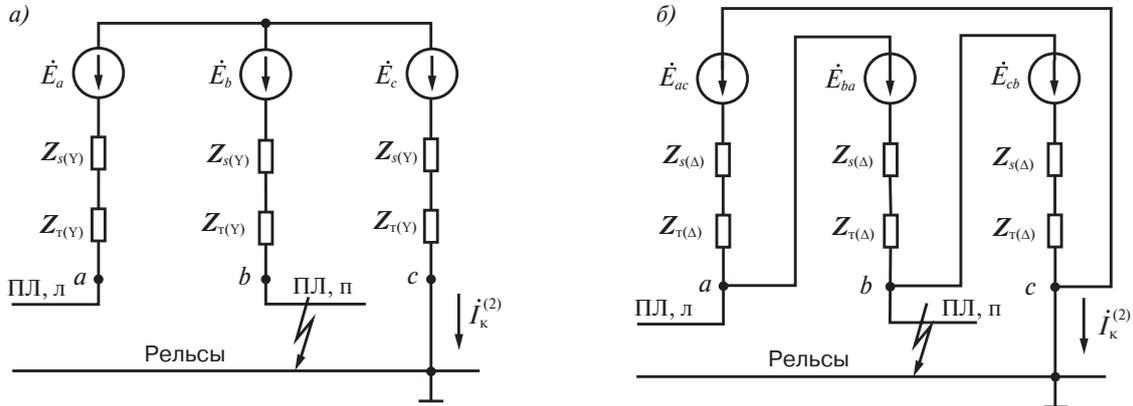


Рис. 2. Трехфазные схемы замещения системы внешнего электроснабжения тяговой подстанции при коротком замыкании на выводах, питающих ТС:

a – в виде звезды: $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ – источники фазных ЭДС; $Z_s = Z_{s,Y}$ – результирующее сопротивление одной фазы системы внешнего электроснабжения; $Z_r = Z_{r,Y}$ – сопротивление одной фазы трансформатора тяговой подстанции, для вычисления которого не требуется сведений о схеме соединений его обмоток; $i_k^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания; ПЛ, л, ПЛ, п – питающие линии левого и правого плеч питания контактной сети соответственно; *b* – в виде треугольника: $\dot{E}_{ac}, \dot{E}_{ba}, \dot{E}_{cb}$ – источники линейных ЭДС; Z_s, Z_r – результирующие сопротивления системы внешнего электроснабжения и сопротивления трансформатора, включенные в каждую из сторон треугольника, соответственно

Fig. 2. Three-phase equivalent circuits of external power supply system of the traction substation with a short circuit at the terminals supplying the TN: *a* – in the form of a star: $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ – sources of phase EMF; $Z_s = Z_{s,Y}$ – resulting resistance of one phase of the external power supply system; $Z_r = Z_{r,Y}$ – resistance of one phase of the transformer of the traction substation, for calculation of which no information is required on the connection diagram of its windings; $i_k^{(2)}$ – current of a two-phase short circuit; ПЛ, л, ПЛ, п – supply lines of left and right arms of the contact network, respectively; *b* – in the form of a triangle: $\dot{E}_{ac}, \dot{E}_{ba}, \dot{E}_{cb}$ – sources of linear EMF; Z_s, Z_r – resulting resistances of the external power supply system and transformer resistances included on each side of the triangle, respectively

$$Z_{r,Y} = j \frac{u_{k(ном)}^2 U_{очн}^2}{100 S_{т,ном}}, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где $u_{k(ном)}$ – номинальное (паспортное) значение напряжения короткого замыкания, %; $S_{т,ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

В схеме замещения системы электроснабжения, изображенной в виде треугольника, на основании (4) получаем $Z_{r,\Delta} = 3Z_{r,Y}$. Обратим внимание, что при вычислении сопротивления фазы трансформатора для схем замещения системы электроснабжения при коротком замыкании не требуются сведения о схеме соединения обмоток самого трансформатора.

