

Проблемы качества электроснабжения промышленных потребителей от обмотки среднего напряжения тяговых подстанций переменного тока

Дмитрий Алексеевич БОСЫЙ¹

Резюме

Работа тяговых подстанций переменного тока предусматривает значительные искажения качества электрической энергии. Прежде всего от некачественной электроэнергии страдают промышленные потребители, которые питаются от обмотки среднего напряжения тягового трансформатора. Проведенные результаты измерений подтверждают теоретически известные проблемы с качеством напряжения, а именно завышение напряжения в одной из фаз, различие напряжений на соседних подстанциях, перекос трехфазной системы векторов напряжения. Анализ известных способов симметрирования основанных на эффекте Скотта показал, что допущение о равенстве углов нагрузки в плечах питания вносит значительную погрешность в определение симметрирующего эффекта, которого не достаточно для обеспечения требований стандарта касательно несимметрии напряжений. Предлагается техническое решение, которое заключается в усовершенствовании устройств плавной компенсации реактивной мощности и позволяет обеспечить нормируемое значение коэффициента несимметрии напряжения одновременно со снижением перетоков реактивной мощности.

Ключевые слова: тяговая подстанция, переменный ток, напряжение, несимметрия, реактивная мощность, компенсация

1. Введение

Тяговые подстанции электрифицированных железных дорог переменного тока Украины выполняют преобразование электрической энергии с помощью трехобмоточных трансформаторов. Целью их применения было одновременное питание разветвленных районных сетей и мощной однофазной

¹ Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: dake@i.ua.

тяговой нагрузки. Очевидное снижение капитальных затрат при массовой электрификации не учитывало возможные нарушения качества электрической энергии непосредственно у районных потребителей. Наиболее значимыми из нормируемых показателей качества для тяговых подстанций переменного тока являются: отклонение напряжения, несимметрия напряжений и искажение синусоидальности напряжения.

У потребителей, которые питаются от районной обмотки тягового трансформатора, чаще всего возникает завышенное значение напряжения в сети. Это вызвано необходимостью поддержания минимального напряжения в контактной сети на лимитирующем блок-участке для обеспечения необходимого уровня пропускной способности системы электроснабжения участка железной дороги.

В некоторых случаях, в зависимости от разветвленности электрических сетей и особенностей схем питания контактной сети, практически невозможно обеспечить одновременно минимальный уровень напряжения в контактной сети и соблюдение нормируемых показателей качества для нетяговых потребителей относительно режимов напряжения. Проблема усугубляется моральным и физическим износом устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях. Для регулирования напряжения применяются устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), принцип действия которых основан на переключении анцапф первичной обмотки тягового трансформатора. Изменение количества рабочих витков обмотки 110 (154) кВ приводит к изменению режима напряжения и в двух других обмотках 35 (10) и 27,5 кВ.

На подстанциях, которые питали участки с относительно небольшими размерами движения, устройства РПН практически не переключались, и при увеличении размеров движения или изменении режима работы системы внешнего электроснабжения, регулирование напряжения может привести к выходу из строя тягового трансформатора, остановки поездов и обесточивания большого количества потребителей.

В условиях эксплуатации выбор режима напряжения на тяговых подстанциях выполняется в интересах обеспечения безопасности движения поездов и поддержании уровня напряжения на лимитирующих блок-участках с запасом. Одним из важнейших показателей режима работы электроэнергетической системы, который непосредственно влияет на качество электрической энергии, надежность электроснабжения потребителей и экономичность работы системы электроснабжения является напряжение.

Целью данной статьи является анализ текущего состояния качества напряжения на районной обмотке трансформаторов тяговых подстанций переменного тока и разработка технического предложения для снижения уровня

несимметрии напряжений с помощью плавно регулируемой компенсации реактивной мощности.

2. Методика проведения измерений и результаты

Измерения выполнялись в соответствии с разработанной и утвержденной программой на протяжении 24 часов с дискретизацией записи равной 1 с. Использовалось несколько однотипных анализаторов мощности PM175 производства компании Satec, которые соответствующим образом синхронизировались во времени. Подключение измерительных приборов выполнялось во вторичные цепи трансформаторов тока и напряжения в соответствии с разработанной типовой схемой (рис. 1).

