



Симметрирующий трансформатор тягового электроснабжения



Василий БЕКРЕНЕВ

Vassily Yu. BEKRENEV

Бекренев Василий Юрьевич — аспирант кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), электромеханик Панковской дистанции электроснабжения Московской железной дороги.

Анализ применения симметрирующих трансформаторов для тягового электроснабжения. Дается перечень положительных эффектов их использования в сетях переменного тока, особенно при повышенном уровне напряжения 94 кВ на примере Октябрьской железной дороги. Сформулированы выводы и предложения о пользе симметрирующих трансформаторов, оцениваются возможности агрегатов таких типов при реконструкции и модернизации тяговых подстанций переменного тока, на которых должны с высокой обязательностью соблюдаться требования по охране труда и электробезопасности.

Ключевые слова: железные дороги, симметрирующий трансформатор, симметрирующий эффект, качество электроэнергии, эффект Скотта, симметрирование токов, коэффициент несимметрии, тяговое электроснабжение, подстанция, электрификация.

Хозяйство электрификации и электроснабжения включает более 1400 тяговых подстанций, 52 тыс. трансформаторных подстанций, свыше 100 тыс. км контактной сети. Удельный вес объема перевозок на электрической тяге составляет не менее 80%, а удельный вес железнодорожного транспорта в общем электропотреблении по России — 4,4%.

Входящая в общее хозяйство электроэнергетики система электрической тяги однофазного переменного тока 25 кВ, 50 Гц по своей специфике осуществляет несимметричный отбор электроэнергии из трехфазной энергосистемы. При этом трехфазная система внешнего электроснабжения загружается несимметричными фазными токами, что приводит к возникновению несимметрии напряжений в сетях. В результате увеличиваются потери мощности и снижается пропускная способность линий электропередач (ЛЭП) и трансформаторов, уменьшается проектная мощность генераторов, синхронных и асинхронных машин. Кроме того, электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока, оснащенный мощными полупроводниковыми преобразователями, является генератором высших гармонических со-

ставляющих в кривой потребляемого тока, которые могут приводить к искажению синусоидальности напряжения.

ПРЕИМУЩЕСТВА СИММЕТРИРУЮЩИХ ТТП

Сетевые электроснабжающие организации (внешнего электроснабжения тяговых подстанций) при выявлении нарушений по показателям качества электроэнергии (ПКЭ) могут по арбитражным каналам применять к дорогам штрафные санкции в размере до 10% от стоимости всей потребленной электроэнергии тяговыми подстанциями (ТП), которые оказались виновниками нарушений.

При годовом расходе электроэнергии ТП с трансформаторами по схеме рис. 1 в объеме 40 млн кВт · ч ущерб за нарушение долевых вкладов (ДВК) только по отдельно взятому показателю качества может составить примерно 1,9 млн рублей. Поэтому целесообразна замена трансформаторов тяговых подстанций (ТТП) на трансформаторы с повышенным симметрирующим эффектом (СТТП)

Еще более эффективной представляется установка СТТП на электрифицируемых участках, где применение таких трансформаторов вместо существующих уже изначально способно стать менее капиталоемким решением.

Для наглядной оценки схем СТТП представляется уместным сравнение их со схемой ныне применяемого ТТП (рис. 1а). Векторная диаграмма его токов и напряжений при $\phi_a = \phi_n = \phi$ изображена на рис. 1б.

