

Григорьев Н.П., Воприков А.В., Ковалев В.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Статья посвящена вопросу повышения срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов. В работе выполнен анализ подключения тяговой подстанции к контактной сети по схеме «подпитывающей». Такое решение не соответствует классической схеме подключения в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. Силовые трансформаторы в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог (ЭлЖД) мощностью, как правило, 40 МВА являются дорогостоящим электротехническим оборудованием. Современные силовые трансформаторы в системе электроснабжения переменного тока соответствуют стандартам и характеризуются параметрами трансформаторов, выпускаемых в прошлые годы. Таким образом, применение новых трансформаторов заменой установленных ранее приводит к значительным капиталовложениям. При этом технико-экономические показатели работы новых силовых трансформаторов не могут приводить к существенному повышению экономических показателей в системе электроснабжения ЭлЖД переменного тока 25 кВ без учета схем подключения. Мгновенные значения токов плеч приняты реальными в целях выполнения качественной оценки эффективности схемы. Ограничением выбора схемы подключения подстанции, присоединенной к контактной сети по схеме «подпитывающей», является неизменная фазировка смежных подстанций. Доказана нормализация распределения токов плеч питания при подключении рассмотренной подстанции к контактной сети по классической схеме. Сопряжение тяговой сети межподстанционной зоны выполнено применением поста секционирования, подключенного по схеме «четырёхугольника». При этом питание тяговых нагрузок осуществляется по петлевой схеме. Повышение срока службы силовых трансформаторов доказано существенным снижением температуры наиболее нагретой точки обмотки при присоединении трансформатора по классической схеме

Ключевые слова: силовой трансформатор, система тягового электроснабжения, срок службы, износ изоляции, пост секционирования.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение срока службы силовых трансформаторов тяговых подстанций является современным мероприятием, направленным на повышение эффективности работы системы электроснабжения электрифицированных железных дорог (ЭлЖД) переменного тока 25 кВ [1].

На Дальневосточной железной дороге (ДВЖД) система ЭлЖД содержит 31 тяговую подстанцию. Три из них с нетиповой схемой подключения к контактной сети. Такие схемы подключения тяговых подстанций нашли применение при ранее установленных смежных тяговых подстанциях с целью обеспечения нормируемого напряжения в тяговой сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Рассмотрим особенность работы одной из отмеченных подстанций на примере 21 тяговой подстанции (рис. 1).

Подстанция 21 подключена к левому и правому плечам одной обмоткой и питает их фазой В ЛЭП. В соответствии со схемой подключения тяговой подстанции 21 (рис. 1), выполним определение токов обмоток напряжения 27,5 кВ трансформатора. Совместив вектор напряжения фазы А ЛЭП с действительной осью на комплексной плоскости, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ax} &= \frac{2}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} + \frac{2}{3} I_{П} e^{j(240-\varphi_{П})}; \\ \dot{I}_{by} &= -\frac{1}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} - \frac{1}{3} I_{П} e^{j(240-\varphi_{П})}; \\ \dot{I}_{cz} &= -\frac{1}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} - \frac{1}{3} I_{П} e^{j(240-\varphi_{П})}. \end{aligned} \tag{1}$$

При условии мгновенного значения векторов токов правого ($I_{П}$) и левого ($I_{Л}$) плеч в фазных координатах и фазовом сдвиге тока плеча относительно питающего напряжения -37° ($I_{П} = I_{Л} = 500 e^{j203}$) модуль тока обмотки трансформатора ax составит около 667 А, что в два раза превышает модуль тока обмоток by и cz , который составит 333 А. Такое распределение токов плеч по обмоткам приводит к низкому коэффициенту использования мощности силового трансформатора и перегрузке обмотки ax в отдельных поездных ситуациях.

