

Доктор техн. наук Р. Р. Мамошин

О модернизации системы тягового электроснабжения на переменном токе напряжением 27,5 кВ

Протяженность отечественных железных дорог, электрифицированных по системе переменного тока, превышает 24 тыс. км. На тяговых подстанциях переменного тока установлены трехфазные трансформаторы. Улучшить работу подстанций с такими трансформаторами позволяют симметрирующие трансформаторные приставки.

Анализ работы существующей системы

При электрификации отечественных железных дорог на переменном токе промышленной частоты напряжением 27,5 кВ на тяговых подстанциях практически повсеместно применяли трехфазные трехобмоточные трансформаторы (рис. 1) мощностью 25 или 40 МВ·А. В таком трансформаторе одна из обмоток, соединенная треугольником, с фазными напряжениями 27,5 кВ используется для питания тяги, а вторая напряжением 6, 10 или 35 кВ — для питания районных тяговых потребителей.

Номинальный фазный и линейный токи трансформатора мощностью 40 МВ·А при равномерной нагрузке трех фаз соответственно составляют 485 и 840 А. При несимметричной тяговой нагрузке даже в случае одинаково нагруженных плеч питания токи фаз и плеч равны соответственно 485 и 550 А, а реализуемая мощность подстанции на стороне тяги снижается с 40 до 30,25 МВ·А. В этих условиях фактически возможная перегрузка в 1,5 раза в течение часа уменьшает-

ся с 60 до 45,37 МВ·А, т. е. превышает номинальную нагрузку всего на 5,37, а не на 20 МВ·А.

Вследствие несимметричной нагрузки увеличивается угол сдвига между напряжением и током отстающей фазы, что существенно повышает потери напряжения в этой фазе на участке от источни-

ков энергии до шин 27,5 кВ тяговой подстанции. При допустимой перегрузке в 1,5 раза в течение часа потеря напряжения до шин тяговой подстанции составляет примерно 6,7 кВ.

Несимметричное присоединение тяговых нагрузок к симметричным трехфазным трансформаторам вызывает появление токов обратной последовательности. Коэффициент несимметрии токов (отношение тока обратной последовательности к току прямой последовательности) колеблется в пределах 0,5–1; в самом благоприятном случае, когда

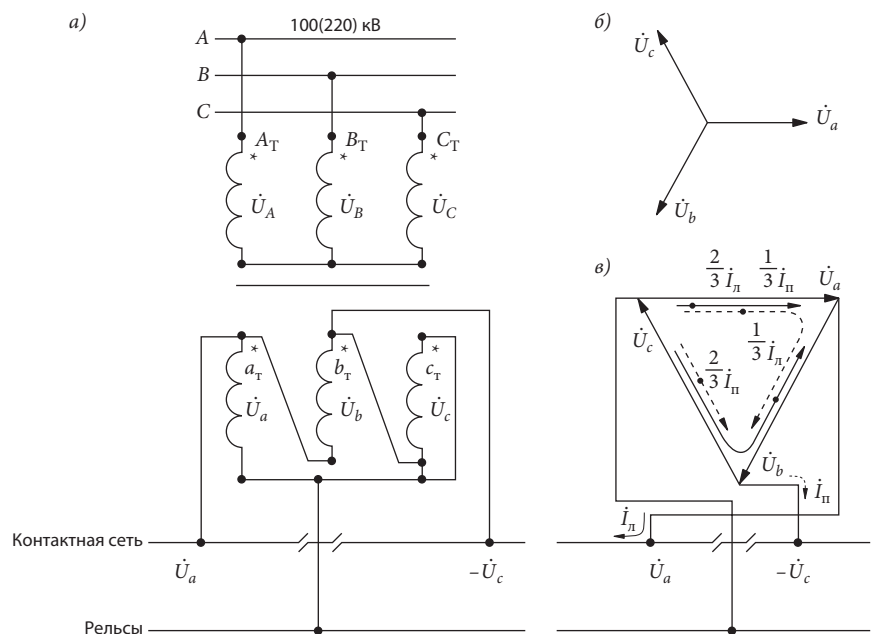


Рис. 1. Схема включения трансформатора (а), векторная диаграмма напряжений фаз (б) и распределение токов в плечах питания (в)