Токи фаз, питающих нагрузки плеч $I_A = I_C = 0,884 I_{пл}$, т. е. токи в фазных обмотках треугольника, всего на 11,8% меньше токов плеч. Причиной этого является наличие в обмотках фаз токов прямой и обратной последовательностей. У этого трансформатора коэффициент несимметрии токов $K_{12} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1}$, где n — отношение

модулей токов плеч. Зависимости коэффициентов несимметрии токов по обратной последовательности K_{12} от соотношения токов плеч питания тяговой подстанции n для традиционного (1) и сим-

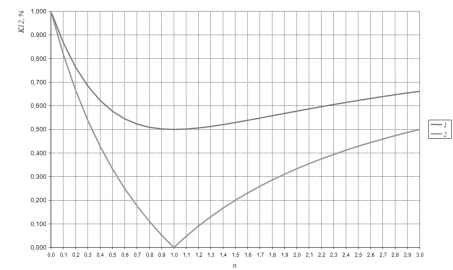
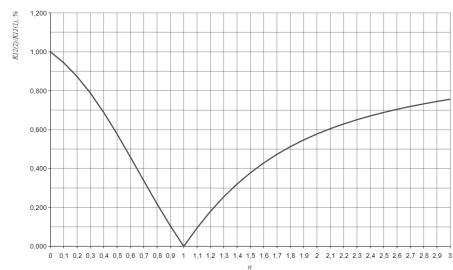
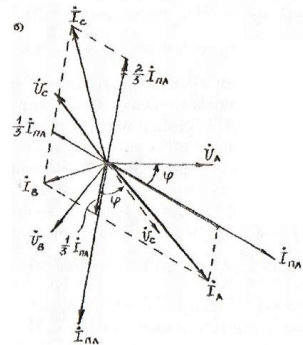
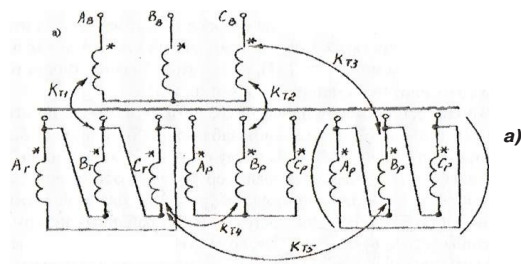


Рис. 1.

метрирующего (2) трансформаторов приведены на рис. 1в.

Для оценки растущего симметрирующего эффекта при использовании симметрирующего трансформатора на рис. 1г приведена зависимость $K_{12}(2) / K_{12}(1)$ от n . Из нее видно, что симметрирующий трансформатор обеспечивает лучшее симметрирование токов. При $0,6 < n < 1,7$ K_{12} снижается более чем в 2 раза, а при $0,8 < n < 1,2$ — в 4 раза и более по сравнению со значениями K_{12} , соответствующими применяемым тяговым трансформаторам.





За счет лучшего распределения токов по обмоткам симметрирующего трансформатора значительно сокращается расход меди на его изготовление.

При соотношении мощностей обмоток ТТП 100/100/100 расход меди на два трансформатора одной ТП составляет $41,6 \cdot D_{cp} \cdot \omega_r \cdot \frac{I_{nn}}{j} \cdot \gamma$, где D_{cp} – усредненный

диаметр одного витка трансформатора, м; ω_r – число витков обмотки на стороне тяги (расход меди отнесен для всех обмоток к стороне тяги); I_{nn} – максимальный расчетный ток плеча, по которому определяется мощность ТТП, А; j – расчетная плотность тока обмоток ТТП, А/м²; γ – плотность материала обмотки, т/м³.

Наряду с нарушением норм на ПКЭ несимметричная работа тяговых подстанций ведет к недоиспользованию мощности понижающих трансформаторов до 30–32% (например, при трансформаторах ТДТНЖ-40000/110 используемая с учетом номинальной нагрузки фаз мощность снижается с 40 до 30,25 МВА).

Питание большинства межподстанционных зон (МЗ) осуществляется с одной стороны зоны от ТП по отстающей фазе, а с другой – по опережающей фазе смежной ТП. Потери напряжения от источника энергии до шин ЭЧЭ (тяговая подстанция), питающей МЗ по отстающей фазе, оказываются большими, чем до шин смежной ТП, питающей МЗ по опережающей фазе. Как следствие, распределение нагрузок МЗ оказывается неравномерным: на ТП с более высоким напряжением приходится большая доля нагрузки и общие потери энергии на МЗ возрастают.

