

Расчет специфических режимов работы релейной защиты тяговых сетей переменного тока

К. С. СУБХАНВЕРДИЕВ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Релейная защита тяговых сетей от токов короткого замыкания на участках переменного тока должна обладать как селективностью, так и быстродействием. Однако на участках с наиболее высокой вероятностью пережога контактных проводов при коротком замыкании для повышения быстродействия вынужденно поступаются селективностью. Такие режимы работы релейной защиты в тяговой сети являются специфическими. Автором рассматривается один из таких режимов, а именно работа дистанционных защит с увеличенной зоной действия ступени без выдержки времени при частично-неселективной системе защиты, обеспечивающая максимально быстрое отключение повреждения в пределах всей защищаемой зоны. Вместе с тем указывается, что увеличение зоны действия ступени без выдержки времени до размеров защищаемого участка может стать причиной неселективных отключений ряда выключателей при повреждении вблизи тяговых подстанций или поста секционирования. Поэтому предлагается подобрать оптимальную величину настраиваемой зоны неселективного действия защит, при которой вероятность неселективных отключений выключателей будет минимальной. Для этого автором представлено аналитическое решение данной задачи, позволяющее автоматизировать вычисления при формировании предложений по настройке защит в специфическом режиме работы. Отмечается, что путем подбора в формулах значения коэффициента чувствительности можно настроить зону неселективного действия дистанционных защит так, что ее реальная величина будет приближаться к размерам защищаемого участка, оставаясь при этом строго больше его, что позволит исключить опасность пережога контактных проводов при коротком замыкании и уменьшить вероятность неселективных отключений выключателей на участке.

Ключевые слова: переменный ток; тяговая сеть; специфические режимы; дистанционная защита; зона неселективности; настройка защит

Введение. Релейная защита тяговых сетей от токов короткого замыкания (КЗ) на участках переменного тока должна обладать как селективностью, так и быстродействием [1].

Однако имеют место специфические режимы работы защиты, когда вынужденно поступаются селективностью для повышения быстродействия. Таким режимам отдается предпочтение, как правило, на участках с повышенной вероятностью пережога контактных проводов при КЗ [2, 3].

Рассмотрим один из таких режимов, а именно работу дистанционных защит с увеличенной зоной действия ступени без выдержки времени при частично-

неселективной системе защиты, обеспечивающей максимально быстрое отключение повреждения в пределах всей защищаемой зоны.

Очевидно, что увеличение зоны действия ступени без выдержки времени до размеров защищаемого участка может стать причиной неселективных отключений ряда выключателей при повреждении вблизи тяговых подстанций или поста секционирования.

Это происходит в том числе из-за влияния, которое оказывает значение тока КЗ на величину уставки. Так, вследствие взаимодействия токов КЗ в контактных сетях параллельных путей реальная величина зоны неселективного действия дистанционных защит существенно меньше настраиваемой длины участка, выходящего за пределы защищаемой зоны.

Следовательно, для снижения числа неселективных отключений выключателей требуется подобрать оптимальную величину настраиваемой зоны неселективного действия защит, при которой вероятность ложных отключений выключателей будет минимальной.

Аналитическое решение. В исследованиях [4] и [5] для решения аналогичной задачи был принят графоаналитический способ. Покажем аналитическое решение этой задачи, что позволит автоматизировать вычисления при формировании предложений по настройке защит в специфическом режиме работы.

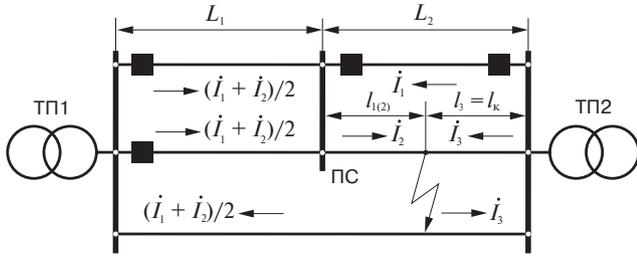
Произведем вывод основных формул применительно к расчетной схеме (см. рисунок) для случая, характеризующего условия, складывающиеся в первый момент времени после возникновения КЗ, когда ни один из выключателей питающих линий не отключился.