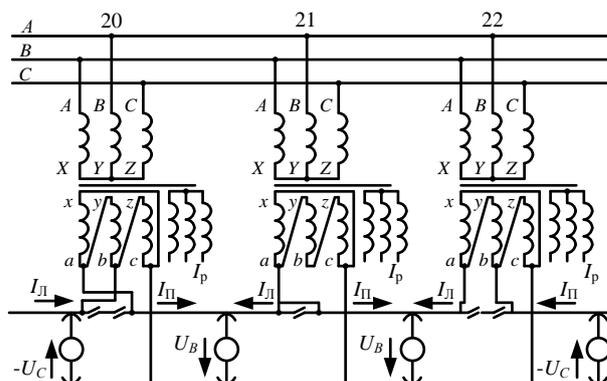


Рис. 1. Схема фазировки реального участка тяговой сети

Принятое в системе электроснабжения ЭлЖД ДВЖД схемное решение приводит к существенному повышению несимметрии токов обмоток высшего напряжения и нагрузки тяговой подстанции на ЛЭП даже при равных токах левого и правого плеч.

В целях повышения эффективности работы посредством нормализации распределения токов плеч тяговой нагрузки в силовом трансформаторе тяговых подстанций предлагается подключение силового трансформатора к контактной сети по классической схеме (рис. 2).

При этом на правое плечо 21 подстанции подано обратное напряжение фазы А ЛЭП. Сопряжение правого плеча подстанции 21 и левого плеча подстанции 22 выполним применением нейтральной вставки. Схема предлагаемого поста секционирования (ПС) обеспечивает проход поездов 5 по разделу тяговой сети с нейтральной вставкой без опускания токоприемника при отключенном токе [2] (рис. 3). Такое решение позволяет сохранить неизменной фазировку всех подстанций, расположенных правее подстанции 21.

При этом питание межподстанционной зоны выполняется петлевыми схемами от подстанций 21 и 22. В работе [3] для межподстанционных зон тяговой сети при значительной разности напряжения предложен новый пост секционирования тяговой сети (см. рис. 3).

Выключатели 1 и 4 при включенном положении обеспечивают соединение контактной сети четного и нечетного путей на участках, подключенных к подстанциям 21 и 22 соответственно.

Выключатели 2 и 3 в положении «Отключено» обеспечивают раздельное питание поездов 5 от подстанций 21 или 22 в зависимости от координаты поезда.

В предлагаемой схеме (см. рис. 2) токи обмоток подстанции 21 I_{ax} , I_{by} и I_{cz} определяются системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ax} &= \frac{2}{3} I_{II} e^{j(240-\varphi_{II})} - \frac{1}{3} I_{II} e^{j(-\varphi_{II})}; \\ \dot{I}_{by} &= -\frac{1}{3} I_{II} e^{j(240-\varphi_{II})} - \frac{1}{3} I_{II} e^{j(-\varphi_{II})}; \\ \dot{I}_{cz} &= -\frac{1}{3} I_{II} e^{j(240-\varphi_{II})} + \frac{2}{3} I_{II} e^{j(-\varphi_{II})}. \end{aligned} \quad (2)$$