При используемых сейчас симметричных трансформаторах питание однофазных тяговых нагрузок вызывает появление в трехфазной сети (включая трансформаторы ТП) мощной трехфазной реактивной системы токов обратной последовательности, не участвующей в передаче полезной энергии тяговым нагрузкам. Значения непроизводительных токов обратной последовательности даже при равноплечей нагрузке не опу-

скаются ниже 50% от токов прямой последовательности, которые определяют полезную мощность, потребляемую тягой. Потери мощности в трансформаторах ТП при наличии токов обратной последовательности возрастают минимум на 25% по сравнению с режимом их симметричной загрузки.

Итак, в узле стыкования однофазных тяговых сетей с симметричными трехфазными сетями тяга формирует непроизводительную систему токов обратной последовательности, которая влияет на такой важный ПКЭ, как K_{2v} , увеличивает потери мощности в трансформаторах ТП и тяговой сети, увеличивает потребление реактивной энергии.

ПОИСК ЭФФЕКТИВНЫХ СХЕМ

До сих пор на сети железных дорог РФ проблема несимметричного отбора электроэнергии из трехфазной энергосистемы решалась путем подключения тяговых подстанций к ЛЭП системы внешнего электроснабжения по схеме «винта». В таком случае максимальный симметрирующий эффект возможен только на участках ЛЭП, ближайших к электростанциям. При этом необходимо определенное количество подстанций, подключенных к одной ЛЭП (кратное трем), а токи плеч питания тяговой нагрузки на тяговых подстанциях должны быть одинаковы. В эксплуатации условие равенства нагрузок по плечам питания реализуется редко.

Изначально это была схема из двух однофазных трансформаторов (схема Скотта), недостатком которой оказалось отсутствие возможности питания трехфазных нетяговых потребителей и потребителей системы ДПР (*воздушная линия продольного электроснабжения напряжением 27,5 кВ (два провода – рельс) на электрифицированных участках переменного тока*).

Схема Скотта обеспечивала сдвиг фаз между напряжениями плеч питания 90° (рис. 2а). Для нее с учетом необходимости питания нагрузок системы ДПР и районных нетяговых потребителей (среди которых в общем случае возможны и потребители I-й категории надежности) ТП должна обладать пятью трансформаторами.

Структура получается сложной, хотя общий расход меди на трансформаторы составляет $Q_{\Sigma} = 31,28 \cdot D_{cp} \cdot \omega_{\Gamma} \cdot \frac{I_{na}}{j} \cdot \gamma$. Мощ-

ность для питания нагрузок ДПР и района – 0,33. Расход стали на сердечники и баки не учитывается, хотя наличие трех однофазных трансформаторов предполагает повышенные затраты металла.

Расход меди занесен в таблицу 1, в том числе для схем, изображенных на рис. 2б и 2в.

Коэффициент несимметрии токов для всех СТТП одинаков и определяется выражением $K_{12} = \frac{|n-1|}{|n+1|}$. Отметим, что СТТП

в пределах $0,5 < n < 1,5$ обеспечивает снижение K_{12} в 1,73–2,65 раза по сравнению с существующей схемой ТТП, что практически избавляет дороги от штрафных санкций за нарушение ДВК по этому показателю.

На рис. 2б изображена схема СТТП, разработанная японцами на основе модифицированной схемы Вудбриджа с согласующим автотрансформатором (САТ) и примененная для тяговой сети 2х25 кВ в Японии и Китае. При том же самом симметрирующем эффекте в условиях нашей страны иметь районную обмотку и два СТТП на одну ТП необходимости нет. Расход меди на два таких СТТП и два САТ составляет $43,8 \cdot D_{cp} \cdot \omega_{\Gamma} \cdot \frac{I_{na}}{j} \cdot \gamma$.

В 1985 году МИИТ предложил две схемы СТТП, более соответствующие российским условиям (рис. 2в, г).