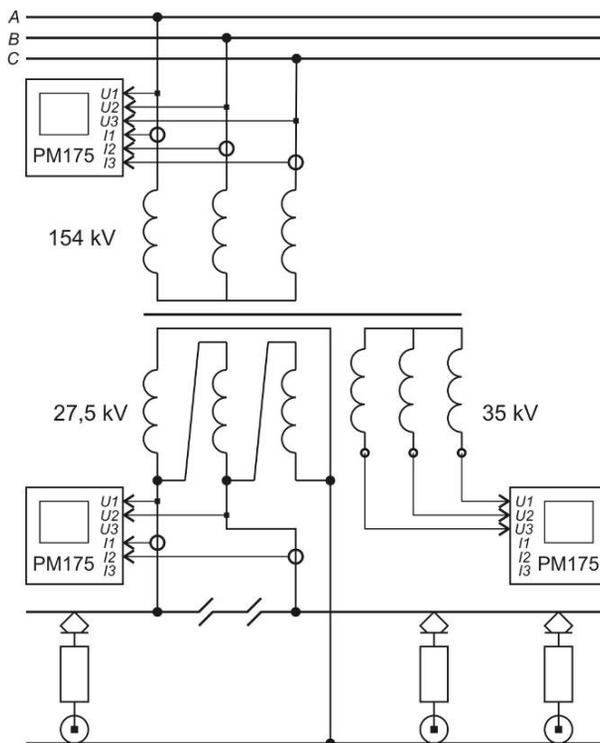


Рис. 1. Типовая схема измерения показателей качества на тяговой подстанции переменного тока

На рисунке 2 приведены регистрограммы напряжений в первичной сети 154 кВ тяговых подстанций. Анализ этих данных показывает, что вследствие потерь в системе внешнего электроснабжения напряжение в первич-

ной сети двух подстанций различные, кроме того явно видно завышение напряжения в одной из фаз первой подстанции (рис. 2).

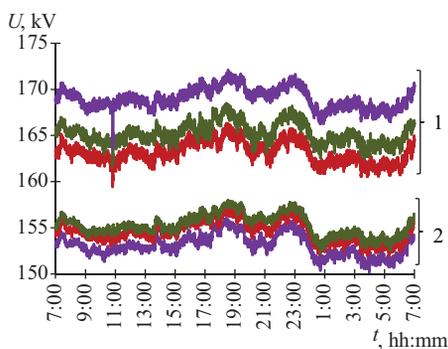


Рис. 2. Уровни напряжений в каждой фазе первичной сети 154 кВ двух тяговых подстанций

Благодаря устройствам РПН, режим напряжения на остальных присоединениях 35 и 27,5 кВ удается практически выровнять, но только для одного уровня напряжения (рис. 3).

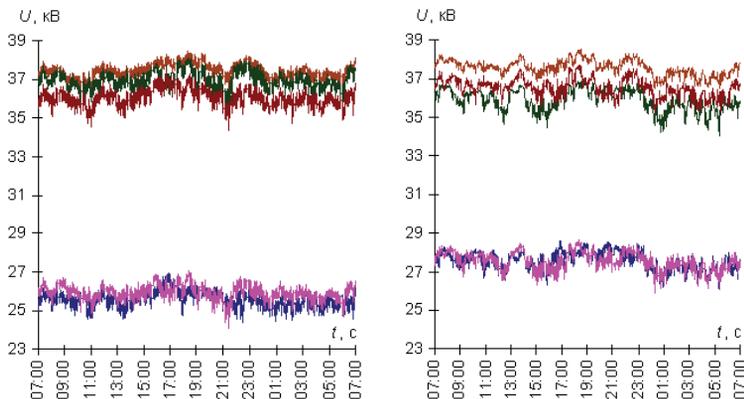


Рис. 3. Уровни напряжений в каждой фазе районной 35 кВ и тяговой 27,5 кВ сетей

Как видно из рисунка 3, уровень напряжений в сети 35 кВ разных тяговых подстанций практически одинаков, а в сети 27,5 кВ ввиду работы подстанций на одну зону и разности напряжений будут возникать уравнивающие токи, приводящие к дополнительным потерям мощности.

Результаты наблюдений за коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности приведены на рисунке 4. Требования стандарта по данному показателю может выдерживаться только в первичной

сети, в районной сети – суммарная длительность превышения нормально допустимого значения всегда больше 5% рассматриваемого интервала времени.

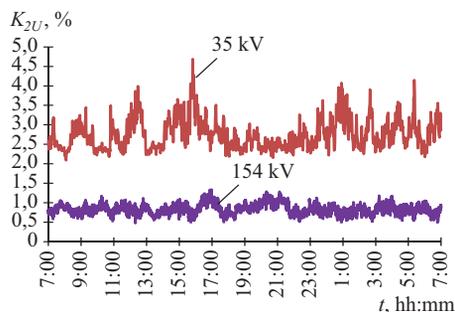


Рис. 4. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности на разных присоединениях

Максимальное значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности зафиксировано на районной обмотке 35 кВ и составляет 4,7%.