Уставка ступени без выдержки времени дистанционных защит выключателей тяговой подстанции I для рассматриваемого двухпутного участка определяется из выражения

$$Z_{c31} = K_q 2z_{22}L_1, \quad (1)$$

где K_q — коэффициент чувствительности; z_{22} — удельное сопротивление тяговой сети двухпутного участка при включенной в работу контактной сети обоих путей и равных по величине и направлению токах в их подвесках, Ом/км; L_1 — расстояние от тяговой подстанции I до поста секционирования.

■ E-mail: kamilsub@mail.ru (К. С. Субханвердиев)



Расчетная схема межподстанционной зоны тяговой сети: ТП1, ТП2 — тяговые подстанции 1 и 2; ПС — пост секционирования; L_1, L_2 — расстояния от тяговых подстанций 1 и 2 до поста секционирования, км; l_k — расстояние от тяговой подстанции 2 до места КЗ, км; $l_{1(2)}$ и l_3 — длины зон неселективного действия дистанционной защиты выключателей тяговой подстанции 1 (2) и поста секционирования соответственно, км; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ — токи КЗ в ветвях схемы, А

Design diagram of the traction network inter-substation zone: ТП1, ТП2 — traction substations 1 and 2; ПС — sectioning post; L_1, L_2 — distances from traction substations 1 and 2 to the sectioning post, km; l_k — distance from traction substation 2 to the place of short circuit, km; $l_{1(2)}$ and l_3 — lengths of zones of non-selective action of distance protection of switches of traction substation 1 (2) and sectioning post respectively, km; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ — short-circuit currents in the branches of the circuit, A

При этом сопротивление, измеряемое защитой выключателей тяговой подстанции 1, может быть найдено по формуле

$$Z_1 = \frac{2 \left(U_{12} - \frac{2}{3} \dot{I}_3 Z_{s12} \right)}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2} - \frac{4}{3} (Z_{s12} + Z_{s1} + Z_{r1}), \quad (2)$$

где U_{12} — расчетное напряжение сети энергосистемы, приведенное к ступени 27,5 кВ, кВ; Z_{s1} — собственное сопротивление узла тяговой подстанции 1 эквивалентной схемы сети энергосистемы, Ом; Z_{s12} — взаимное сопротивление между узлами тяговых подстанций 1 и 2 эквивалентной схемы сети энергосистемы, Ом; Z_{r1} — сопротивление фазы трансформатора тяговой подстанции 1, Ом.

Тогда, подставив в формулу (2) аналитические выражения для токов, полученные из системы уравнений равновесия для схемы (см. рисунок) [6], и приравняв ее правую часть с правой частью выражения (1), после некоторых преобразований получим квадратное уравнение с независимой переменной l_k :

$$2rl_k^2 + (2p - m_1)l_k + (2s - n_1) = 0, \quad (3)$$

где

$$m_1 = (2a_2 - c_2)(b_1 - b_2); \quad (4)$$

$$n_1 = b_1(2c_1 - 2a_1 + a_3) + 2b_2(c_1 - b_3); \quad (5)$$

$$p = a_2k(a_3 + 2b_3 - 2a_1) + 2c_2k(c_1 - b_3); \quad (6)$$

$$r = 2a_2k(a_2 - c_2) + c_3k(a_1 + b_3 - 2c_1); \quad (7)$$

$$s = b_3k(a_3 - 2a_1) + 2kc_1^2, \quad (8)$$

где

$$k = U_{12}; \quad (9)$$

$$a_1 = \frac{2}{3}(Z_{s12} + Z_{s1} + Z_{r1}) + z_{22}L_1 + z_{21}L_2 + Z_3; \quad (10)$$