На рис. 2в со стороны тяги на одно плечо подается от обмотки, соединенной треугольником, напряжение \dot{U}_a , а на второе плечо – от обмоток с напряжениями \dot{U}'_a и \dot{U}'_c , соединенных в неполную звезду. Конец обмотки с напряжением \dot{U}'_c соединяется с ее началом, имеющим напряжение \dot{U}_a треугольника. Этот общий узел соединяется с рельсами, а концы обмоток с напряжениями \dot{U}_a и \dot{U}'_a присоединяются к тяговой сети плеч. В таком случае угол между векторами напряжений \dot{U}_a и \dot{U}'_{ac}

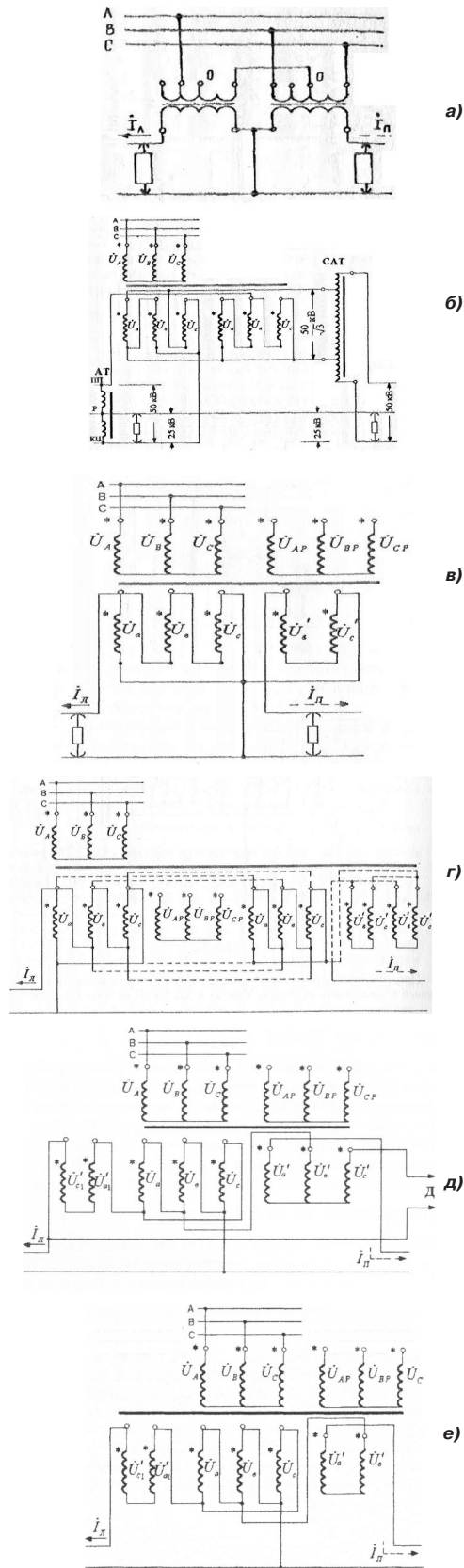


Рис.2.



№ схем ТТП	p						
	Рис.1а	Рис.2а	Рис.2б	Рис.2в	Рис.2г	Рис.2д	Рис.2е
Расход меди p $D_{cp} \cdot \omega_r \cdot \frac{I_{нз}}{j} \cdot \gamma$	41,607	31,28	43,7685	36,5228	36,5228	33,356	31,479

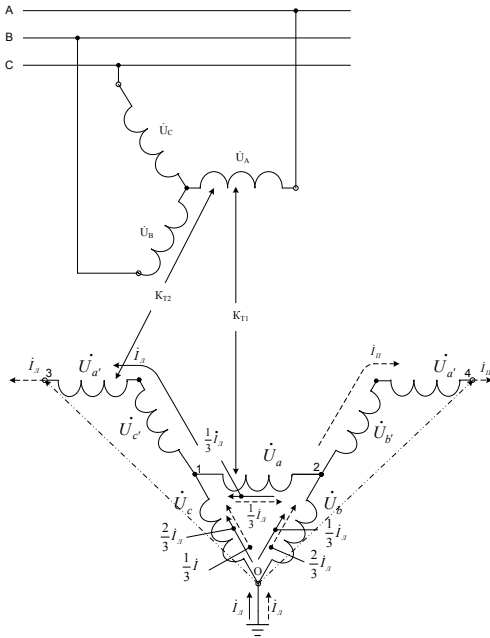


Рис. 3.