Если для какого-либо узла удаленной трехфазной системы электроснабжения известны ток $I_k^{(3)}$ или мощность $S_k^{(3)}$ трехфазного короткого замыкания, то приведенное сопротивление фазы $Z_{s,Y}$ удаленной части схемы замещения системы электроснабжения, изображенной в виде звезды (рис. 2, *a*), согласно [6] вычисляются по формуле

$$Z_{s,Y} = j \frac{U_N}{\sqrt{3} I_k^{(3)}} \left(\frac{U_{очн}}{U_N} \right)^2 = j \frac{U_{очн}^2}{S_k^{(3)}}, \text{ Ом}, \quad (6)$$

где U_N – номинальное линейное напряжение, кВ, той ступени, для которой известны $I_k^{(3)}$ и $S_k^{(3)}$.

Для схемы замещения в виде треугольника (рис. 2, *b*) на основании (4) имеем $Z_{s,\Delta} = 3Z_{s,Y}$.

Входное сопротивление тяговой подстанции. Модуль тока $I_k^{(2)}$ двухфазного короткого замыкания на выводах *bc* замещения системы внешнего электроснабжения, изображенной в виде звезды (рис. 2, *a*), равен

$$i_k^{(2)} = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_b}{2(Z_s + Z_r)} = \frac{\dot{E}_{cb}}{2(Z_s + Z_r)} = \frac{\dot{U}_{очн}}{Z_{вх}^{(2)}}, \text{ кА}, \quad (7)$$

где \dot{E}_c, \dot{E}_b – фазные ЭДС источников питания, кВ; \dot{E}_{cb} – приведенная линейная ЭДС того же источника питания, кВ; $Z_{вх}^{(2)}$ – входное сопротивление тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании, Ом.

Аналогичное выражение получим при замыкании точек *a* и *c*. Знаменатель выражения (7) и является так называемым входным сопротивлением тяговой подстанции $Z_{вх}^{(2)}$ при двухфазном коротком замыкании, которое на рис. 1 обозначено $Z_{п} = Z_{п,А}$ для тяговой подстанции А и $Z_{п} = Z_{п,В}$ для тяговой подстанции В. С учетом выражений (5) и (6) имеем

$$Z_{вх}^{(2)} = Z_{п} = 2(Z_{s,Y} + Z_{r,Y}) = j2U_{очн}^2 \left(\frac{1}{S_k^{(3)}} + \frac{u_{k(ном)}}{100S_{т,ном}} \right), \text{ Ом}. \quad (8)$$

Если на тяговой подстанции включено в работу параллельно *n* однотипных трансформаторов, то в выражении (8) необходимо сопротивление $Z_{r,Y}$ разделить, а мощность $S_{т,ном}$ умножить на *n*. Такая зависимость использована в [1, 2], и никакой ошибки в сомножителе 2, как отмечалось в [7], здесь нет по определению.

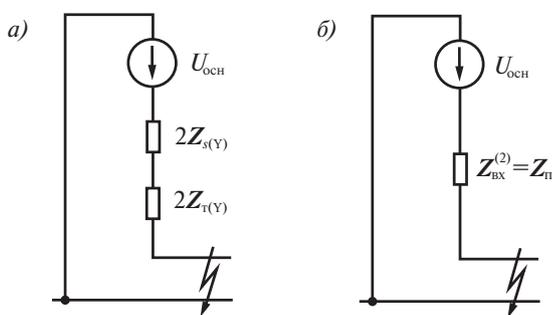


Рис. 3. Результирующие схемы замещения тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании: а — для системы внешнего электроснабжения в виде звезды (рис. 2, а); б — для системы внешнего электроснабжения (рис. 1).
Fig. 3. Resulting equivalent circuit traction substation with a two-phase short circuit: а — for external power supply system in the form of a star (fig. 2, а); б — for external power supply system (fig. 1)

Выражениям (7) и (8) соответствуют результирующие схемы замещения тяговых подстанций при двухфазном коротком замыкании ТС, приведенные на рис. 3, а и 3, б. Схема замещения, соответствующая рис. 3, б, использована на рис. 1.

