

Альтернативный способ симметрирования тяговых нагрузок электрических железных дорог переменного тока

В.А. Осипов, А.И. Боева

ФГБОУ ВПО «РГУПС»

В настоящее время большая часть железных дорог на территории РФ электрифицируются на переменном токе. Известно, что система однофазного переменного тока 27,5 кВ при очевидных достоинствах имеет ряд существенных недостатков. Основная проблема, которую приходится решать при использовании системы однофазного переменного тока 27,5 кВ – проблема повышения качества электрической энергии, а именно снижение коэффициента обратной последовательности в точках общего присоединения [1].

Согласно действующим нормам (ГОСТ 13109-97), электрическая энергия должна соответствовать предъявляемым к ней на потребительском рынке требованиям и критериям. К числу нормируемых показателей относятся показатели, характеризующие, в частности, отклонения напряжения и неуравновешенность трехфазной системы. Несоответствие показателей качества электроэнергии нормативным значениям вызывает дополнительные потери электроэнергии [2]. А так как часто от трансформаторов, находящихся на тяговых подстанциях питаются районные потребители, то качество электрической энергии и надежность снабжения влияют и на экономическую ситуацию нетяговых потребителей [3].

В современных условиях транспорт, в том числе и железнодорожный, становится все более важной составляющей в жизни людей. Именно поэтому, в Транспортной стратегии РФ основной акцент сделан технологический прорыв в транспортной отрасли [4].

В настоящее время на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог России используют трансформаторы, соединённые по схеме звезда/треугольник. Известно, что соотношения между токами плеч и токами первичной стороны данного трансформатора имеют вид:

$$\begin{cases} I_a = \frac{2}{3}I_{II} + \frac{1}{3}I_{II} \\ I_b = \frac{1}{3}I_{II} + \frac{1}{3}I_{II} \\ I_c = -\frac{2}{3}I_{II} - \frac{1}{3}I_{II} \end{cases} .$$

У такого трансформатора коэффициент несимметрии токов в режиме симметричной нагрузки фаз равен 50%. В других режимах работы коэффициент обратной последовательности может достигать ста процентов.

В настоящее время для решения данной проблемы используют трехфазно-двухфазные трансформаторы с симметрирующим эффектом [5 - 10]. У этого трансформатора в системе вторичных напряжений два вектора сдвинуты друг относительно друга на 90 градусов и равны по модулю. В режиме симметричной работы плеч данный симметрирующий трансформатор обеспечит нулевой коэффициент обратной последовательности.

При сравнении векторных диаграмм трансформатора, соединенного по схеме звезда/треугольник, и симметрирующего трансформатора видно изменение абсолютных токовых значений и аргументов токов на первичной стороне (рис. 1).

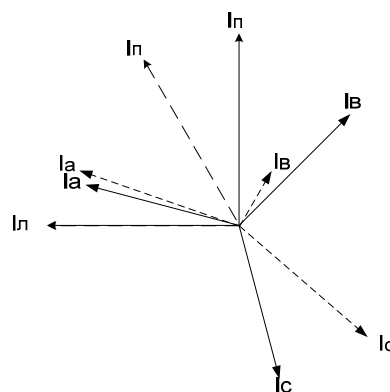


Рис. 1. Сравнительная векторная диаграмма трансформаторов:

-- - трансформатор звезда/треугольник, — - симметрирующий трансформатор

Следует при этом отметить, что, несмотря на то, что использование специальных трансформаторов с симметрирующим эффектом позволяет частично решить задачу повышения качества электрической энергии, данный метод решения является весьма дорогостоящим. Реконструкция существующих тяговых подстанций потребует значительных капиталовложений на замену существующих трансформаторов.

Решит задачу частичного симметрирования нагрузки можно и без замены эксплуатируемых трансформаторов на симметрирующие. Для этого необходимо изменить конструкцию имеющихся на тяговых подстанциях трансформаторов, а именно устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Устройство РПН необходимо доработать таким образом, чтобы обеспечить независимое регулирование уровня напряжения отдельно в каждой фазе. Данное предложение позволит выполнить пофазную регулировку числа витков в обмотках трансформатора. Для реализации поставленной в работе задачи напряжение в одной фазе его увеличиваем, а в двух других уменьшаем. Вследствие этого изменится коэффициент трансформации в каждой фазе, а, следовательно, и напряжение. В результате увеличится угол между векторами напряжений, питающих правое и левое плечо. Рассмотрим данный процесс при помощи векторной диаграммы. На первичной стороне электродвижущие силы образуют треугольник, показанный на рисунке 2. Из треугольника напряжений вторичной стороны несложно получить угол δ :

$$\begin{aligned}U_{bc} &= U_{ca} = U, \\U_{ab} &= 1,3 \cdot U; \\1,3^2 \cdot U^2 &= 2 \cdot U^2 - 2 \cdot U^2 \cdot \cos \delta, \\2 \cdot U^2 \cdot \cos \delta &= (2 - 1,3^2) \cdot U^2, \\ \cos \delta &= 81^\circ.\end{aligned}$$

Отсюда следует, что искомый угол равняется 99 градусам, что несомненно меньше исходного значения в 120 градусов.