составляет 90° и схема СТТП обладает симметрирующим эффектом Скотта.

Расход меди на два СТТП, собранных по этой схеме, составляет $36,5 \cdot D_{cp} \cdot \omega_r \cdot \frac{I_{нз}}{j} \cdot \gamma$.

Вторая схема МИИТ (рис. 2г) отличается от предыдущей тем, что на стороне тяги обмотки треугольника и неполной звезды расщеплены. Это дает возможность путем параллельного соединения обмоток треугольника, а также неполных звезд получать вариант, сходный с рис. 2в (соединения обмоток показаны штриховыми линиями). Каскадным соединением можно получать СТТП, предназначенный для питания тяговой сети по системе 2 x 25 кВ. Расход меди для этой схемы остается практически тем же: $36,5 \cdot D_{cp} \cdot \omega_r \cdot \frac{I_{нз}}{j} \cdot \gamma$.

В МИИТ разра ботаны варианты СТТП для замены ТТП на действующих участках и оснащения новых электрифицируемых линий. Вариант СТТП для замены ТТП (рис. 2д, е) имеет на тяговой стороне обмотки, включенные треугольником, неполной и полной звездами. При их соединении образуется равносторонний треугольник напряжений со сторонами 27,5 кВ. Это позволяет осуществить питание системы ДПР на существующих участках, незначительно реконструировав ОРУ (*открытое распределительное устройство*). Для питания районных потребителей предусмотрена отдельная обмотка, соединенная в звезду или треугольник. Расход меди по этому варианту в ТТП на 24,7% больше, чем в СТТП.

На новых электрифицируемых участках питание нагрузок системы ДПР можно организовать от районной обмотки СТТП напряжением 35 кВ специальными трехфазными линиями по опорам контактной сети. В этом случае расход меди сокращается на 32%.

В 2001 году МИИТ предложил схему симметрирующего трансформатора, позволяющего осуществлять электроснабжение тяги, нетяговых нагрузок и нагрузок системы ДПР. В 2005 году такой трансформатор в качестве экспериментального установлен на тяговой подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча» Кемской дистанции электроснабжения Октябрьской железной дороги.

ТРАНСФОРМАТОР ПО СХЕМЕ МИИТ

Как следует из рис. 3, первичная обмотка трансформатора соединена звездой, на вторичной (тяговой) стороне взаимодействуют три обмотки. Та, что в виде треугольника, одной своей вершиной (узел 0) соединяется с рельсами (землей), двумя другими (узлы 1 и 2) – с обмотками, соединенными каждая неполной звездой.

Свободные выводы обмоток, соединённых неполной звездой (узлы 3 и 4), подключаются соответственно к левому и правому плечам питания ТП. В этом случае угол между векторами напряжений плеч питания (напряжения между узлами 3–0 и 4–0) составляет 90° .

Как и в варианте с существующим трансформатором, принимаем коэффициент трансформации от фазных обмоток высокого напряжения к напряжениям плеч ТН, равным 1.

Векторная диаграмма токов и напряжений для симметрирующего трансформатора при этих условиях соответствует рис. 3.