Модуль тока $\dot{I}_k^{(2)}$ двухфазного короткого замыкания на выводах *bc* схемы замещения системы внешнего электроснабжения, изображенной в виде треугольника (рис. 2, б), равен

$$\begin{aligned} \dot{I}_k^{(2)} &= \frac{\dot{E}_{cb}}{Z_{s,\Delta} + Z_{т,\Delta}} - \frac{\dot{E}_{ac} - \dot{E}_{ba}}{2(Z_{s,\Delta} + Z_{т,\Delta})} = \\ &= \frac{\dot{E}_{cb} + \dot{E}_{cb}}{2(Z_{s,\Delta} + Z_{т,\Delta})} = \frac{3\dot{E}_{cb}}{2(Z_{s,\Delta} + Z_{т,\Delta})}, \text{ кА.} \end{aligned} \quad (9)$$

Принимая, что $\dot{E}_{cb} = U_{очн}$, $Z_{s,\Delta} = 3Z_{s,Y}$, $Z_{т,\Delta} = 3Z_{т,Y}$, получаем из (9) с учетом (5) и (6) следующее выражение:

$$\begin{aligned} Z_{вх}^{(2)} = Z_n &= \frac{\dot{E}_{cb}}{\dot{I}_k^{(2)}} = \frac{2}{3}(Z_{s,\Delta} + Z_{т,\Delta}) = 2(Z_{s,Y} + Z_{т,Y}) = \\ &= j2U_{очн}^2 \left(\frac{1}{S_k^{(3)}} + \frac{u_{к(ном)}}{100S_{т,ном}} \right), \text{ Ом,} \end{aligned} \quad (10)$$

что совпадает с (8) для схемы замещения энергосистемы в виде звезды.

Таким образом, множитель $2/3$ используют только в том частном случае, если $Z_{вх}^{(2)}$ вычисляют для схемы замещения энергосистемы в виде треугольника при $Z_{s,\Delta} = 3Z_{s,Y}$, $Z_{т,\Delta} = 3Z_{т,Y}$. Если же для вычисления $Z_{вх}^{(2)}$ используют значения сопротивлений элементов системы электроснабжения $Z_{s,Y}$, $Z_{т,Y}$, определяемых по ГОСТ [6], то применяют множитель 2, как это сделано в [1, 2] и как это следует из (10). Такой же вывод, по существу, следует из [7, формула (6)].

Сравнение схем замещения. Из сравнения выражений (8) и (10) следует, что входное сопротивление тяговой подстанции, вычисляемое по формуле (8), и ее результирующая схема замещения (рис. 3) не зависят от

принятой формы схемы замещения трехфазной системы электроснабжения при коротком замыкании ТС: и для схемы в виде звезды, и для схемы в виде треугольника они одинаковы. Такой же вывод содержится в [8].

В этих условиях выбор схемы замещения в виде звезды или в виде треугольника представляется произвольным. Традиционно короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ вычисляют в соответствии с методикой, приведенной в [6, 10], в которой схема замещения трехфазной системы представлена в виде звезды [1, 2, 3, 4, 5]. Каких-либо преимуществ при вычислении токов короткого замыкания схема замещения в виде треугольника не дает. Более того, при формировании схемы замещения в виде треугольника для определения сопротивлений элементов системы электроснабжения используются те же формулы, что и для схемы замещения в виде звезды [6, 10], результаты вычисления по которым, однако, для треугольника необходимо утраивать. При вычислении же искомых токов короткого замыкания, для чего и составляется схема замещения, эти утроенные значения сопротивлений снова надо делить на три. Бессмысленность такой операции очевидна.

Представляется, что трехфазная схема замещения системы электроснабжения при коротких замыканиях, имеющая вид треугольника, может быть полезной, по-видимому, лишь в каких-то особых специфических случаях.

