

Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока

Л. А. GERMAN

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» в Нижнем Новгороде (филиал ФГБОУ ВО СамГУПС в Нижнем Новгороде), Нижний Новгород, 603011, Россия

Аннотация. Дана сравнительная характеристика плавно регулируемой и ступенчато регулируемой (переключаемой) фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ) в тяговой сети железных дорог переменного тока. Проведены технико-экономические расчеты по повышению пропускной способности и снижению потерь электроэнергии. Доказана эффективность переключаемой ФКУ с учетом специфики тяговой нагрузки.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующая установка; переключаемая установка; технико-экономические расчеты; пропускная способность; потери электроэнергии

Необходимость регулирования мощности установок в тяговой сети. Установки поперечной емкостной компенсации, содержащие фильтр на 150 Гц и по существу являющиеся фильтрокомпенсирующими установками, стали применяться в системе тягового электроснабжения еще в 1960 г. [1]. В ГОСТ 32895–14 [2] указано: «...фильтрокомпенсирующее устройство (в системах тягового железнодорожного электроснабжения переменного тока): Устройство компенсации реактивной мощности, обладающее дополнительной функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока железнодорожного электроподвижного состава». Главная задача фильтра в ФКУ — не допускать усиления высших гармонических составляющих тока, генерируемых электроподвижным составом.

Первоначально ФКУ устанавливались на тяговых подстанциях для выполнения требования энергоснабжающих организаций по компенсации реактивной мощности, и мощность ФКУ определялась по «разности тангенсов»

$$Q_{кв1} = P(\operatorname{tg}\varphi_{\phi} - \operatorname{tg}\varphi_{н}), \quad (1)$$

где P — активная мощность, потребляемая в часы больших суточных нагрузок электрической сети; $\operatorname{tg}\varphi_{\phi}$ — фактическое значение коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети; $\operatorname{tg}\varphi_{н}$ — предельное значение коэффициента реактивной мощности, потре-

бляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети.

Позже ФКУ стали устанавливать на постах секционирования контактной сети переменного тока с целью реализации дополнительных функций: повышения уровня напряжения и снижения потерь электроэнергии в тяговой сети [3]. В 2011 г. введена в действие «Инструкция о порядке выбора параметров и мест размещения установок продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока» [4], где устанавливались новые правила расчета мощности ФКУ для соблюдения заданной пропускной способности межподстанционной зоны тяговой сети. В 2015 г. эту инструкцию заменил новый стандарт СТО [5], использующий основные положения указанной инструкции, в которой мощность ФКУ определяется как

$$Q_{кв2} = U_{\text{ном}}^2 (U_{\text{мин норм}} - U_{\text{фэ}}) / (U_{\text{мин норм}} X_{\text{вх}}), \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение ФКУ; $U_{\text{мин норм}}$ — минимальное допустимое напряжение на токоприемнике; $U_{\text{фэ}}$ — фактическое минимальное напряжение на токоприемнике; $X_{\text{вх}}$ — входное индуктивное сопротивление системы электроснабжения до ФКУ.

В [5] указано: «Минимальное допустимое напряжение на токоприемнике электроподвижного состава принимают равным 21 кВ (среднее значение за 3 минуты), а для расчетных участков с максимальной скоростью движения пассажирских поездов свыше 160 км/ч — равным 24 кВ (среднее значение за 1 минуту)». По всей видимости, в это СТО целесообразно было бы добавить норматив в 19 кВ, т. е. там, где разрешено на токоприемнике минимальное напряжение, также применять формулу (2) для расчета мощности ФКУ с целью повышения напряжения.

Значения мощностей ФКУ, рассчитываемые по выражению (2), в 1,5–2 раза превосходят величины мощности, полученные по формуле (1), и поэтому при снижении тяговой нагрузки в межподстанционной зоне повышается напряжение на шинах ФКУ и

■ E-mail: lagerman@mail.ru (Л. А. Герман)

при достижении 29 кВ ФКУ аварийно отключается. Таким образом, при повышенных мощностях ФКУ, в частности более 4–5 Мвар, существенно повышается вероятность их аварийных отключений. При одностороннем питании тяговой сети, что нередко наблюдается в связи с ремонтными работами и другими обстоятельствами, напряжение на ФКУ повышается на 2–3 кВ, и тогда вероятность аварийного отключения ФКУ резко возрастает.