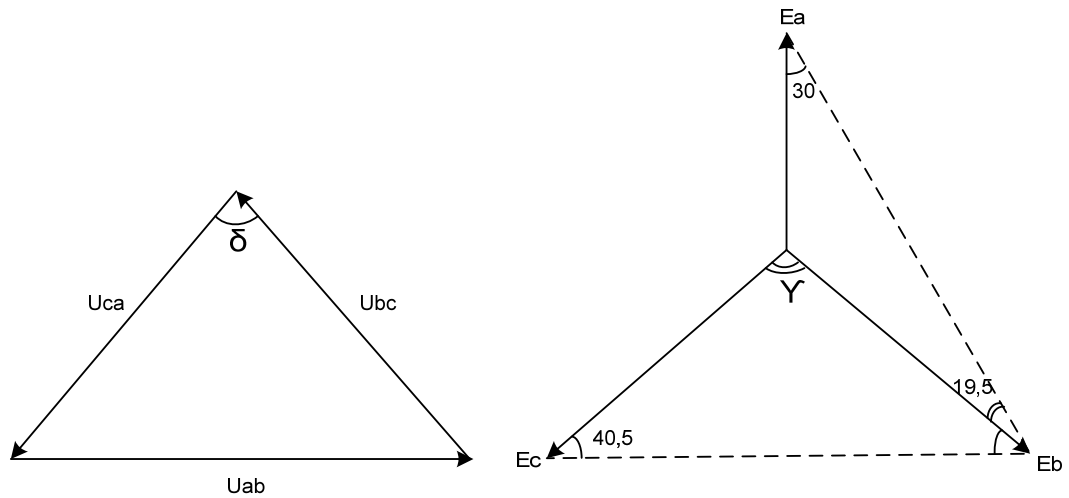


Рис. 2. Векторная диаграмма модифицированного трансформатора.

Из векторных диаграмм видно, что

$$\frac{E_a}{E_b} = 1,3 \cdot \alpha ,$$

α – коэффициент, равный отношению числа витков $\frac{w_1'}{w_1''}$

Используя полученные ранее формулы, несложно получить, что

$$\frac{E_b}{\sin 30} = \frac{E_a}{\sin 19,4} ,$$

$$E_a = \frac{\sin 19,4}{\sin 30} \cdot E_b ,$$

$$E_a = 0,664 \cdot E_b .$$

Из этого следует, что коэффициент α равняется:

$$\alpha = \frac{0,664 \cdot E_b}{E_b \cdot 1,3} ,$$

$$\alpha = 0,5107 .$$

При равномерной нагрузке плеч трансформатора токи левого и правого плеча будут равны и сдвинуты относительно друг друга на $180-99=81$ градус. До внесения изменений этот угол составлял $180-120=60$ градусов.

Из равенства магнитодвижущих сил следует, что

$$I_a \cdot w_1'' - I_{ab} \cdot w_2 + I_{bc} \cdot w_2 - I_b \cdot w_1' = 0 ,$$

$$I_a \cdot w_1'' - I_{ab} \cdot w_2 + I_{ca} \cdot w_2 - I_c \cdot w_1'' = 0.$$

Разделим эти уравнения на w_1'' и введем передаточное число $\frac{w_2}{w_1''} = \beta$:

$$I_a - I_b \cdot \alpha = \beta \cdot (I_{ab} - I_{bc}),$$

$$I_a - I_c = \beta \cdot (I_{ab} - I_{ca}).$$

Учитывая, что в нулевой точке трехфазной системы

$$I_a + I_b + I_c = 0,$$

решаем полученные уравнения:

$$2 \cdot I_a - 2 \cdot \alpha \cdot I_b = 2 \cdot \beta \cdot (I_{ab} - I_{bc}),$$

$$2 \cdot I_a + I_b = \beta \cdot (I_{ab} - I_{ca}),$$

$$2,0214 \cdot I_b = -\beta \cdot I_{ab} - \beta \cdot I_{ca} + 2 \cdot \beta \cdot I_{bc} = \beta \cdot (I_{II} - I_{I}),$$

$$I_b = \beta \cdot \left(\frac{I_{II}}{2,0214} - \frac{I_{I}}{2,0214} \right) = \beta \cdot (0,495 \cdot I_{II} - 0,495 \cdot I_{I});$$

$$I_a - 0,5107 \cdot I_{II} \cdot \frac{\beta}{2,0214} + 0,5107 \cdot I_{I} \cdot \frac{\beta}{2,0214} = \beta \cdot I_{ab} - \beta \cdot I_{bc},$$