Линейные токи на первичной и вторичной сторонах трансформатора Y/Δ-11. Для защиты от коротких замыканий трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11, используемого на тяговых подстанциях системы переменного тока 27,5 кВ, необходимо знать распределение линейных токов на первичной и вторичной обмотках при коротком замыкании на его выводах (рис. 4, а). Схемы замещения системы электроснабжения ни в виде звезды, ни в виде треугольника таких сведений в полной мере не дают, поскольку определяемые в них токи являются реальными только для ступени напряжения, выбранной в качестве основной [10]. Для решения задачи могут быть использованы известные соотношения [11], из которых можно получить:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a(Y)} &= \frac{\dot{I}_{a(\Delta)} - \dot{I}_{c(\Delta)}}{k_T \sqrt{3}}, \quad \dot{I}_{b(Y)} = \frac{\dot{I}_{b(\Delta)} - \dot{I}_{a(\Delta)}}{k_T \sqrt{3}}, \\ \dot{I}_{c(Y)} &= \frac{\dot{I}_{c(\Delta)} - \dot{I}_{b(\Delta)}}{k_T \sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\dot{I}_{a(Y)}, \dot{I}_{b(Y)}, \dot{I}_{c(Y)}$ — линейные токи фаз первичной обмотки трансформатора, соединенной в звезду; $\dot{I}_{a(\Delta)}, \dot{I}_{b(\Delta)}, \dot{I}_{c(\Delta)}$ — линейные токи вторичной обмотки трансформатора, соединенной в треугольник; k_T — коэффициент трансформации, равный отношению междуфазных напряжений первичной $U_{(Y)}$ и вторичной $U_{(\Delta)}$ сторон трансформатора ($k_T = U_{(Y)} / U_{(\Delta)}$).

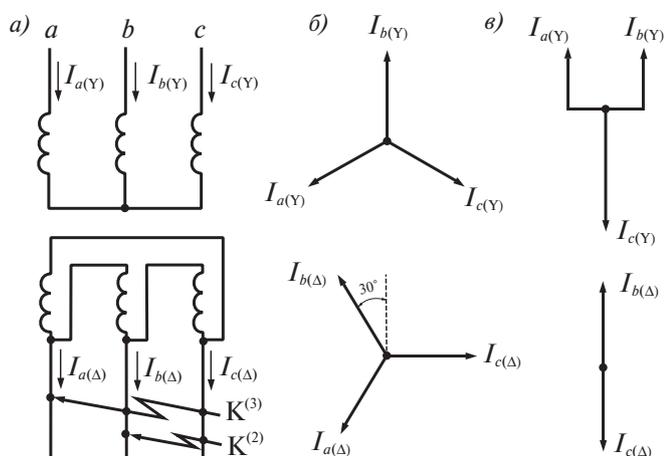


Рис. 4. Трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/\Delta-11$ (а) и векторные диаграммы токов при трехфазном $K^{(3)}$ (б) и двухфазном $K^{(2)}$ (в) коротком замыкании
 Fig. 4. Transformer with winding connection diagram $Y/\Delta-11$ (a) and vector current diagrams for three-phase $K^{(3)}$ (б) and two-phase $K^{(2)}$ (в) short circuits

При близких трехфазных коротких замыканиях $K^{(3)}$ на основании (11) имеем

$$I_{a(Y)} = I_{b(Y)} = I_{c(Y)} = \frac{I_k^{(3)}}{k_T} = \frac{U_{осн}}{\sqrt{3}Z_{рез}k_T}, \quad (12)$$

где $Z_{рез} = Z_{вх} = Z_s + Z_T$ — результирующее сопротивление фазы эквивалентной схемы замещения системы электроснабжения.

Векторы токов $\dot{I}_{a(Y)}, \dot{I}_{b(Y)}, \dot{I}_{c(Y)}$ при трехфазном коротком замыкании отстают от соответствующих векторов тока $\dot{I}_{a(\Delta)}, \dot{I}_{b(\Delta)}, \dot{I}_{c(\Delta)}$ на 30° (рис. 4, б).

При двухфазных коротких замыканиях $K^{(2)}$, например, между фазами b и c имеем: $I_{a(\Delta)} = 0, \dot{I}_{b(\Delta)} = -\dot{I}_{c(\Delta)} = \dot{I}_K^{(2)}$.