По опыту проектирования и эксплуатации на постах секционирования устанавливают ФКУ, как правило, мощностью 3–5 Мвар, которая рассчитывается по формуле (2) при нормативном значении $U_{\text{мин норм}} = 21$ кВ. Однако при нормативе напряжения в контактной сети 24 кВ [5] указанная мощность возрастает примерно в два раза, т. е. до 6–10 Мвар. Если по каким-либо причинам, допустим с целью повышения скоростей пассажирских поездов, напряжение на шинах ФКУ повысить, например до $U_{\text{мин норм}} = 27,5$ кВ, то мощность ФКУ необходимо будет увеличить до 9–15 Мвар. Исходя из вышеприведенного анализа, предлагается формировать следующее техническое решение по типу ФКУ на постах секционирования: ФКУ в тяговой сети мощностью более 4–5 Мвар должны быть регулируемы.

Повышение пропускной способности железной дороги. При включении ФКУ на посту секционирования повышается напряжение в тяговой сети всей межподстанционной зоны и, соответственно, на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС), что приводит к повышению скорости его движения, т. е. к увеличению пропускной способности. Техничко-экономический эффект от увеличения пропускной способности участка определяется следующим образом:

1. По программе КОРТЭС производится расчет снижения интервала попутного следования поездов в связи с установкой ФКУ. (КОРТЭС — комплекс программ для расчетов систем тягового электроснабжения. Разработчик АО «ВНИИЖТ», 2002–2014 гг.)

2. Определяется время хода поездов, акцентируя внимание на время хода тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне при отключенном ФКУ (t_1) и при включенном ФКУ (t_2). Рассчитывается разность времен $\Delta t = t_1 - t_2$.

3. Рассчитываются затраты на пропуск тяжеловесного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне по нормативному документу [6]. На основании распоряжения старшего вице-президента ОАО «РЖД» В. В. Михайлова № 675р от 7 апреля 2017 г. «Об утверждении расходных ставок и оценочных уровней затрат для экономических задач» стоимость поезд-часа в грузовом движении (электротяга) для Горьковской железной дороги (для оценки изменения скорости движения) составляет — 8441,35 руб.

4. Выполняется расчет экономии денежных средств в связи с уменьшением времени хода тяжеловесного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{пр}} = \Delta t N_{\text{год}} m C / 60, \text{ руб.}, \quad (3)$$

где Δt — разность времен хода тяжеловесного поезда с ФКУ и без ФКУ, мин; $N_{\text{год}}$ — число суток в году (365); m — число тяжеловесных поездов в сутки; C — стоимость поезд-часа тяжеловесного поезда, руб.

Снижение потерь мощности. Недостаточная эффективность ФКУ поста секционирования по снижению потерь мощности в тяговой сети определяется тем, что она не может полностью скомпенсировать реактивный ток ЭПС, так как подвижной состав, во-первых, расположен на некотором расстоянии от поста секционирования (ПС) и, во-вторых, его ток распределяется между подстанцией и ПС. Поэтому ФКУ ПС компенсирует только часть реактивной составляющей тяговой нагрузки.

Степень снижения потерь мощности как отношение средних потерь мощности в тяговой сети от реактивной нагрузки с ФКУ и без нее определяется по следующему выражению [7]:

$$\delta = 1 - \delta P_c / \Delta P_p, \quad (4)$$

где δP_c — изменение средних потерь мощности при включении ФКУ; ΔP_p — средние потери мощности в тяговой сети от реактивных токов без ФКУ.

Нагрузка в тяговой сети, как правило, возрастает с увеличением пропускной способности железной дороги. По выражению (4) выполнены расчеты эффективности ФКУ (в зависимости от степени пропускной способности): для нерегулируемой, плавно регулируемой и одноступенчатой ФКУ и для участков с двухсторонним и односторонним питанием. Сравнительный анализ кривых регулируемых и нерегулируемых ФКУ показывает следующее [7]:

1. При степени пропускной способности $0,2 \leq N/N_0 \leq 0,7$ (N — фактическое число пар поездов в сутки; N_0 — максимально возможное число пар поездов в сутки) дополнительное снижение потерь мощности регулируемыми ФКУ по сравнению с нерегулируемыми для однопутного участка δ составит от 38 до 15%, а для двухпутного — от 25 до 7%. При этом следует учесть, что при малой пропускной способности обычно нагрузка сравнительно небольшая, и поэтому вряд ли целесообразно в этом случае использовать плавно регулируемую ФКУ.