$$a_2 = z_{21}; \quad (11)$$

$$a_3 = z_{-12}L_2; \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{4}{3}U_{12}Z_{s12}; \quad (13)$$

$$b_2 = U_{12} \left[\frac{4}{3}(Z_{s12} + Z_{s1} + Z_{r1}) + K_q 2z_{22}L_1 \right]; \quad (14)$$

$$b_3 = \frac{2}{3}(Z_{s12} + Z_{s2} + Z_{r2}) + Z_3; \quad (15)$$

$$c_1 = \frac{2}{3}Z_{s12} + Z_3; \quad (16)$$

$$c_2 = z_{-12}; \quad (17)$$

$$c_3 = \frac{z_{-12}}{L_2}, \quad (18)$$

где z_{21} — удельное сопротивление тяговой сети одного пути двухпутного участка при отключенной контактной сети другого пути, Ом/км; z_{-12} — удельное сопротивление тяговой сети одного пути двухпутного участка при включенной в работу контактной сети обоих путей и равных по величине, но противоположных по направлению токам в их подвесках, Ом/км; Z_{s2} — собственное сопротивление узла тяговой подстанции 2 эквивалентной схемы сети энергосистемы, Ом; Z_{r2} — сопротивление фазы трансформатора тяговой подстанции 2, Ом; Z_3 — эквивалентное сопротивление в месте КЗ, Ом.

Значения удельных сопротивлений для различного вида контактной сети и контактных подвесок представлены, например, в [7, 8].

Решением полученного уравнения (3) будет

$$l_k = \left| \frac{m_1 - 2p}{4r} - \sqrt{\frac{(2p - m_1)^2 - 8r(2s - n_1)}{16r^2}} \right|. \quad (19)$$

Таким образом, формула для определения реальной величины зоны неселективного действия дистанционных защит выключателей тяговой подстанции 1 (см. рисунок), т. е. длины участка, выходящего за пределы защищаемой зоны, будет следующей:

$$l_1 = L_2 - l_k, \quad (20)$$

или

$$l_1 = L_2 - \left| \frac{m_1 - 2p}{4r} - \sqrt{\frac{(2p - m_1)^2 - 8r(2s - n_1)}{16r^2}} \right|. \quad (21)$$

Выполнив аналогичные действия относительно защит выключателей неповрежденных питающих линий

тяговой подстанции 2 и поста секционирования, рассматриваемых на расчетной схеме (см. рисунок), получим выражения для определения длин реальных зон неселективного действия защит указанных выключателей:

- для защиты выключателя тяговой подстанции 2

$$l_2 = L_2 - \left| \frac{m_2 - p}{2r} - \sqrt{\frac{(p - m_2)^2 - 4r(s - n_2)}{4r^2}} \right|, \quad (22)$$

где

$$m_2 = c_4(d_1 + d_2)(2c_1 - a_1 - b_3) + (d_1 - d_2 + 2d_3)a_2 + (d_2 - d_3)c_2; \quad (23)$$

$$n_2 = (d_1 - d_2)(b_3 - c_1) + d_3(2c_1 - 2a_1 + a_3), \quad (24)$$

где

$$c_4 = \frac{1}{L_2}; \quad (25)$$

$$d_1 = U_{12} \left[K_{\text{ч}} 2z_{22} L_2 - \frac{2}{3} Z_{s12} \right]; \quad (26)$$

$$d_2 = \frac{2}{3} U_{12} Z_{s12}; \quad (27)$$

$$d_3 = \frac{2}{3} U_{12} (Z_{s12} + Z_{s2} + Z_{r2}); \quad (28)$$

- для защиты выключателя поста секционирования

$$l_3 = l_{\text{к}} = \left| \frac{m_3 - p}{2r} - \sqrt{\frac{(p - m_3)^2 - 4r(s - n_3)}{4r^2}} \right|, \quad (29)$$