Поясняющими причину возникновения несимметрии напряжений и показательными являются поля распределений концов векторов первичных токов, которые построены относительно фаз своих напряжений (рис. 5).

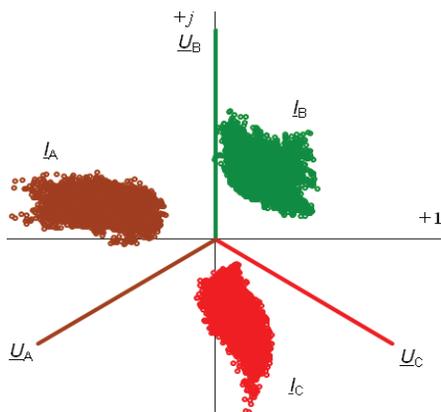


Рис. 5. Поля распределений концов векторов токов относительно фаз напряжений в первичной сети тяговых подстанций

Исходя из приведенных распределений, видно, что даже в среднем первичные токи не образуют симметричную систему векторов, а значит, являются причиной перекоса напряжений на всех уровнях напряжений.

3. Анализ эффективности существующих устройств симметрирования

Основным принципом работы симметрирующих устройств, является эффект Скотта, который заключается в симметричной нагрузке первичной системы электроснабжения при ортогонализации токов и напряжений плеч питания тяговой подстанции. Эффективность внедрения симметрирующих устройств принято определять на основе зависимостей коэффициента несимметрии токов обратной последовательности в первичной обмотке трансформатора соотношению токов в плечах питания тяговой подстанции при условии равенства углов нагрузки согласно формулам [4]:

– для традиционной схемы

$$K_{2I} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1} \cdot 100, \quad (1)$$

– для схемы с эффектом Скотта

$$K_{2I} = \frac{n - 1}{n + 1} \cdot 100, \quad (2)$$

где $n = I_E / I_I$ – соотношение токов плеч питания.

Поскольку углы нагрузки в плечах питания тяговой подстанции переменного тока не равны между собой, что показывает анализ результатов экспериментальных исследований, то возникает расхождение в определении коэффициентов несимметрии. Так, с учетом различия углов в плечах питания подстанции, наблюдаются превышения теоретически возможных значений для традиционной схемы подключения У/Д-11 и схемы Скотта (рис. 6).

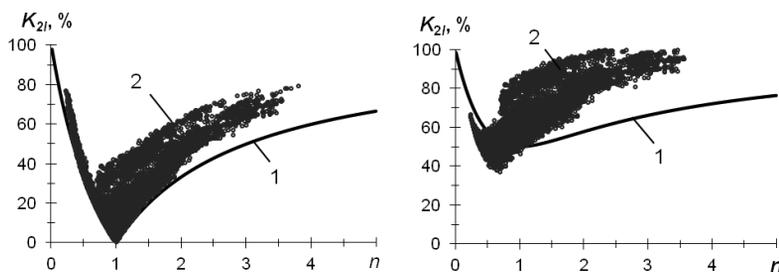


Рис. 6. Возможные значения коэффициентов несимметрии для традиционной схемы и схемы Скотта: 1) с допущением; 2) реальные значения

Из сравнения интегральных кривых распределений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности (рис. 7) следует, что применение симметрирующих устройств, построенных на эффекте Скотта, позволяет наиболее снизить несимметрию напряжения тяговой подстанции по сравнению с различными режимами компенсации реактивной мощности. Однако даже при такой схеме питания тяговой сети нормы стандарта [3] по коэффициенту могут не соблюдаться. Кроме этого, применение симметрирующих устройств не решает проблемы перетоков реактивной электроэнергии, наличие которых снижает эффективность системы электроснабжения.