2. С увеличением интенсивности движения эффект применения регулируемых ФКУ уменьшается, и при степени пропускной способности $0,7 < N/N_0 < 0,8$ дополнительное снижение потерь мощности на двухпутном участке не превышает 5–7%. Это значит, что

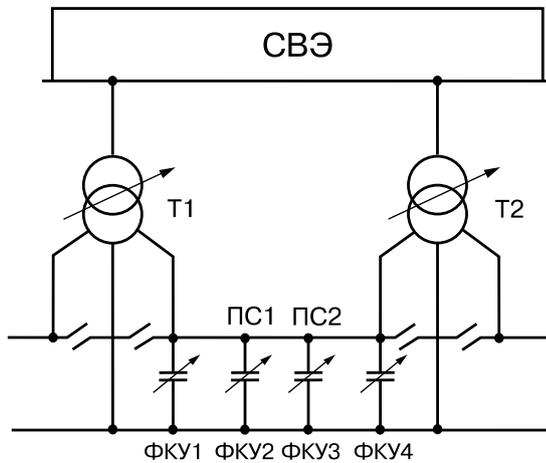


Рис. 1. Распределенная система ФКУ в тяговой сети: СВЭ — система внешнего электроснабжения; T1 и T2 — тяговые трансформаторы смежных подстанций; ФКУ1 и ФКУ4 расположены на тяговых подстанциях; ФКУ2 и ФКУ3 расположены на постах секционирования PC1 и PC2

Fig. 1. Distributed system ФКУ (FCI) in traction network: СВЭ — external power supply system; T1 and T2 — traction transformers of adjacent substations; ФКУ1 (FCI1) and ФКУ4 (FCI4) are located at the traction substations; ФКУ2 (FCI2) and ФКУ3 (FCI3) are located at PC1 and PC2 sectioning posts

в этом случае плавно регулируемые ФКУ практически не имеют существенного преимущества перед нерегулируемыми.

3. Следует обратить внимание на высокую эффективность одноступенчатой регулируемой ФКУ, когда включается-отключается вся мощность ФКУ, при этом необходимо учитывать, что дополнительные капитальные вложения на осуществление одноступенчатого регулирования сравнительно невелики.

Таким образом, для регулируемых ФКУ следует проводить тщательные технико-экономические расчеты с доказательством необходимости включения в тяговой сети плавно регулируемой ФКУ.

Распределенная система ФКУ в тяговой сети. При увеличении реактивной мощности тяговой нагрузки свыше 10–12 Мвар следует рассмотреть распределенную систему ФКУ в тяговой сети, т. е. устанавливать их не только на посту секционирования, но и на тяговых подстанциях. При тяговой нагрузке свыше 12–15 Мвар можно рекомендовать установку ФКУ не на одном, а на двух постах секционирования — PC1 и PC2 (рис. 1). В общем случае регулируемые ФКУ предусмотрены в распределенной системе, как на ПС, так и на тяговых подстанциях. Однако необходимость таких ФКУ, как было сказано выше, прежде всего следует предусмотреть на постах секционирования.

На тяговых подстанциях повышение напряжения от ФКУ в 2–3 раза меньше по сравнению с ФКУ на постах секционирования, и к тому же для регулирования напряжения на подстанции все трансформаторы

оборудованы устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Поэтому необходимость регулируемых ФКУ на тяговой подстанции должна быть дополнительно рассмотрена для каждой подстанции с учетом входного сопротивления системы внешнего электроснабжения (СВЭ).

В общем случае в качестве ФКУ возможно применение как плавно регулируемых, так и ступенчато регулируемых и нерегулируемых установок. С ростом тяговой нагрузки мощности ФКУ будут расти, прогноз свидетельствует о том, что в большинстве случаев мощность ФКУ увеличится с 3–5 до 7–10 Мвар.

Регулируемые ФКУ в тяговой сети. Статический генератор реактивной мощности. В настоящее время на сети отечественных железных дорог работают два типа регулируемых ФКУ: плавно регулируемая ФКУ (статический генератор реактивной мощности — СГРМ) с использованием оборудования китайского производства — на Западно-Сибирской и Северной железных дорогах и переключаемая ФКУ отечественной разработки — на Горьковской железной дороге [8].