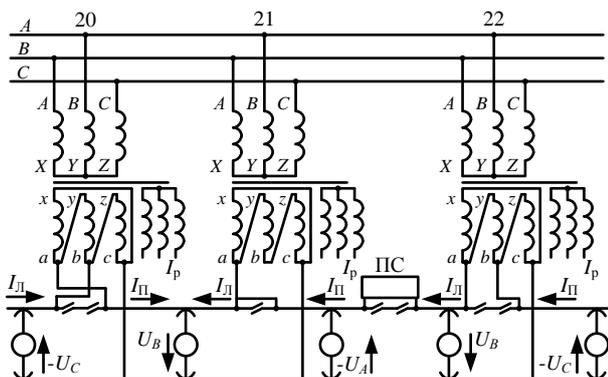


Рис. 2. Схема предлагаемой фазировки участка тяговой сети

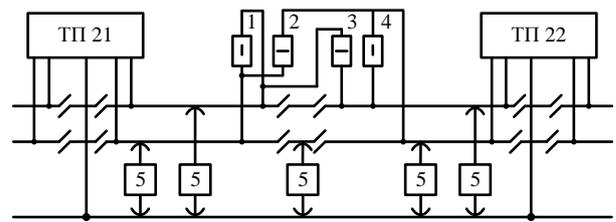


Рис. 3. Новый пост секционирования

Следовательно, применение на рассматриваемой тяговой подстанции классической схемы подключения трансформатора к контактной сети обеспечивает снижение модуля тока наиболее загруженной обмотки ax с 667 до 441 А или на 34 %. При этом модули токов обмоток by и cz соответственно равны 167 и 441 А.

Рассмотрим износ (L) изоляции обмоток при принятой схеме присоединения трансформатора (см. рис. 1) 21 тяговой подстанции. В работах [4–7] доказано, что неравные модули токов обмоток силовых трансформаторов создают неравномерный износ изоляции обмоток.

Основным фактором, влияющим на скорость старения изоляции обмоток, является нагрев [8–10]. Нагрев обусловлен потерями мощности в трансформаторе, где 80% потерь мощности приходится на потери в меди при номинальном токе, а остальные 20% – в стали.

Для расчета термического износа изоляции класса нагревостойкости «А» обмотки, лимитирующей срок эксплуатации трансформатора, при косвенном определении температуры наиболее нагретой точки $\Theta_{ннт}$ получено уравнение (3) в соответствии со стандартом МЭК 60076-7 [11, 12], в работах [13,14].

$$L_{ax} = \sum_{n=1}^N 2^{(\Theta_{TO} + \Delta\Theta_{HR} (I_{ax}/I_R)^{2m} - 98)/6} \cdot t_n, \quad (3)$$

где Θ_{TO} – температура верхних слоев масла, °С; $\Delta\Theta_{HR}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки относительно температуры верхних слоев трансформаторного масла, °С; I_{ax} – ток обмотки ax , А; I_R – номинальный ток, А; m – коэффициент тепловой инерции обмотки; 6 – температурный интервал; t_n – период, за который определяется износ.

Например, для трансформатора типа ТДТНЖ-25000/110/27,5/10, при температуре окружающей среды 20°С, продолжительности нагрузки более 150 минут, что соответствует установившемуся режиму нагрева, получены результаты, представленные на гистограмме рис. 4. Гистограмма температуры наиболее нагретых точек обмоток доказывает существенное превышение нормированного значения температуры обмотки ax , что соответствует схеме подключения (рис. 1). Применение классической схемы соединения трансформатора с контактной сетью создает снижение интенсивности износа изоляции обеспечением соответствия температуры наиболее нагретых точек нормируемым значениям.

Для повышения срока эксплуатации силовых трансформаторов реальной подстанции (рис. 2) необходимо установить две нейтральные вставки и пост секционирования тяговой сети. Применение поста секционирования по схеме четырехугольника позволяет создавать схемы питания тяговых нагрузок при переходе к петлевым схемам питания контактной сети.



Рис. 4. Гистограмма $\Theta_{\text{инт}}$ обмоток трансформатора *ax*, *by* и *cz*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подключение трансформаторов к контактной сети по классической схеме обеспечит снижение тока наиболее нагруженной обмотки, например при равных модулях и углах сдвига относительно питающих напряжений токов левого и правого плеч питания на 34%.

2. Результаты анализа влияния классической схемы подключения силовых трансформаторов на износ изоляции обмоток доказали, что интенсивность износа обмотки, лимитирующей срок эксплуатации трансформатора, снижается, что обеспечивает продление срока эксплуатации силового трансформатора.