При напряжениях плеч питания 27,5 кВ получаем следующие уравнения, связывающие на стороне ТН напряжения треугольника и неполных звёзд:

$$U_b \cdot \cos 30^\circ + U'_b \cos 30^\circ = \frac{27,5}{\sqrt{2}};$$

$$U_a + 2U'_a + U'_b = \sqrt{2} \cdot 27,5.$$

Учитывая, что $U_a = U_b = U_c$ и

$$U'_a = U'_b = U'_c, \text{ получаем:}$$

$$U_b \cdot \cos 30^\circ + U'_b \cos 30^\circ = \frac{27,5}{\sqrt{2}};$$

$$U_b + 3U'_b = \sqrt{2} \cdot 27,5.$$

Откуда

$$U_b = 14,235 \text{ кВ};$$

$$U'_b = 8,2186 \text{ кВ};$$

При $\phi_L = \phi_\Pi = 37^\circ$, $I_L = I_\Pi$ токи в треугольнике 0–1–2 с напряжениями U_a, U_b, U_c :

$$\dot{I}_a = -\frac{1}{3}\dot{I}_L + \frac{1}{3}\dot{I}_\Pi;$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{3}\dot{I}_L - \frac{2}{3}\dot{I}_\Pi;$$

$$\dot{I}_c = \frac{2}{3}\dot{I}_L + \frac{1}{3}\dot{I}_\Pi.$$

В симметрирующем трансформаторе, принимая вещественную ось, совпадающей с вектором U_a :

$$\dot{I}_L = I_L e^{j(135^\circ - 37^\circ)} = I_L e^{j98^\circ};$$

$$\dot{I}_\Pi = I_\Pi e^{j(45^\circ - 37^\circ)} = I_\Pi e^{j8^\circ}.$$

Токи прямой и обратной последовательностей для фазы А рассматриваемого треугольника:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c);$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c).$$

Учитывая формулы и $n = \frac{I_L}{I_\Pi}$, получаем:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(a^2\dot{I}_L - a\dot{I}_\Pi);$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(a\dot{I}_L - a^2\dot{I}_\Pi)$$

и

$$\dot{I}_{a1} = \frac{I_\Pi}{3}(ne^{j338^\circ} - e^{j128^\circ});$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{I_\Pi}{3}(ne^{j218^\circ} - e^{j248^\circ}).$$

Модули токов этих последовательностей:

$$I_{a1} = \frac{I_\Pi}{3}\sqrt{n^2 + 1,7322n + 1};$$

$$I_{a2} = \frac{I_\Pi}{3}\sqrt{n^2 - 1,7322n + 1}.$$

Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности в обмотке симметрирующего трансформатора, соединённой треугольником:

$$K_{I2C\Delta} = \sqrt{\frac{n^2 - 1,7322n + 1}{n^2 + 1,7322n + 1}}.$$

Потери мощности от токов прямой и обратной последовательностей в треугольнике симметрирующего трансформатора:

$$\Delta P_{I1C\Delta} = 3I_{a1}^2 R_{CV};$$

$$\Delta P_{I2C\Delta} = 3I_{a2}^2 R_{CV},$$

где R_{CV} – активное сопротивление фазы обмотки симметрирующего трансформатора, соединённой треугольником.

Отношение $\Delta P_{I2C\Delta}$ к $\Delta P_{I1C\Delta}$:

$$\Delta P_{I2C\Delta}^* = \frac{I_{a2}^2}{I_{a1}^2};$$

$$\Delta P_{I2C\Delta}^* = \frac{n^2 - 1,7322n + 1}{n^2 + 1,7322n + 1}.$$

Полные потери мощности в обмотке, соединённой треугольником на стороне тяги, равны:

$$\Delta P_{CV} = \Delta P_{I2C\Delta} + \Delta P_{I1C\Delta} = \frac{2I_\Pi^2}{3}(n^2 + 1)R_{CV}.$$





В обмотках неполных звёзд на стороне тяги, формируемых лучами $-\dot{U}'_a + \dot{U}'_c$ и $-\dot{U}'_b + \dot{U}'_a$, протекают токи $\dot{I}_л$ и $\dot{I}_п$.