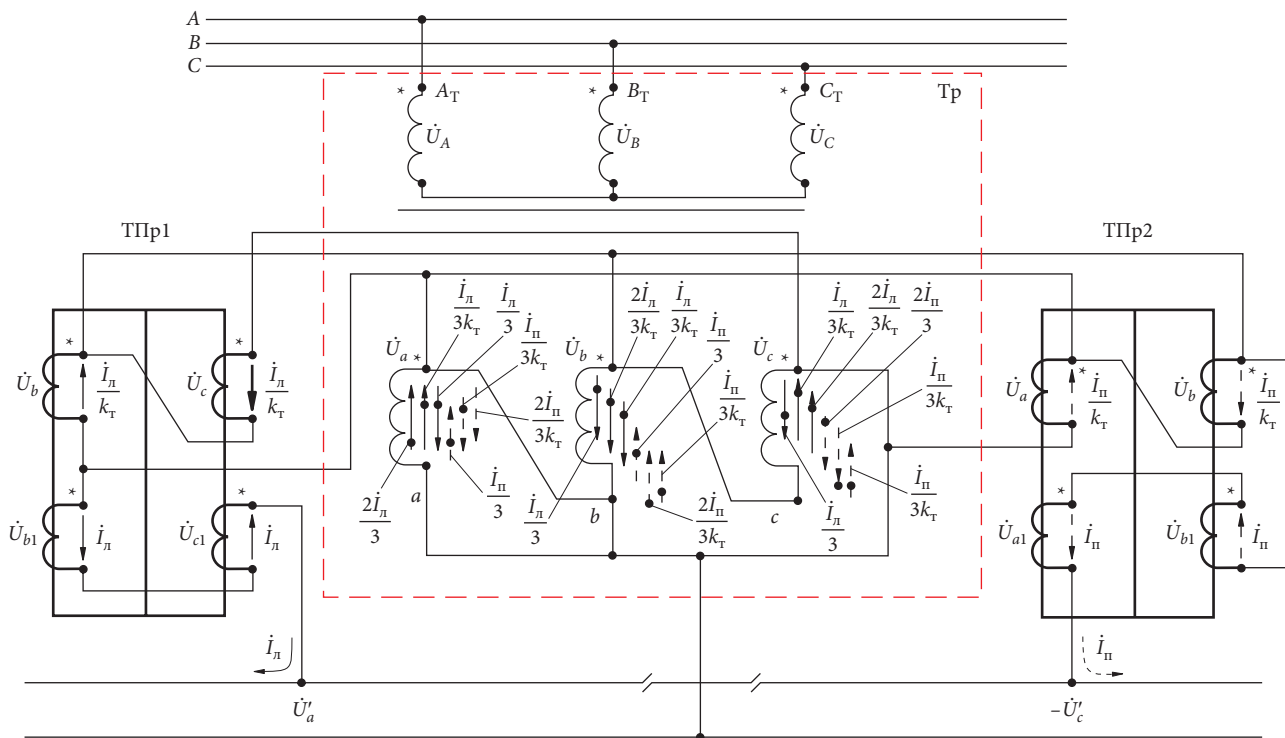


Рис. 2. Схема подключения к трехфазному трансформатору подстанции симметрирующих приставок

токи левого I_n и правого I_n плеч питания одинаковы, он равен 0,5.

Годовые потери энергии в трансформаторах, вызываемые токами обратной последовательности, составляют даже при равной нагрузке плеч до 250 000 кВт·ч.

Токи обратной последовательности приводят к появлению на стороне питающей сети напряжений обратной последовательности, которые в свою очередь формируют коэффициент несимметрии напряжений — один из важнейших показателей качества электрической энергии. В случае превышения этим показателем нормируемого значения на 2% в течение 5% продолжительности суток энергоснабжающие организации применяют штрафные санкции.