Подставив эти значения в (11), получим (см. рис. 4, в)

$$\dot{I}_{a(Y)} = \frac{\dot{I}_K^{(2)}}{k_T\sqrt{3}}; \dot{I}_{b(Y)} = \frac{\dot{I}_K^{(2)}}{k_T\sqrt{3}}; \dot{I}_{c(Y)} = \frac{2\dot{I}_K^{(2)}}{k_T\sqrt{3}}. \quad (13)$$

Выводы. 1. Эквивалентную трехфазную схему замещения питающей схемы электроснабжения совместно с трансформатором тяговой подстанции возможно представить и традиционно в виде звезды с изолированной нулевой точкой, и в виде треугольника вне зависимости от того, какую схему соединения обмоток имеет этот трехфазный трансформатор.

2. При одинаковых базисных условиях в схеме замещения в виде треугольника в каждой из его сторон ЭДС источников питания должны быть в $\sqrt{3}$ раз, а сопротивления элементов системы электроснабжения в три раза больше, чем соответственно ЭДС и сопротивления аналогичных элементов в каждой из фаз схемы замещения в виде звезды. Результирующее же сопротивление для обеих схем замещения (входное сопротивление тяговой подстанции) имеет совершенно одинаковое значение.

Поэтому для получения конкретного результирующего значения тока короткого замыкания тяговой сети возможен выбор любой из схем замещения питающей системы: результаты будут одинаковы.

3. Схема замещения системы внешнего электроснабжения в виде треугольника при вычислении коротких замыканий не имеет каких-либо преимуществ по сравнению с традиционной схемой замещения в виде звезды, но требует усложнения расчетов, особенно при использовании метода симметричных составляющих.

4. Приведены формулы для вычисления линейных токов первичной обмотки силовых трансформаторов тяговых подстанций со схемой обмоток Y/Δ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие материалы по релейной защите систем тягового электроснабжения: утв. ОАО «РЖД» от 4 фев. 2004 г. М.: Трансиздат, 2005. 216 с.
2. Фигурнов Е. П. Релейная защита. Учебник 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. ГОСТ 26522–85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения: введ. 01.07.1986. М.: Изд-во стандартов, 1987. 19 с.
4. Басс Э. И., Дорогунцев В. Г. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие / под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 296 с.
5. Тяговые подстанции: учеб. для вузов / Ю. М. Бей [и др.]. М.: Транспорт, 1986. 319 с.
6. ГОСТ Р 52735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Стандартиформ, 2007. 38 с.
7. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 329–335. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335>.
8. Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием / Л. А. Герман [и др.] // Электричество. 2019. № 5. С. 19–23.
9. ГОСТ Р 57670–2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров: введ. 01.05.2018. М.: Стандартиформ, 2017. 90 с.
10. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.; Л.: Энергия, 1964. 704 с.
11. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1976. 570 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИГУРНОВ Евгений Петрович,

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

ЖАРКОВ Юрий Иванович,

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

ПОПОВА Наталья Андреевна,

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

Статья поступила в редакцию 10.09.2019 г., актуализирована 16.10.2019 г., 14.02.2020 г., принята к публикации 26.02.2020 г.

.....

Для цитирования: Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Попова Н. А. К выбору вида схемы замещения тяговой подстанции при расчете токов короткого замыкания в системе электроснабжения 25 кВ // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 3. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-139-144>.

Choosing the type of equivalent circuit of traction substation when calculating short-circuit currents in 25 kV power supply system