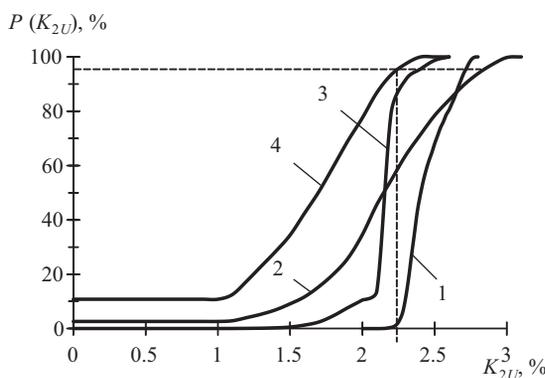


Рис. 7. Интегральные функции распределений плотностей вероятностей: 1) без компенсации; 2) нерегулируемая компенсация; 3) автоматически регулируемая; 4) схема Скотта

4. Снижение несимметрии с помощью плавнорегулируемой компенсации реактивной мощности

На тяговой подстанции переменного тока предлагается применить регулируемые устройства компенсации реактивной мощности в обоих плечах питания с усовершенствованной системой автоматического управления (рис. 8). В качестве входных величин в системе управления выступают мгновенные значения токов и напряжения плеч питания и коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности районной сети, которые получают на выходе фильтра напряжения обратной последовательности (ФНОП). Выходными величинами являются импульсы управления бисторными регуляторами в контурах декомпенсирующих реакторов. Импульсы управления формируются системой импульсно-фазового управления синхронно с напряжением соответствующего плеча питания на основе

численного значения угла управления, которое в свою очередь получается на выходе PID-регулятора.

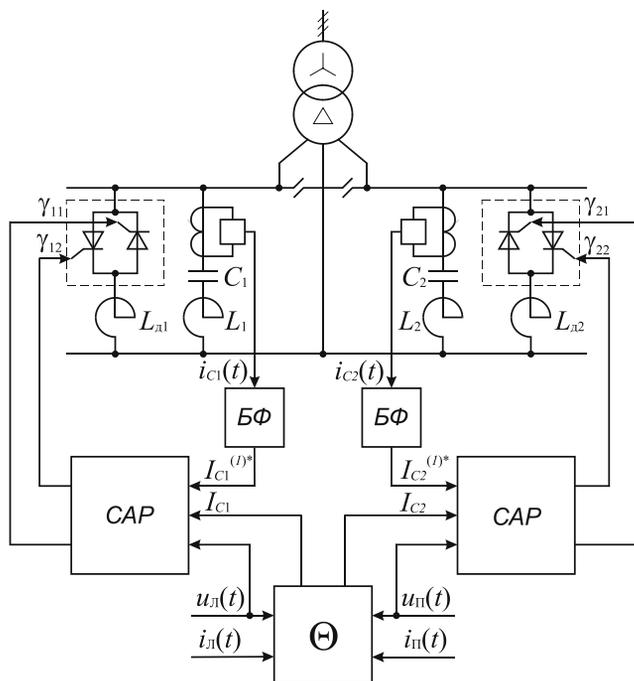


Рис. 8. Схема включения плавно регулируемого устройства компенсации реактивной мощности

Токи компенсации в левом и правом плечах питания вычисляются специальной подсистемой (рис. 9) по разработанной методике и конечной формуле (3). На вход подсистемы подаются мгновенные значения токов и напряжений плеч питания. Блоки формирования (БФ), выделяют основные гармоники тока и напряжения, определяют соответствующие углы сдвига фаз. Основные гармоники токов плеч питания формируют транспонированной вектор токов. Углы плеч питания соответствующим образом формируют квадратную матрицу. После выполнения матричной операции умножения и увеличения произведения коэффициентом, на выходе подсистемы получаем рациональные значения токов компенсации.

$$I_C = \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{vmatrix} I_{\bar{E}} \\ I_{\bar{I}} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} 2\sqrt{3} \sin \varphi_{\bar{E}} + \cos \varphi_{\bar{E}} & -\cos \varphi_{\bar{E}} \\ \cos \varphi_{\bar{I}} & 2\sqrt{3} \sin \varphi_{\bar{I}} - \cos \varphi_{\bar{I}} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