Основное предназначение данных устройств заключается в компенсации реактивного тока тяговой нагрузки и снижении колебаний напряжения в тяговой сети. Выполняется СГРМ по схеме преобразователя напряжения на основе биполярных IGBT-транзисторов. Основные преимущества СГРМ по отношению к традиционно применяемым ФКУ на базе косинусных конденсаторов:

1) Мощность ФКУ пропорциональна квадрату напряжения в точке их установки, поэтому их мощность резко падает в моменты снижения напряжения в контактной сети, когда нагрузка на сеть возрастает. СГРМ при понижении напряжения обеспечивает плавное регулирование генерируемой реактивной мощности в сеть, чем обеспечивает стабилизацию напряжения в пределах своих номинальных значений мощности.

2) При отсутствии тяговой нагрузки генерация реактивной мощности ФКУ резко возрастает, когда в этом нет необходимости, что приводит к дополнительному росту напряжения зачастую свыше 29 кВ. СГРМ позволяет полностью исключить случаи превышения уровня напряжения в тяговой сети максимально допустимого значения.

Отметим недостатки СГРМ: во-первых, высокая стоимость (порядка 65 млн руб.), во-вторых, повышенный расход электроэнергии на собственные нужды, соизмеримый с экономией электроэнергии в тяговой сети, и в третьих, дополнительная генерация высших гармонических составляющих тока и напряжения. Особенность генерации высших гармонических составляющих, включая и неканонические, состоит в том, что для традиционной системы электрической тяги переменного тока создаются электромагнитные помехи на устройства безопасности движения.

В [9] о плавно регулируемых ФКУ сказано: «...Их основное преимущество — эффективное снижение потерь напряжения и мощности в контактной сети, позволяющее решать вопросы усиления пропускной способности участка железной дороги за счет сокращения интервалов попутного следования поездов. Перспектива использования ФКУ — расшивка узких мест по уровню напряжения на ряде участков Восточного полигона *без строительства тяговых подстанций, что на порядок снижает инвестиционные затраты*». Применение плавно регулируемых ФКУ вполне возможно в ситуациях, когда рассматривается альтернативный вариант — строительство тяговой подстанции, но пока такие варианты не встречались. Поэтому в общем случае вариант применения плавно регулируемой ФКУ очень ограничен.

Переключаемая ФКУ выполнена на основании отечественных изобретений [10, 11, 12] и представляет собой принципиально новую схему регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно. На рис. 2 представлена схема переключаемой ФКУ.

Первая ступень наименьшей мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей и двух фильтровых реакторов. Каждая секция ФКУ настроена на резонансную частоту 140 Гц, поэтому ФКУ настроена на эту же частоту, что обеспечивает отсутствие резонансных явлений. Включение первой ступени в работу происходит следующим образом. При отключенных выключателях $Q1$, $Q2$, $Q3$ включается главный выключатель $Q1$, а затем шунтируется демпфирующий резистор R включением выключателя $Q2$.

Вторая ступень ФКУ наибольшей мощности состоит из включенных первой секции конденсаторной батареи $C1$ и фильтрового реактора $L1$. Включение в работу второй ступени ФКУ при включенной первой ступени происходит следующим образом. При включенном главном выключателе $Q1$, отключается выключатель $Q2$, затем включается выключатель $Q3$. Вторая ступень рассчитывается по нормативному документу [5] для обеспечения заданной пропускной способности по формуле (2).

Первая ступень для ФКУ на посту секционирования обеспечивает допустимый режим напряжения при малых нагрузках и рассчитывается с целью наибольшего снижения потерь электроэнергии в тяговой сети по формуле (1).

Схему можно реализовать и при одном реакторе. Если применить, например, реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом [1] и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, максимальная мощность может быть на 4–6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть лю-

бым. При соотношении максимальной мощности к минимальной более двух напряжение на выключателе $Q2$ не будет превышать $U_{\text{ш}}/3$, где $U_{\text{ш}}$ — напряжение на шинах ФКУ (принимаяем $U_{\text{ш}} = 27,5–29$ кВ). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя $Q2$.

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации показывают, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60–80% всего времени. Срок службы конденсаторов в большей степени зависит от напряжения [1]. Расчеты показывают, что снижение напряжения до указанных значений повышает ресурс работы конденсаторов в десятки раз. Вот почему в условиях эксплуатации рекомендуется переводить существующие работающие много лет установки поперечной емкостной компенсации в переключаемые.

Переключение секций происходит всегда с предварительным введением демпфирующего резистора. Так как напряжение на шунтирующем выключателе не превышает 8–10 кВ, то ток разряда конденсаторов через резистор не превышает 80–100 А ($8000–10000$ В)/100 Ом, где 100 Ом — сопротивление демпфирующего резистора, что меньше номинального тока конденсаторов. Поэтому переключения происходят спокойно без перегрузок.