$$I_a = \beta \cdot \left(\frac{0,5107}{2,0214} \cdot I_{II} - \frac{0,5107}{2,0214} \cdot I_{I} - \frac{2}{3} \cdot I_{II} - \frac{1}{3} \cdot I_{I} - \frac{1}{3} \cdot I_{II} + \frac{1}{3} \cdot I_{I} \right),$$

$$I_a = \beta \cdot (-0,747 \cdot I_{II} - 0,252 \cdot I_{I});$$

$$I_c = -I_a - I_b = \beta \cdot (0,747 \cdot I_{II} + 0,252 \cdot I_{I} - 0,495 \cdot I_{II} + 0,495 \cdot I_{I}),$$

$$I_c = \beta \cdot (0,252 \cdot I_{II} + 0,747 \cdot I_{I}).$$

Таким образом, для реконструированного трансформатора получены соотношения между токами плеч и токами первичной стороны:

$$\begin{cases} I_a = -0,747 \cdot I_{II} - 0,252 \cdot I_{I} \\ I_b = 0,495 \cdot I_{II} - 0,495 \cdot I_{I} \\ I_c = 0,252 \cdot I_{II} + 0,747 \cdot I_{I} \end{cases}.$$

Используя полученные соотношения, построим для рассматриваемого трансформатора векторную диаграмму токов первичной стороны. Из векторной диаграммы видно, что внесенные изменения дают значительный симметрирующий эффект.

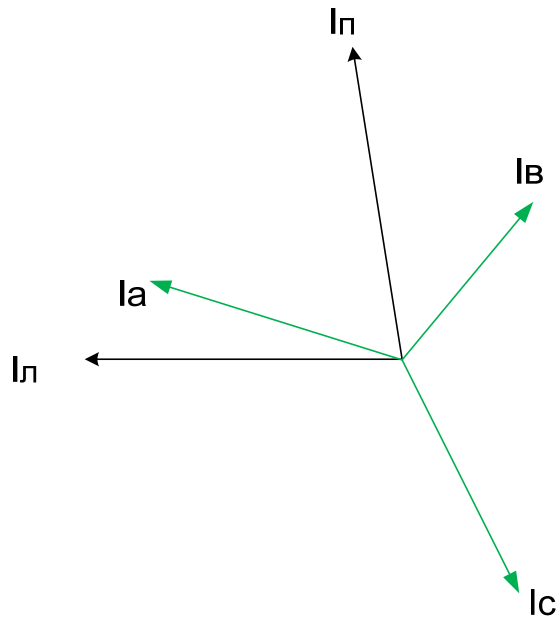


Рис. 3. Векторная диаграмма токов предлагаемого трансформатора

Для количественной оценки полученного эффекта, разложим систему токов по методу симметричных составляющих.

$$I_{a1} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b \cdot a + I_c \cdot a^2),$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b \cdot a^2 + I_c \cdot a),$$

Из данных выражений следует, что коэффициент обратной последовательности измененного трансформатора равен:

$$k = \frac{I_{a2}}{I_{a1}} = 0,15,$$

Несмотря на то, что полученное значение k больше коэффициента обратной последовательности симметрирующего трансформатора, результат от внедрения предлагаемого решения все же позволит значительно снизить несимметрию токов и напряжений в точках присоединения тяговых подстанций к питающим линиям. Как следует из расчетов, составляющая обратной последовательности токов снизится с 50% до 15%. При этом, очевидным преимуществом является отсутствие необходимости во вложении значительных капитальных затрат.

Литература:

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] Учебник для вузов ж.-д. трансп. / М.:Транспорт,1982 – 582 с.
2. Варенцов В.М.К вопросу о расчете надежности систем тягового электроснабжения [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. - № 6. – С.40-46.
3. Макареня Т.А., Сташ С.В. Система тарифообразования на услуги жилищно-коммунального хозяйства [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1839> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Ильинова С.В. Повышение экономической эффективности экологической безопасности транспортной системы [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник дона», 2010, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/298> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Мамошин Р.Р, Бородулин Б.М., Зельвянский А.Я., Титов А.Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. 1989. - № 1. - С. 22-24.
6. Василянский А. М., Мамошин Р. Р., Якимов Г. Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц [Текст] // Железные дороги мира.- 2002. - № 8. – С. 30-33
7. Zhang ZW, Wang YN. / A novel three-phase to two-phase and three-phase balance transformer in Y and Δ connection. [Text] // Transactions of China Electrotechnical Society 2006; 21: 82-86. (article in Chinese with an abstract in English).
8. Zhang ZW, Wu B, Kang JS, Luo LF. / A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications. [Text] // IEEE Transactions Power Delivery 2009; 24: 711-718.

9. Heathcote MJ, The J&P / Transformer Book. [Text] // 12th ed. London, UK: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1998.
10. Zhang ZW / Three-phase to four-phase or two-phase balance transformer. [Text] // Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering 2007; 27: 78-82. (article in Chinese with an abstract in English)