Потери мощности в лучах этих неполных звёзд:

$$\Delta P_{\Sigma \nu} = 2I_{л}^2 R_{\lambda \nu} + 2I_{п}^2 R_{\lambda \nu} = 2I_{п}^2 (n^2 + 1) R_{\lambda \nu},$$

где $R_{\lambda \nu}$ – активное сопротивление луча неполной звезды обмотки на стороне тяги.

Следует учесть, что если принять равными сечения обмоток на стороне тяги симметрирующего и существующего трансформаторов, то сопротивление фазы симметрирующего, соединённой треугольником, равно:

$$R_{c\nu} = \frac{14,235}{27,5} \cdot R_{\nu} = 0,518 R_{\nu},$$

где R_{ν} – сопротивление фазы обмотки на стороне тяги существующего трансформатора.

Сечение проводов лучей неполной звезды на стороне тяги должно быть в 1/0,882 раза большим сечения фазы обмотки треугольника на стороне тяги существующего трансформатора. Тут 0,882 – отношение тока в фазе обмотки треугольника этого трансформатора по отношению к току плеча.

В итоге сопротивление луча неполных звёзд на стороне тяги симметрирующего трансформатора:

$$R_{\lambda \nu} = \frac{0,882 \cdot 8,2186}{27,5} R_{\nu}.$$

Здесь 8,2186/27,5 – отношение напряжений луча звезды симметрирующего и фазы обмотки треугольника существующего трансформаторов.

В итоге: $R_{\lambda \nu} = 0,264 R_{\nu}$.

Получаем, что потери мощности на стороне тяги симметрирующего трансформатора, приведённые к сопротивлениям фаз обмотки треугольника существующего трансформатора:

$$\Delta P_{\text{ТСТ}} = \frac{2I_{п}^2}{3} (n^2 + 1) 0,518 R_{\nu} +$$

$$2I_{п}^2 (n^2 + 1) 0,264 R_{\nu} =$$

$$0,873 I_{п}^2 (n^2 + 1) R_{\nu}$$

При $n=1$ имеем: $\Delta P_{\text{ТСТ}} = 1,747 I_{п}^2 R_{\nu}$.

Потери на стороне тяги существующего трансформатора:

$$\Delta P_{\nu} = 3(I_{a1\nu}^2 + I_{a2\nu}^2) R_{\nu} =$$

$$0,667 I_{п}^2 (n^2 + 0,5n + 1) R_{\nu}$$

При $n=1$: $\Delta P_{\nu} = 1,668 I_{п}^2 R_{\nu}$.

Для оценки потерь в меди существующего и симметрирующего трансформаторов на первичной стороне введём два допущения: у обоих трансформаторов коэффициент трансформации от первичной обмотки фазы к 27,5 кВ равен 1 и длина витка первичной обмотки равна длине витка вторичной обмотки. Последнее допущение снижает расчётные потери против реальных в первичной обмотке, так как она наматывается на вторичную обмотку и длина её витков большая.

Потери в меди на первичной стороне существующего трансформатора при этих допущениях равны его потерям на стороне тяги, т. е.:

$$\Delta P_{B>} = \Delta P_{\nu} =$$

$$0,667 I_{п}^2 (n^2 + 0,5n + 1) R_{\nu} = 1,668 I_{п}^2 R_{\nu}.$$

Применение симметрирующих трансформаторов по схеме МИИТ обеспечивает:

1. Снижение несимметрии токов (напряжений) на вводах сетей внешнего электроснабжения к ТП в 2,3–3,5 раза, а при равномерной нагрузке сводит её к нулю.

2. За счёт симметрирования токов в симметрирующем трансформаторе снижаются потери в меди обмоток, что при средней нагрузке трансформаторов приводит к экономии свыше 2 млн кВт.ч в год.

3. Применение симметрирующих трансформаторов не требует «винтового» их присоединения к сетям общего назначения и позволяет осуществлять эти присоединения однотипно на всех ТП, оснащённых такими трансформаторами.

ВЫВОДЫ

1. Ограничение несимметрии токов и напряжений на существующих и новых электрифицируемых дорогах переменного тока является экономически весьма значимой проблемой.