где

$$m_3 = c_4(f_1 + f_2)(a_1 + b_3 - 2c_1) + (2f_3 - f_1 - f_2)a_2 + (f_2 - f_3)c_2; \quad (30)$$

$$n_3 = (f_1 - f_2)(c_1 - b_3) + f_3(2c_1 - 2a_1 + a_3), \quad (31)$$

где

$$f_1 = U_{12} \left[K_{\text{ч}} 2z_{22} L_2 + \frac{2}{3} \left(Z_{s12} + Z_{s1} + Z_{r1} + \frac{3}{2} z_{22} L_1 \right) \right]; \quad (32)$$

$$f_2 = \frac{2}{3} U_{12} \left(Z_{s12} + Z_{s1} + Z_{r1} + \frac{3}{2} z_{22} L_1 \right); \quad (33)$$

$$f_3 = \frac{2}{3} U_{12} Z_{s12}. \quad (34)$$

В результате, подбирая в полученных выражениях значения коэффициента чувствительности $K_{\text{ч}}$ в пределах от 1 до 1,15, можно настроить зону неселективного действия дистанционных защит так, что ее реальная величина будет приближаться к размерам защищаемого участка, оставаясь при этом строго больше его, что позволит исключить опасность пережога контактных проводов при КЗ и уменьшить

вероятность неселективных отключений выключателей на участке. Так, в [6] длина реальной зоны неселективного действия защит для случая на рисунке при коэффициенте чувствительности $K_{\text{ч}} = 1,15$ составила порядка 0,83–1,261 км в зависимости от мощности КЗ на вводах тяговых подстанций, питающих участок, и мощности их понижающих трансформаторов. Уменьшая в приведенных формулах коэффициент чувствительности, можно контролировать пределы изменения этой длины и тем самым значительно ее сократить, сохранив при этом длину реальной зоны неселективного действия строго больше длины защищаемого участка.

Заключение. Приведенное аналитическое решение задачи определения оптимальной величины настраиваемой зоны неселективного действия дистанционных защит поможет сформировать предложения по их настройке в рассмотренном режиме, гарантирующем минимальную повреждаемость контактной сети при минимальном количестве неселективных отключений выключателей, что, несомненно, будет способствовать повышению надежности работы системы тягового электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Петрова Т. Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 272 с.
2. Жарков Ю. И., Зайцев В. А., Кузнецов В. В. Об основных свойствах перспективной релейной защиты контактной сети переменного тока // Вопросы расчета, технической диагностики и автоматического управления систем электроснабжения: межвуз. темат. сб. тр. / ред. Е. П. Фигурнов. Ростов н/Д.: РИИЖТ, 1981. Вып. 162. С. 25–30.
3. Герман Л. А., Зимаков В. А. Совершенствование руководящих указаний по релейной защите тягового электроснабжения переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 25–28.
4. Пупынин В. Н. Определение зон действия защит фидеров 27,5 кВ подстанций и постов секционирования железных дорог переменного тока при узловой схеме питания // Труды МИИТ. М.: Транспорт, 1965. Вып. 199. С. 184–195.
5. Субханвердиев К. С. Частично-неселективная система защит контактной сети // Мир транспорта. 2014. № 5. С. 90–96.
6. Субханвердиев К. С. Разработка и совершенствование алгоритмов селективной и неселективной систем защиты тяговых сетей переменного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. М., 2018. 173 с.
7. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения / ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. 216 с.
8. СТО РЖД 07.021.4–2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. М., 2016. 136 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

СУБХАНВЕРДИЕВ Камиль Субханвердиевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика транспорта», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 26.12.2019 г., принята к публикации 20.04.2020 г.

Для цитирования: Субханвердиев К. С. Расчет специфических режимов работы релейной защиты тяговых сетей переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 4. С. 245–248. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-245-248>.