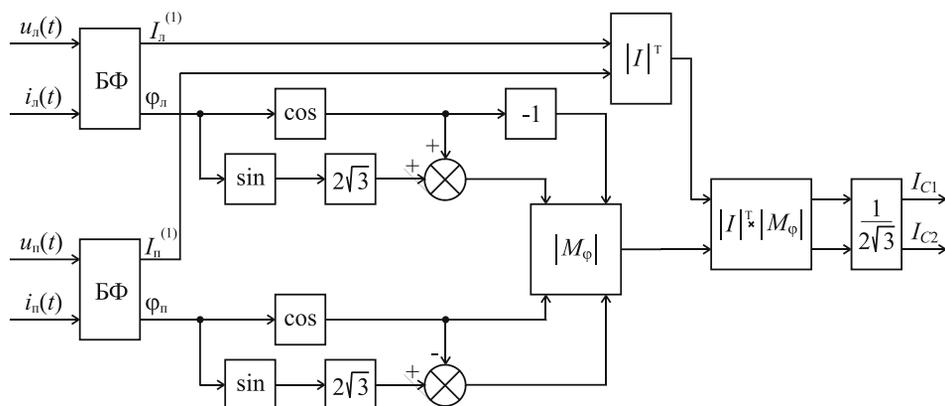


Рис. 9. Подсистема определения токов компенсации

5. Выводы

Повышение качества электроэнергии для потребителей, которые питаются от систем электрической тяги переменного тока наиболее целесообразно с помощью компенсации реактивной мощности непосредственно на тяговых подстанциях. Значительного эффекта в симметрировании можно достичь использованием автоматического регулирования мощности компенсирующих устройств с усовершенствованным алгоритмом управления.

Применение в алгоритме управления регулируемой компенсацией аналитического выражения определения рациональных токов компенсации реактивной мощности и последующим использованием такого усовершенствованного алгоритма в разработанной системе автоматического оптимального управления устройством компенсации обеспечивает уменьшение коэффициента несимметрии до значений, удовлетворяющих требованиям стандарта.

Литература

1. Bollen, M.H.J.: *Signal Processing of Power Quality Disturbances* / M. H. J. Bollen, I.Y.H. Gu. – Piscataway, NJ, IEEE Press, 2006, 861 p.
2. Босый Д.А.: *Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму* / Д. А. Босый // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2010, № 1, 24–32.
3. ГОСТ 13109–97: *Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения*, В замен ГОСТ 13109–87; Введ. 01.01.1999. – К.: Госстандарт Украины, 1999, 35 с.
4. Марквардт К.Г.: *Энергоснабжение электрифицированных железных дорог* / К.Г.Марквардт, М.: Транспорт, 1982, 528 с.
5. Сиченко В.Г.: *Аналіз режимів напруги на присіднаннях тягових підстанцій змінного струму* / В.Г. Сиченко, Д.А. Босый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. Трансп, 2009, Вип. 29, 82–87 с.

Problemy jakości zasilania konsumentów przemysłowych z uzwojenia średniego napięcia podstacji trakcyjnych prądu przemiennego

Streszczenie

W pracy podstacji trakcyjnych prądu zmiennego może występować znaczące pogorszenie jakości energii elektrycznej. Z powodu obniżenia jakości energii elektrycznej, straty ponoszą przede wszystkim odbiorcy przemysłowi zasilani z uzwojenia średniego napięcia transformatora trakcyjnego. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają teoretycznie znane problemy z jakością napięcia, a mianowicie zawyżenie napięcia w jednej z faz, różnicę napięć na sąsiednich podstacjach, odchylenie trójfazowego układu wektorów napięcia. Analiza znanych metod symetryzacji opartych na zjawisku Scotta wykazała, że założenie o równości kątów obciążenia w odcinkach zasilania, powoduje znaczący błąd w określeniu zjawiska symetryzującego, które nie jest wystarczające do spełnienia wymagań normy w zakresie asymetrii napięć. Zaproponowano rozwiązanie techniczne, które polega na udoskonaleniu urządzeń do ciągłej kompensacji mocy biernej i zapewnia normowaną wartość wskaźnika asymetrii napięcia przy jednoczesnym zmniejszeniu przepływów mocy biernej.

Słowa kluczowe: podstacja trakcyjna, prąd zmienny, napięcie, asymetria, moc bierna, kompensacja

The Problems of Power Quality for Industrial Consumers Fed on the Medium-voltage Winding from AC Traction

Summary

Working of AC traction substations involves significant distortion of the quality of electric energy. First of all, suffer from poor quality of electric power, industrial consumers, which feed on the medium-voltage winding of the traction transformer. Conducted measurements confirm the theory known problems with the quality of voltage that is overstating the voltage in one phase, the difference between the substations, wry three-phase system voltage vectors. Analysis of the known methods of balancing based on the Scott effect showed that the assumption of the equality of the angles at the shoulders load power is making a significant error in the determination of the symmetry effect, which is not enough to ensure the standard requirements regarding voltage unbalance. The proposed solution, which is to improve the devices continuously reactive power compensation and allows normal coefficient of voltage unbalance simultaneously with a reduction in reactive power flows.

Keywords: traction substation, alternating current, voltage, unbalance, reactive power, compensation