Важно отметить ограниченные броски напряжения при переключении ступеней. Во-первых, переключается лишь дополнительная мощность ФКУ (а не вся мощность ФКУ), и во-вторых, она переключается в два этапа: раньше включается с ограничительным резистором (напряжение повышается на 0,3–0,5 кВ), а затем через 0,3–0,5 с шунтируется резистор и напряжение повышается еще на 0,3–0,5 кВ. В дальнейшем при введении тиристорного ключа вместо вакуумных выключателей 10 кВ броски напряжения будут снижаться.

Подведем некоторые итоги четырехлетней эксплуатации переключаемой ФКУ в тяговой сети участка Сергач — Шумерля Горьковской железной дороги. ФКУ работает 60–80% времени в режиме пониженной мощности (работает первая ступень), что благоприятно сказывается на надежности конденсаторов и обеспечивает эффективное снижение потерь электроэнергии в тяговой сети. Переключение ФКУ на максимальную мощность в среднем происходит 2–4 раза в сутки, для этого специально настроена автоматика переключения. Но практика показала достаточность этих переключений, так как поезда повышенной массы (а их 10–13 единиц в сутки) проходят, как правило, пачками.

На наш взгляд, учитывая, что для условий тягового электроснабжения плавное регулирование мощности ФКУ можно заменить ступенчатым, а скорость переключения напряжения не имеет решающего преимущества, схему ФКУ возможно упростить, приводя к приемлемым стоимостным показателям (рис. 2). Кро-

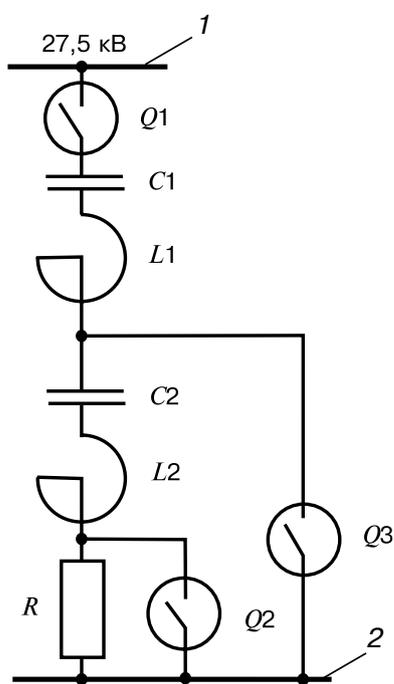


Рис. 2. Переключаемая ФКУ:

1 — шина; 2 — рельс; Q1 — главный выключатель; C1 — конденсаторная батарея 1-й секции; L1 — фильтровый реактор 1-й секции; C2 — конденсаторная батарея 2-й секции; L2 — фильтровый реактор 2-й секции; R — демпфирующий резистор; Q2 — выключатель (10 кВ) демпфирующего резистора; Q3 — выключатель (10 кВ) 2-й секции ФКУ

Fig. 2. Switchable FCI:

1 — bus line; 2 — rail; Q1 — main switch; C1 — capacitor battery of the 1st section; L1 — filter reactor of the 1st section; C2 — capacitor battery of the 2nd section; L2 — filter reactor of the 2nd section; R — damping resistor; Q2 — switch (10 kV) for damping resistor; Q3 — switch (10 kV) of the 2nd section of FCI

ме того, предлагаемый вариант переключаемой ФКУ не генерирует гармоники и приемлем по потерям активной мощности. В связи со сравнительно большим диапазоном допустимого напряжения в контактной сети (21–29 кВ) сбой в работе ЭПС при ступенчатом регулировании напряжения маловероятны. Что касается снижения потерь мощности в контактной сети, то давно доказана технико-экономическая целесообразность перехода на ступенчатые ФКУ (не более 2–3 ступеней), см. раздел «Снижение потерь мощности».

Таким образом, вариант СГРМ, по всей видимости, будет иметь ограниченное применение на отечественных железных дорогах. Считаем, что в системе тягового электроснабжения переменного тока следует ориентироваться на нерегулируемые ФКУ, отключаемые ФКУ и регулируемые ступенчатые ФКУ (например, переключаемая ФКУ).

Технико-экономический анализ. Проведем сравнительные расчеты стоимостных показателей регулируемых ФКУ на примере конкретного участка системы 2×25 кВ Сергач — Шумерля, где контактная сеть пи-

тается от подстанции Сергач, а на консоли контактной сети у подстанции Шумерля включена ФКУ.