2. Разработки МИИТ последних лет в области симметрирующих трансформаторов показывают, что их использование на электрифицируемых линиях по капитальным затратам более целесообразно, чем применение существующих ТТП.

3. Замену на СТТП отработавших свой ресурс ТТП на действующих участках железных дорог лучше всего осуществлять по схеме на рис. 2д, которая позволяет снизить их номинальную мощность за счет внутреннего симметрирующего эффекта на 20–25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамошин Р. Р. Разработка новой системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока повышенного напряжения 94 кВ

с симметрирующим эффектом электрической тяги: Отчет о научно-исследовательской работе. – М.: МИИТ, 2004. – 90 с.

2. Правила устройства электроустановок. – Изд. 7-е. – М.: Энергосервис, 2003. – 421 с.

3. Исследования качества отбора электроэнергии из системы внешнего электроснабжения на тяговой подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча» с симметрирующими трансформаторами типа ТМТНЖ-СМ-25000/110 УХЛ 1. – СПб.: ПГУПС, 2005. – 94 с.

4. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М., 2012. – 20 с.

5. Котельников А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.

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// Железные дороги мира, – 2002. – № 8 – С. 40–45. ●

BALANCING TRANSFORMER OF TRACTION ELECTRIC POWER SUPPLY

Bekrenev, Vassily Yu. – Ph.D. student of the department of electric power supply of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), electrician of Pankov division of electric power supply of Moscow railway, Moscow, Russia.

The author analyzes application of balancing transformers for traction power supply at the electrified railways of JSC Russian Railways, lists positive effects of their operation in AC networks especially under the high voltage of 94 KV at Oktiabrskaya railway. The author formulates the

conclusions and some suggestions concerning operation of balancing transformers, assesses possibilities of such units for the possible use during reconstruction and modernization of AC traction substations, taking into account the requirements for increased labor and electric safety.

Key words: railways, balancing transformer, symmetric effect, power quality, Scott effect, current balancing, rate of unbalance, traction power supply, substation, electrification.

REFERENCES

1. Mamoshin R. R. Engineering of a new system of traction AC power supply of high voltage of 94 KV with balancing effect of electric traction [*Razrabotka novoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka povyshennogo napryazheniya 94 kv s simmetriruyuschim effektom elektricheskoy tyagi*]. Report on research. Moscow, MIIT, 2004, 90 p.

2. Rules of control of electrical units [*Pravila ustrojstva elektroustanovok*]. 7th ed., Energoservis, 2003, 421 p..

3. Study on quality of electrical consumption from external power supply source at traction substation of electric power supply division-85 with balancing transformers of tmtnzshm-25000/110 ukh11 types [*Issledovaniya kachestva otbora elektroenergii iz sistemy vneshnego elektrosnabzheniya na tyagovoj podstantsii eche-85 «nyukhcha» s simmetriruyuschimi transformatorami tipa tmtnzshm-25000/110 ukh11*]. St. Petersburg, PGUPS, 2005, 94 p.

4. State standard 54149.2010 [*GOST R 54149.2010 elektricheskaya energiya. sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obschego naznacheniya*]. Moscow, 2012, 20 p.

5. Kotelnikov A. V. Electrification of railways: world trends and outlook [*Elektrifikatsiya zheleznikh dorog. mirovye tendentsii i perspektivy*]. Moscow, Intext, 2002, 104 p.

6. Vasilyanskiy A. M., Mamoshin R. R., Yyakov G. B. Enhancing systems of electric power supply of railways using AC 27,5 KV [*Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke 27,5 kv, 50 Hz*]. *Zheleznnye dorogi mira*, 2002. Iss. 8, pp. 40–45.

Координаты автора (contact information): Бекренев В. Ю. (Bekrenev V.Yu.) – rayn358@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию / received 01.10.2012
Принята к публикации / accepted 23.11.2012