Широкое использование пакетных графиков движения поездов массой 4000, 6000, 8000 т и более создает в плечах тяговых подстанций токи 800–1000 А и выше, что приводит к необходимости включать резервные трансформаторы.

При этом железные дороги лишаются резерва, который они всегда должны иметь, как потребители 1-й категории.

Из сказанного следует, что необходимо искать комплексное решение, исключающее перечисленные недостатки существующей системы тягового электроснабжения переменного тока.

Применение симметрирующих трансформаторных приставок

Поиск путей комплексного устранения отмеченных недостатков должен быть направлен на обеспечение симметричного распределения тяговой нагрузки по фазам трансформаторов подстанции и трехфазной сети, от которой они получают питание. Такая постановка задачи подкрепляется тем, что потери мощности в обмотках трансформаторов не превышают 0,15–0,20% их номинальной мощности. Это означает, что поте-

ри мощности в обмотках трансформаторов, пропорциональные квадратам токов, составляют в среднем 0,0225–0,04 потерь, а значит, фактически срок службы трансформаторов будет не 25, а 50 лет. При таких условиях нет необходимости заменять трансформаторы, срок службы которых далеко не исчерпан, а следует создать для них новые условия работы. Это можно обеспечить, применив две симметрирующие трансформаторные приставки (ТПр1 и ТПр2 на рис. 2).

Первичные обмотки трансформаторных приставок соединены по схеме открытого треугольника, а вторичные — неполной звезды. На первичные обмотки приставки ТПр1 подаются фазовые напряжения U_b и U_c от тяговой обмотки трансформатора, а ее вторичные обмотки включены в рассечку вывода фазы a левого плеча питания подстанции. Первичные обмотки приставки ТПр2 получают питание от фаз a и b тяговой обмотки трансформатора, а вторичные включены

в расщелку вывода с правого питающего плеча подстанции.

Напряжение лучей неполных звезд обеих приставок выбирают с таким расчетом, чтобы углы между напряжениями U'_a и U_a , а также между $-U'_c$ и $-U_c$ составляли по 15° (рис. 3). Для этого напряжения лучей неполных звезд должны быть равны 4,254 кВ. Коэффициент трансформации приставки в этом случае

$$k_T = 27,5/4,254 = 6,46.$$

Трансформатор с приставками обладает эффектом Скотта, а токи фаз в его тяговой обмотке можно выразить следующим образом (см. рис. 3):

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= 0,667\dot{I}_n + 0,178\dot{I}_n; \\ \dot{I}_b &= -0,488\dot{I}_n + 0,488\dot{I}_n; \\ \dot{I}_c &= -0,178\dot{I}_n - 0,667\dot{I}_n. \end{aligned}$$

При $I_n = I_n$ токи в фазах трансформатора подстанции составляют симметричную и уравновешенную звезду.

Токи прямой и обратной последовательностей по модулю:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= 0,345I_n(n+1); \\ I_{a2} &= 0,345I_n(n-1), \end{aligned}$$

где $n = I_n/I_n$.

Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности

$$K_{2I} = I_{a2}/I_{a1} = (n-1)/(n+1).$$

Из зависимости $K_{2I(n)}$ для трансформаторов с симметрирующими приставками (кривая 1 на рис. 4) следует, что при значении n , находящемся в диапазоне от 0,75 до 1,25, коэффициент несимметрии токов снижается в 5–7 раз, а при $n = 1$ становится равным нулю. При тех же условиях и одинаковой нагрузке плеч питания потери мощности от токов обратной последовательности равны нулю.