Эффект от повышения пропускной способности. За счет применения ФКУ снизилось время движения тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне на $\Delta t = 72 - 67 = 5$ мин. В расчетах учтем только тяжеловесные поезда (включая сдвоенные), на этом участке их 10. Тогда на основании (3) оценим эффективность повышения пропускной способности:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{пр}} = \Delta t N_{\text{год}} m C / 60, \text{ руб.} =$$

$$5 \cdot 365 \cdot 10 \cdot 4881,35 / 60 = 1,484 \text{ млн руб.}$$

Экономия потерь мощности в тяговой сети рассчитаем с помощью программы КОРТЭС. Для указанного участка при реальном графике движения определим потери мощности в тяговой сети при включенной и отключенной нерегулируемой ФКУ. При этом учтем, что КОРТЭС, к сожалению, не может вести расчет с плавно регулируемой ФКУ, поэтому расчет выполняем для нерегулируемой ФКУ и добавляем 5% экономии потерь.

Без ФКУ суточные потери мощности в тяговой сети 8758 кВт·ч, с нерегулируемой ФКУ — 7633 кВт·ч, с плавно регулируемой — $7633/1,05 = 7269$ кВт·ч.

Таким образом, годовая экономия при стоимости электроэнергии 3,3 руб./кВт·ч составит

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = (8758 - 7269) \cdot 365 \cdot 3,3 = 1,793 \text{ млн руб.}$$

Оценим стоимость капитальных вложений. Стоимость СГРМ мощностью 6,7 Мвар равна 65 млн руб. [8]. Определим стоимость переключаемой ФКУ такой же мощности по данным ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО». Принимаем мощность основной секции 6,7 Мвар, а дополнительной секции — 2,6 Мвар. Стоимость основной секции мощностью 6,7 Мвар с конденсаторной батареей и одним реактором составляет 3 млн руб. Стоимость дополнительной секции мощностью 2,6 Мвар с реактором — $3 \cdot 2,6 / 6,7 = 1,16$ млн руб. Модуль управления с главным выключателем — 2 млн руб. Остальное оборудование (демпфирующий резистор, два выключателя 10 кВ, разъединители, комплект монтажных частей) — 2 млн руб. Итого — 8,16 млн руб. Учтем стоимостную надбавку в 25% для получения прибыли производителю. Сумма капитальных вложений окончательно составит $8,16 \cdot 1,25 = 10,2$ млн руб.

Расчет срока окупаемости. Бездисконтный срок окупаемости составит $T_{\text{ок}} = 10,2 / (1,484 + 1,793) = 3,1$ года. Аналогичный расчет с установкой СГРМ дает срок окупаемости более 20 лет. Таким образом, расчеты свидетельствуют о высокой эффективности переключаемой ФКУ в тяговой сети.

Используя эти же исходные данные, целесообразно провести сравнительные расчеты переключаемой ФКУ с двухсекционной установкой компен-

сацией реактивной мощности (УКРМ) [3]. Мощности двух секций составляют 3,4 и 3,3 Мвар. Резонансная настройка на 150 и 250 Гц. В связи с необходимостью увеличения установленной мощности конденсаторов в каждой секции, а также сопротивления реакторов стоимость каждой секции с реактором по расчету составляет 2 млн руб. В этом случае стоимость УКРМ состоит из следующих затрат: две секции конденсаторных батарей с реакторами — $2 \cdot 2 = 4$ млн руб., два модуля управления — $2 \cdot 2 = 4$ млн руб., остальное оборудование на две секции — $2 \cdot 2 = 4$ млн руб. Итого $(4 + 4 + 4) \cdot 1,25 = 15$ млн руб, что в $15/11 = 1,36$ раза больше стоимости переключаемой ФКУ и указывает на ее преимущества по сравнению с УКРМ.

Выводы. 1. По технико-экономическим расчетам применяемая в тяговой сети отечественных железных дорог плавно регулируемая установка ФКУ (СГРМ) не имеет преимуществ перед регулируемой переключаемой ФКУ в основном из-за завышенной ее стоимости. Кроме того, следует учесть завышенные потери электроэнергии на собственные нужды у плавно регулируемой ФКУ, соизмеримые с экономией электроэнергии в тяговой сети, а также генерацию высших гармонических составляющих в тяговую сеть, которые создают электромагнитные помехи на устройства безопасности движения поездов.