3. Пост секционирования предлагается выполнять по схеме четырехугольника, что обеспечит повышение эффективности работы системы электроснабжения ЭлЖД переменного тока 25 кВ за счет применения петлевых схем питания тяговых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Повышение эффективности работы системы переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, Л.В. Марченко, А.П. Парфианович, П.Н. Трофимович // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 2. С. 15-17.
3. Пат. 2706634 Российская Федерация, МПК В60М 3/04 (2006.01). Устройство тяговой сети переменного тока / Григорьев Н.П., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». №2018135346; заявл. 05.10.2018; опубл. 19.11.2019.

4. Пат. 2540685 Российская Федерация, МПК В60М 3/02, Н02J 3/00. Способ подключения тяговых трансформаторов в системе переменного тока 25 кВ / Григорьев Н.П., Воприков А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». № 2013135890/11; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.02.2015.
5. Григорьев Н.П., Воприков А.В. Выбор схем подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4. С. 90-97.
6. Voprikov A.V., Grigoriev N.P., Parfianovich A.P. Extending the life of power transformers of traction substations of alternating current of electric railways // VIII International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia), 2020, pp. 52-59. DOI 10.1007/978-3-030-37916-2_6.
7. Воприков А.В. Продление срока эксплуатации силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 4. С. 32-35.
8. Gamez C. Power Transformer // Transformers Magazine. 2014, vol. 1, iss. 1, pp. 19-21.
9. Naderian A., Pattabi P., Lamarre L. Improving the assessment of remaining life of service aged power transformers // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 330-334. DOI 10.1109/EIC43217.2019.9046610.
10. Mohsen Hosseinkhanloo, Seyed Hadi Mousavi Motlagh, Ali Naderian Jahromi, Navid Taghizadeghan Kalantari. Improving the ageing rate of transformer fleet using imperialist competitive algorithm // IET Generation Transmission & Distribution, 2020, vol. 14, no. 20, pp. 4363-4370. DOI 10.1049/iet-gtd.2020.0052.
11. International standard. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7. Geneva, Switzerland, 2005. 122 p.
12. B. Jean-Noël, Aubin J., McDermid W. Recent development in transformer winding temperature determination. URL: http://www.neoptix.com/literature/v1109r1_Art_Recent_dev_in_windings_temp.pdf (дата обращения 21.11.2020)
13. Grigorev N.P., Voprikov A.V., Parfianovich A.P. Increasing the operating life of power transformer winding insulation when upgrading 25-kV alternating current traction substations // Russian Electrical Engineering, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 100-103. DOI 10.3103/S1068371216020048.
14. Воприков А.В. Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока: дис... канд. техн. наук 05.09.03 / Воприков Антон Владимирович. Хабаровск, 2017.

Поступила в редакцию 05 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF THE SERVICE LIFETIME OF POWER TRANSFORMERS IN THE TRAIN MOVING TRAFFIC SYSTEM

Nikolai P. Grigoriev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Anton V. Voprikov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Vladimir A. Kovalev

Post graduate Student, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Arseniy P. Parfianovich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Polina N. Trofimovich

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: ptofimovich@bk.ru.

The article is devoted to the problem of improvement of the service lifetime of power transformers in the train moving traffic system. The connection of the traction substation to the contact network according to the auxiliary supply source scheme is analyzed in the article. This circuit design does not correspond to the classical connection scheme in the power supply system of the 25 kV alternating current. Power transformers in the power supply system of electrified railways (ELR) with the wattage of, as a rule, 40 MVA are quite expensive. Modern power transformers in the AC power supply system comply with the standards and are characterized by the parameters of the transformers produced in the past. Thus, the use of new transformers by replacing previously installed ones leads to significant capital investments. At the same time, the results of the operation of new power transformers cannot lead to an increase in economic traction power supply system of the 25 kV AC values according to the accepted connection schemes. The instantaneous current values of traction loads are taken as real in order to perform a qualitative assessment of the efficiency of the circuit. Constant phasing of neighboring traction substations is a limitation of the choice of the scheme connected to the contact network according to the auxiliary supply source scheme. Normalization of the distribution current traction loads, when the traction substation is connected to the contact network according to the classical scheme, was proved. The coupling of the traction network of the intersubstation zone is made using a sectioning post connected according to the "quadrangle" scheme. Traction loads are powered according to the looping scheme. An increase in the service lifetime of power transformers was proved by a significant decrease in the temperature of the hottest point of the winding when the transformer is connected according to the classical scheme.