В случае номинальной нагрузки фазной обмотки (ток $I_{\phi \text{ ном}}$) трансформатора мощностью 40 МВ·А и

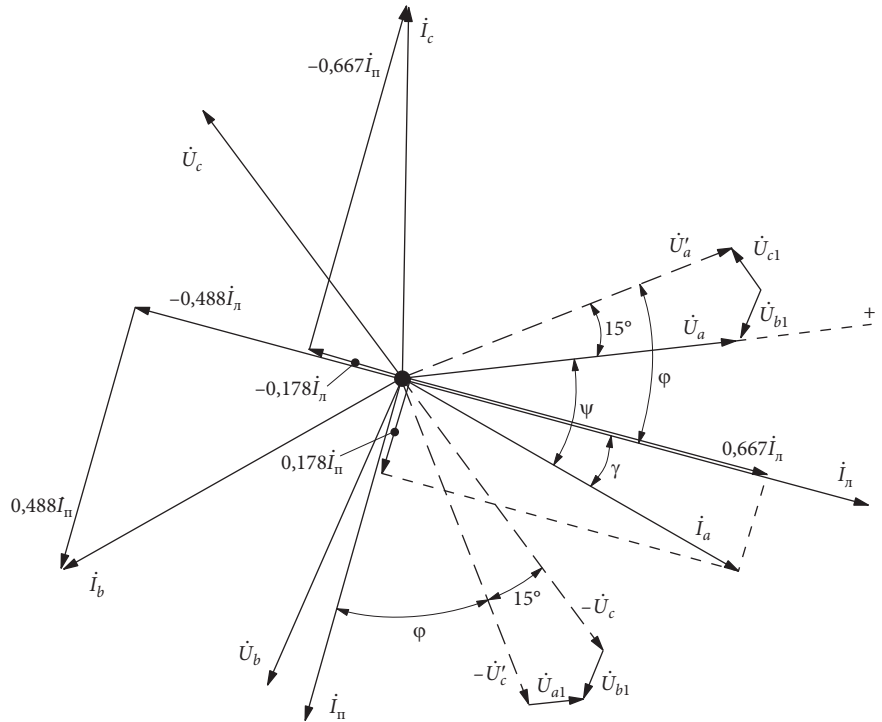


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов в тяговой обмотке трансформатора при наличии симметрирующих приставок

наличия приставок реализуемый ток плеча

$$I_{пл} = I_{\phi \text{ ном}} / 0,69 = 485 / 0,69 = 703 \text{ А},$$

где 0,69 — соотношение токов фазы и плеча.

Реализуемая мощность трансформатора при номинальной нагрузке плеч (или фазных обмоток)

$$\begin{aligned} S_{Т \text{ ном}} &= 2I_{пл} U_{пл} = 2 \cdot 703 \cdot 27,5 = \\ &= 38,667 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

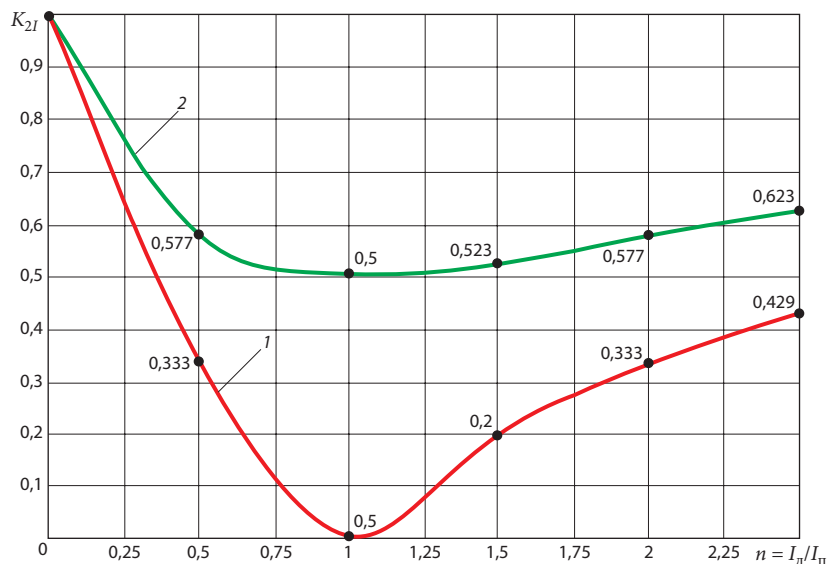


Рис. 4. Зависимость $K_{2I(n)}$ для трансформаторов с симметрирующими приставками (кривая 1) и без них (кривая 2)

Это составляет 96,67% номинальной мощности трансформатора. Максимальный допустимый ток плеча в случае перегрузки в 1,5 раза в течение часа равен $1,5 \cdot 703 = 1055$ А, что позволяет пропускать пакеты поездов без подключения резервного трансформатора в предельном режиме.