2. Эффективность повышения пропускной способности по напряжению в тяговой сети определяется максимальной мощностью ФКУ, и если эти мощности у плавно регулируемой, ступенчато регулируемой и нерегулируемой установок равны, то и эффект в повышении пропускной способности будет одинаковым.

3. Эффективность снижения потерь мощности в тяговой сети при применении установки ФКУ на посту секционирования в общем случае ограничивается, во-первых, тем, что ЭПС рассредоточен по всей межподстанционной зоне и, во-вторых, ток ЭПС распределяется между постом секционирования и тяговыми подстанциями, и поэтому ФКУ может компенсировать только часть тока ЭПС. Этим объясняются ограниченные возможности в снижении потерь мощности в тяговой сети регулируемых ФКУ.

4. Эффективность применения регулируемых ФКУ на посту секционирования тяговой сети определяется в основном необходимостью повышения пропускной способности железной дороги за счет повышения напряжения на токоприемнике ЭПС, а также в связи со снижением потерь электроэнергии в тяговой сети и в системе внешнего электроснабжения.

5. Опыт работы регулируемых ФКУ в тяговой сети отечественных железных дорог свидетельствует о необходимости разработки типового варианта экономичной регулируемой установки для массового применения в системе тягового электроснабжения. В основу разработки может быть положен представ-

ленный вариант переключаемой ФКУ как наиболее эффективный по технико-экономическим расчетам на современном этапе с учетом специфики электрооборудования тяговой сети, в котором целесообразно вакуумные выключатели напряжением 10 кВ заменить на бесконтактные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.
2. ГОСТ 32895–2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. 30 с.
3. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. 316 с.
4. Инструкция о порядке выбора параметров и мест размещения установок продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока: техническое указание № П-04/11 от 28.11.2011: утв. Управлением электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД». М.: ОАО РЖД, 2012. 15 с.
5. СТО РЖД 07.022.2–2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. М.: ОАО РЖД, 2015. 23 с.
6. Об утверждении расходных ставок и оценочных уровней затрат для экономических задач: распоряжение старшего вице-президента ОАО «РЖД» В. В. Михайлова № 675р от 7 апреля 2017 г.
7. Герман Л.А. Уменьшение потерь энергии батареями поперечно-емкостной компенсации, расположенными в тяговой сети // Труды МИИТ. Вып. № 302. Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1969. С. 69–82.
8. Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Княгинино: НГИЭУ, 2017. 402 с.
9. Гапанович В.А. Результаты внедрения научно-технических работ и задачи на 2017 год // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 24–28.
10. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока: патент № 2475912 ФИПС (Роспатент): МПК H02N 3/00 / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, Д.Е. Дулепов [и др.]. Заявл. 09.03.2011; опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
11. Устройство автоматического регулирования компенсации реактивной мощности: патент № 2459335 ФИПС (Роспатент): МПК H02J 3/16 / С.Н. Васильев, В.П. Гончаренко, М.В. Латманисов [и др.]. Заявл. 22.04.2011; опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23.
12. Установка ступенчатая поперечной емкостной компенсации: патент № 2656368 ФИПС (Роспатент): МПК H02J 3/18 / Л.А. Герман, А.С. Серебряков, В.П. Гончаренко [и др.]. Заявл. 01.07.2016; опубл. 05.06.2018. Бюл. № 16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ГЕРМАН Леонид Абрамович,
д-р техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО СамГупС
в Нижнем Новгороде

Статья поступила в редакцию 24.05.2018 г., актуализирована 13.08.2018 г., принята к публикации 10.09.2018 г.

Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network

L. A. GERMAN

Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Samara State University of Railway Transport" in Nizhny Novgorod (branch of the FGBOU VO SamGUPS in Nizhny Novgorod), Nizhny Novgorod, 603011, Russia

Abstract. The paper gives comparative characteristic of a continuously adjustable and stepwise adjustable (switchable) filter-compensating installations (FCI) in the traction network of AC railways. Technical and economic calculations were carried out to increase throughput and reduce electric power losses. Effectiveness of switchable FCI is substantiated, taking into account features of traction.

Feasibility of using regulated FCIs at the traction network at the partitioning station is mainly determined by the need to increase the railway capacity by increasing the voltage on electric locomotive current collector, as well as due to the reduction of electric power losses in the traction network and in the external power supply system.