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

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

Abstract. When calculating short circuit currents in the traction network, it is necessary to take into account the input resistance of the traction substation, including the resistance of the transformers of the substation and the resistance of the power supply system. The input resistance during short circuit is determined based on the equivalent circuit of the external power supply system, of which this traction substation is an integral part. Traditionally equivalent circuit of a three-phase system has the form of a star, in which the resulting resistances in each phase are connected in series with a source of phase electromotive force, and these sources have a common point. Another equivalent circuit in the form of a triangle is possible, in which on each side the resulting resistances are connected in series with the source of linear electromotive force. It is important to note that neither one nor the other type of equivalent circuit is determined by the connection scheme of the transformer windings of the traction substation. It is only necessary to take into account the absence of a circuit for zero sequence currents. All elements of the equivalent circuit, as is known, should be brought to uniform basic conditions. If the parameters of these elements are expressed in named units, then the basic values are the effective voltage values of the main stage and the rated power of the power transformer of the traction substation. If the components of one and the other equivalent circuits are reduced to one stage of the operating voltage, for example 27.5 kV, then for the same elements of the power supply system, the resistance values in the equivalent circuit in the form of a triangle are three times larger than in the equivalent circuit in the form of a star. In this case, the input resistances of the traction substation for the one and the other equivalent circuits are absolutely identical. Therefore, in the calculation of short circuit currents of the traction network, you can use any of these equivalent circuits of the power supply system and traction substation. Formulas for calculating the resistances of the elements of the power supply system and electrical installations, given in the standards, manuals and reference books, relate to the equivalent circuit of the short circuit in the form of a star. When using an equivalent circuit in the form of a triangle, these resistances must first be tripled, and then divided by three when calculating the short-circuit currents. The meaninglessness of such an operation is obvious. The equivalent circuit of the traction substation and the external power supply system in the form of a triangle when calculating short circuits in the traction network has no advantages compared to the traditional equivalent circuit in the form of a star. The information on the linear currents on the primary and secondary windings of the traction substation transformer during a short circuit in the traction network is given, which is necessary to select the settings of its relay protection kit.

Keywords: traction power supply system; short circuits; external power supply system; equivalent circuit; input resistance of traction substations; linear currents

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-139-144>

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

REFERENCES

1. *Guidance on the relay protection of traction power supply systems*. Approved by the Russian Railways dated February 4, 2004. Electrification and Power Supply Department of the JSC "Russian Railways". Moscow, Transizdat Publ., 2005, 216 p. (in Russ.).
2. Фигурнов Е. П. *Relay protection*. Reference book for high schools. In 2 vol., Part 2, 3rd ed. reworked and edited. Moscow, GOU "Educational-methodical center for education in railway transport", 2009, 604 p.
3. GOST 26522–85. *Short circuits in electrical installations. Terms and definitions*. Moscow, Publishing house of standards, 1987, 19 p. (in Russ.).
4. D'yakov A. F., Bass E. I., Doroguntsev V. G. *Relay protection of electric power systems*. Reference book. Moscow, MEI Publ., 2002, 296 p.
5. Bey Yu. M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. *Traction substations*. Reference book for universities. Moscow, Transport Publ., 1986, 319 p.
6. GOST R 52735–2007. *Short circuits in electrical installations. Calculation methods in electrical installations of alternating current voltage above 1 kV*. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 38 p. (in Russ.).
7. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Calculation methodology of current distribution in traction networks of AC current*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 6, pp. 329–335. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335>.
8. German L. A., Serebryakov A. S., Loskutov A. B., Osokin V. L., Subkhanverdiev K. S. *Calculation of short circuit currents in a traction network with two-way power*. Elektrichestvo, 2019, no. 5, pp. 19–23.
9. GOST R 57670–2017. *Rail traction power systems. Methodology for choosing the main parameters*. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 90 p. (in Russ.).
10. Ul'yanov S. A. *Electromagnetic transients in electrical systems*. Moscow, Energiya Publ., 1964, 704 p.
11. Fedoseev A. M. *Relay protection of electrical systems*. Reference book for universities. Moscow, Energiya Publ., 1976, 570 p.

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy P. FUGURNOV,

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

Yuriy I. ZHARKOV,

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

Natal'ya A. POPOVA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department "Automated electric power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Received 10.09.2019

Revised 16.10.2019, 14.02.2020

Accepted 26.02.2020

For citation: Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Попова Н. А. Choosing the type of equivalent circuit of traction substation when calculating short-circuit currents in 25 kV power supply system. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (3): 139–144 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-139-144>.