Режим работы по напряжению и току на шинах 27,5 кВ характеризуют следующие данные:

при отсутствии симметрирующих трансформаторных приставок — номинальный ток плеча — 550 А; максимальный ток плеча — 825 А; потеря напряжения до шин 27,5 кВ при номинальном токе плеча — 4,8 кВ;

то же при максимальном токе плеча — 7,2 кВ;

напряжение на шинах 27,5 кВ при номинальном токе плеча — 22,7 кВ;

то же при максимальном токе плеча — 20,2 кВ;

при наличии симметрирующих трансформаторных приставок — расчетный ток плеча (фазы) — 550 (379,5) А;

максимальный ток плеча (фазы) — 825 (569) А;

потеря напряжения до шин 27,5 кВ при расчетном токе плеча — 2,25 кВ;

то же при максимальном токе плеча — 3,8 кВ;

напряжение на шинах 27,5 кВ при токе плеча 550 А — 25,2 кВ;

то же при токе плеча 825 А — 23,6 кВ.

Таким образом, как установлено расчетами, применение симметрирующих приставок при максимальном токе плеча 825 А позволяет повысить напряжение на шинах 27,5 кВ на 3,4 кВ.

Трансформатор с симметрирующей приставкой в течение четырех лет успешно работает на подстанции Нюхча Северной дороги. Испытания показали, что это позволило повысить напряжение в контактной сети на 2,5–3 кВ, снизить потери мощности на подстанции, повысить надежность ее параллельной работы на межподстанционной зоне.

Заключение

Сравнение характеристик тяговой подстанции при отсутствии и наличии симметрирующих трансформаторных приставок показывает, что в результате применения этих приставок оказывается возможным:

- повысить у трансформатора с номинальной мощностью 40 МВ·А используемую мощность с 30,25 до 38,7 МВ·А, т. е. на 8,45 МВ·А, что позволяет не подключать на параллельную работу второй трансформатор даже при токах плеч 1100–1150 А и сохранять его в резерве, как это требуется для потребителей 1-й категории;

• обеспечить симметрирование нагрузок фаз на двухпутных участках с развернутой длиной межподстанционной зоны 80–110 км;

• снизить потери мощности (энергии) от токов обратной последовательности в 3–4 раза;

• существенно сократить потери напряжения на участках между источниками энергии и шинами 27,5 кВ тяговых подстанций благодаря уменьшению модулей токов фаз и углов между векторами напряжений и токов фаз.

Следует отметить, что большой парк трансформаторов на тяговых подстанциях переменного тока, обслуживающих участки протяженностью свыше 24 тыс. км, используется по номинальной мощности в среднем на 15–20%; трансформаторы могут работать еще минимум 15–25 лет без замены. Более целесообразно использовать их с симметрирующими приставками, которые придают существующим трансформаторам ряд новых свойств.

Капитальные затраты на две симметрирующие приставки совместно с коммутационной аппаратурой составляют около 11 млн. руб.; их окупаемость благодаря повышению использования мощности трансформаторов, симметрирующему эффекту, снижению потерь мощности и потерь напряжения составит не более 1,5–2,0 лет.

Редакция журнала

«Железные дороги мира»

приглашает на внештатную работу переводчиков с английского, немецкого и французского языков, имеющих опыт работы на железнодорожном транспорте и проживающих в Москве или Московской области.

Обращаться по телефону (499) 317-55-65 или по электронной почте zdm@css-rzd.ru.