Calculation of specific operating modes of relay protection for AC traction networks

K. S. SUBKHANVERDIEV

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

Abstract. Relay protection of traction networks against short-circuit currents in alternating current sections should have both selectivity and speed. However, in areas with an increased probability of burnout of contact wires during a short circuit, selectivity is often put away to increase the speed of response. Such operating modes of relay protection in the traction network are specific. The author considers one of these modes, namely, the operation of distance protections with an increased step area without time delay with a partially non-selective protection system, which ensures the fastest possible shutdown of damage within the entire protected area. At the same time, it is indicated that an increase in the coverage area of a step without a time delay to the size of the protected area can cause non-selective tripping of a number of switches in case of damage near substations or a sectioning post. Therefore, it is proposed to select the optimal value of the tunable zone of non-selective protection action, at which the probability of non-selective tripping of switches will be minimal. For this, the author presents an analytical solution to this problem, which allows automating calculations when forming proposals for setting up protection in a specific operating mode. It is noted that by choosing the sensitivity coefficient value in the formulas, it is possible to adjust the zone of non-selective action of distance protections so that its real value will approach the size of the protected area, while remaining strictly larger than it, which will eliminate the danger of burnout of contact wires in case of a short circuit and reduce the probability non-selective disconnection of switches on the site.

Keywords: alternating current; traction network; specific modes; distance protection; non-selectivity zone; protection setting

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-245-248>

REFERENCES

1. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Petrova T. E. *Releynaya zashchita setey tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka. Ucheb. posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transporta* [Relay protection of AC traction power supply networks. Reference book for students of higher educational institutions of railway transport]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 272 p.
2. Zharkov Yu. I., Zaytsev V. A., Kuznetsov V. V., Figurnov E. P. *Ob osnovnykh svoystvakh perspektivnoy releynoy zashchity kontakt-noy seti peremennogo toka* [On the main properties of perspective relay protection of the alternating current contact network]. Voprosy rascheta, tekhnicheskoy diagnostiki i avtomaticheskogo upravleniya sistem elektrosnabzheniya: mezhvuz. temat. sb. tr. [Questions of calculation, technical diagnostics and automatic control of power supply systems: interuniversity themed coll. of works]. Rostov n/D, RIIZhT Publ., 1981, no. 162, pp. 25–30.

3. German L. A., Zimakov V. A. *Sovershenstvovanie rukovodnyashchikh ukazaniy po releynoy zashchite tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Improving guidelines for relay protection of AC traction power supply]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 5, pp. 25–28.

4. Pupynin V. N. *Opreделение зон deystviya zashchit fiderov 27,5 kV podstantsiy i postov sektionirovaniya zheleznnykh dorog peremennogo toka pri uzlovoy skheme pitaniya*. Trudy MIIT [Determination of the coverage zones of 27.5 kV feeders of substations and sectioning stations of alternating current railways with a nodal power supply scheme. Works of the MIIT]. Moscow, Transport Publ., 1965, no. 199, pp. 184–195.

5. Subkhanverdiev K. S. *Chastichno-neselektivnaya sistema zashchit kontaktnoy seti* [Partially non-selective system of protection of the contact network]. Mir transporta [World of Transport and Transportation Journal], 2014, no. 5, pp. 90–96.

6. Subkhanverdiev K. S. *Razrabotka i sovershenstvovanie algoritmov selektivnoy i neselektivnoy sistem zashchity tyagovykh setey peremennogo toka. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and improvement of algorithms for selective and non-selective protection systems for AC traction networks. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2018, 173 p.

7. *Guidelines for relay protection of traction power supply systems*. JSC "Russian Railways", Department of Electrification and Power Supply. Moscow, TRANSIZDAT Publ., 2005, 216 p. (in Russ.).

8. STO RZD 07.021.4–2015. *Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 4. Methodology for choosing protection settings in the AC traction power supply system*. Moscow, 2016, 136 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHOR

Kamil' S. SUBKHANVERDIEV,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department "Electric power industry of transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Received 26.12.2019

Accepted 20.04.2020

E-mail: kamilsub@mail.ru (K. S. Subkhanverdiev)

For citation: Subkhanverdiev K. S. Calculation of specific operating modes of relay protection for AC traction networks // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. 79 (4): 245–248 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-245-248>.