Efficiency of increasing the carrying capacity of the voltage in the traction network is determined by the maximum power of the FCI, and if these powers in the continuously adjustable, stepwise adjustable and unregulated units are equal, then the effect in increasing the carrying capacity will be the same. The effectiveness of reducing power losses in the traction network when using FCI installation at a partition station is generally limited, firstly, by the fact that electric locomotive is distributed throughout the entire inter-substation zone and, secondly, electric locomotive current is distributed between the partitioning post and the traction substations, and therefore FCI can compensate for only part of the electric locomotive current. This explains the limited possibilities in reducing power losses in the traction network of continuously adjustable FCI.

As a rule, in most cases, according to the operating experience of domestic traction power supply, the nominal power of FCI at the partitioning station is 3–5 Mvar. In the future, as the traction load increases, its capacity will increase to 7–10 Mvar. With an increase in the power of FCI over 10 Mvar, one should consider a distributed system of FCI in the inter-substation zone.

It is shown that the experience of regulated FCIs in the traction network of domestic railways indicates the need to develop a standard version of an economically adjustable unit, and the development can be based on the option of switchable FCI presented in the article.

Keywords: filter compensating installation; switchable installation; technical and economic calculations; capacity; power losses

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>

REFERENCES

1. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Condenser installation of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.
2. GOST 32895–2014. *Electrification and electricity supply of railways. Terms and Definitions*. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 30 p. (in Russ.).
3. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog*. Ucheb. posobie [Adjustable capacitive compen-

sation settings in railway power supply systems. Reference book]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [Federal State Budgetary Educational Institution "Educational and Methodical Center for Education on Railway Transport"] Publ., 2015, 316 p.

4. *Instructions on the selection of parameters and locations for installation of longitudinal and transverse capacitive compensation in AC traction power supply systems*: Technical Designation no. P-04/11 dated November 28, 2011. Approved by the Electrification and Power Supply Directorate of the Central Infrastructure Directorate, a branch of the JSC "Russian Railways". Moscow, JSC "RZD" Publ., 2012, 15 p. (in Russ.).

5. STO RZhD 07.022.2–2015. *Railway AC traction power supply system. Methods for choosing the locations and power of devices for longitudinal and transverse compensation of reactive power*. Moscow, JSC "RZD" Publ., 2015, 23 p. (in Russ.).

6. *On approval of expenditure rates and estimated levels of costs for economic tasks*. Order no. 675r of the Senior Vice President of the Russian Railways V. V. Mikhaylov, dated April 7, 2017 (in Russ.).

7. German L. A. *Umen'shenie poter' energii batareyami pope-rechno-emkostnoy kompensatsii, raspolozhennymi v tyagovoy seti* [Reduction of energy losses by the batteries of cross-capacitive compensation located in the traction network]. Trudy MIIT. Vyp. 302. Voprosy energosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog [Proceedings of MIIT. Iss. 302. Power supply issues for electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1969, pp. 69–82.

8. German L. A., Serebryakov A. S., Dulepov D. E. *Fil'trokompen-siruyushchie ustanovki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Filter compensating installations in systems of traction power supply of railways]. Knyaginino, NGIEU Publ., 2017, 402 p.

9. Gapanovich V. A. *Rezul'taty vnedreniya nauchno-tekhni-cheskikh rabot i zadachi na 2017 god* [Results of the implementation of scientific and technical work and tasks for 2017]. Zheleznodorozhnyy transport, 2017, no. 2, pp. 24–28.

10. Serebryakov A. S., German L. A., Dulepov D. E. et al. *Switchable single-phase transverse capacitive compensation device in an AC traction network*. Utility patent no. 2475912 FIPS (Rospatent), dated March 9, 2011, publ. February 20, 2013. Bul. no. 5.

11. Vasil'ev S. N., Goncharenko V. P., Latmanizov M. V. et al. *Device for automatic regulation of reactive power compensation*. Utility patent no. 2459335 FIPS (Rospatent), dated April 22, 2011, publ. August 20, 2012, Bul. no. 23.

12. German L. A., Serebryakov A. S., Goncharenko V. P. et al. *Installation step transverse capacitive compensation*. Utility patent no. 2656368 FIPS (Rospatent), dated July 1, 2016, publ. June 5, 2018, Bul. no. 16.

ABOUT THE AUTHOR

Leonid A. GERMAN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of the FGBOU VO SamGUPS in Nizhny Novgorod

Received 24.05.2018

Revised 13.08.2018

Accepted 10.09.2018

■ E-mail: lagerman@mail.ru (L. A. German)