Keywords: power transformer, power supply system, service lifetime, insulation depreciation, section switch box.

REFERENCES

1. *Strategiya razvitiya zhelezнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: utv. Rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r.* [Strategy for the development of railway transport in Russian Federation for the period up to 2030: appr. by the order of Government of the Russian Federation], no. 877-r, June 17, 2008. (In Russian)
2. Grigoryev N.P., Marchenko L.V., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Improvement of traction power supply system of 25 kV alternating current. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2019, no. 2, pp. 15-17. (In Russian)
3. Grigorev N.P., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. *Ustroystvo tyagovoy seti peremennogo toka* [Traction alternating current network device]. Patent RF, no. 2706634, 2019.
4. Grigoryev N.P., Voprikov A.V. *Sposob podklyucheniya tyagovykh transformatorov v sisteme peremennogo toka 25 kV* [Connection method of power transformers in the power supply system of alternating current]. Patent RF, no. 2540685, 2015.
5. Grigoryev N.P., Voprikov A.V. Selection the schemes for connecting power transformers of traction substations of 25 kV alternating current electrified railways. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2014, no. 4, pp. 90-97. (In Russian)
6. Voprikov A.V., Grigoriev N.P., Parfianovich A.P. Extending the life of power transformers of traction substations of alternating current of electric railways // VIII International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia), 2020, pp. 52-59. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_6.
7. Voprikov A.V. Elongation the service lifetime of power transformers during the reconstruction of traction substations of 25 kv alternating current electrified railways. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2016, no. 4, pp. 32-35. (In Russian)
8. Gamez C. Power Transformer / Carlos Gamez // *Transformers Magazine*, 2014, vol. 1, Issue 1, pp. 19-21.
9. Naderian A., Pattabi P., Lamarre L. Improving the assessment of remaining life of service aged power transformers // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 330-334. DOI: 10.1109/EIC43217.2019.9046610.
10. Mohsen Hosseinkhanloo, SeyedHadi Mousavi Motlagh, Ali NaderianJahromi, NavidTaghizadeghan Kalantari. Improving the ageing rate of transformer fleet using imperialist competitive algorithm // IET Generation Transmission & Distribution, 2020, vol. 14, no. 20, pp. 4363-4370. DOI 10.1049/iet-gtd.2020.0052.
11. International standard. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7 – Geneva, Switzerland, 2005. 122 p.
12. B. Jean-Noël, Aubin J., McDermid W. Recent development in transformer winding temperature determination. URL: http://www.neoptix.com/literature/v1109r1_Art_Recent_dev_in_windings_temp.pdf (accessed 21 November 2020)
13. Grigorev N.P., Voprikov A.V., Parfianovich A.P. Increasing the operating life of power transformer winding insulation when upgrading 25-kV alternating current traction substations // Russian Electrical Engineering, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 100-103. DOI: 10.3103/S1068371216020048.
14. Voprikov A.V. *Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii silovykh transformatorov tyagovykh podstantsiy zheleznykh dorozh peremennogo toka.* Kand. Diss. [Improvement the efficiency to operation of power transformers of traction substations of alternating current electrified railways. Ph.D. Diss.]. Khabarovsk, 2017.

Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов / Н.П. Григорьев, А.В. Воприков, В.А. Ковалев, А.П. Парфианович, П.Н. Трофимович // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 4(49). С. 26-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29)

Grigoriev N.P., Voprikov A.V., Kovalev V.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Improvement of the Service Lifetime of Power Transformers in the Train Moving Traffic System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 26-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29)