УДК 621.331:621.331.025 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87

Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка в тяговой сети переменного тока

Л. А. ГЕРМАН[1], А.С. СЕРЕБРЯКОВ[1], В. Л. ОСОКИН[2], Д. В. ЯКУНИН[3]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС), Нижегородский филиал, 603011, Нижний Новгород, Россия
[2] Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ), Княгинино, 606340, Россия
[3] Арзамасская дистанция электроснабжения Горьковской дирекции по энергообеспечению — структурное подразделение «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД», Арзамас, 607229, Россия

Аннотация. Обоснована необходимость и целесообразность включения регулируемых установок поперечной емкостной компенсации на постах секционирования в тяговых сетях переменного тока для повышения пропускной способности участков железной дороги. Показано, что целесообразна модернизация существующих нерегулируемых установок с переводом их в регулируемый режим путем введения добавочной последовательно включенной второй секции конденсаторов, автоматически шунтирующейся при повышенных нагрузках в тяговой сети.

Дано описание предложенной установки и приведены результаты теоретического анализа переходных процессов при шунтировании и расшунтировании добавочной секции. Показано, что шунтировать добавочную секцию следует в момент времени, когда напряжение на конденсаторах равно нулю. Приведены теоретические и экспериментальные осциллограммы процессов переключения.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующая установка; тяговая сеть переменного тока; секция конденсаторов; переходные процессы; шунтирование секции фильтрокомпенсирующей установки

1. Необходимость переключаемой фильтрокомпенсирующей установки в тяговой сети. В тяговой сети переменного тока применение регулируемых установок поперечной емкостной компенсации стало необходимым прежде всего для нормализации напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) [1]. В настоящее время на постах секционирования тяговой сети используются статические генераторы реактивной мощности (СГРМ), разработанные ООО «Инжиниринг» (г. Набережные Челны), которые доказали свою эффективность в повышении и стабилизации уровня напряжения, в результате чего увеличивается пропускная способность железной дороги [2]. Сейчас на отечественных железных дорогах включены более 20 установок СГРМ, число тяжелых поездов на этих участках может быть увеличено на 10–20 составов. Экономический эффект для железной дороги неоспорим, хотя недостатки СГРМ известны: высокая стоимость (СГРМ мощностью 10 Мвар — 150 млн руб.), повышенные потери мощности (непрерывно работающие вентиляторы общей мощностью 40 кВт требуют постоянного обслуживания). Поэтому привлекательна другая регулируемая установка в тяговой сети — переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ). Она успешно работает более 6 лет на тяговой подстанции Шумерля для поддержания напряжения в конце консольного участка тяговой сети системы 2×25 кВ Сергач — Шумерля (66,5 км). У переключаемой ФКУ при практически тех же функциях, что и СГРМ, во много раз ниже стоимость, меньше потери мощности, предельно простое схемное решение. Переключаемая ФКУ сформирована из обычной схемы нерегулируемой ФКУ с фильтром 3-й гармоники (по нормативам резонансная настройка на частоту 135–142 Гц) с добавлением последовательно включенной второй секции конденсаторов, автоматически шунтирующейся при повышенных нагрузках в тяговой сети коммутационным аппаратом на 10 кВ (вакуумным контактором или выключателем).

Оценим целесообразность включения установок поперечной емкостной компенсации (ФКУ, СГРМ) на постах секционирования по режиму напряжения в тяговой сети на основании измерений, выполненных в [3], на участке, где напряжение на шине поста секционирования $U_ш$ изменялось в пределах 21,5–28 кВ. При включении СГРМ указанное напряжение стабилизируется на уровне 27–27,5 кВ и при больших нагрузках не снижается ниже 23,5–24,5 кВ (рис. 1). На этом же рисунке можно видеть, что если бы в области точек 3,8; 7,8; 13; 18 ч была подключена переключаемая установка в режиме повышенной мощности, то эффект в регулировании напряжения был практически таким же, что и при СГРМ. Вот это основной аргумент в пользу переключаемой ФКУ в тяговой сети. Поэтому для повышения пропускной способности участков железной дороги, несомненно, целесообразна и экономически оправдана модернизация существующих нерегулируемых ФКУ с переводом их в регулируемый режим путем

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

введения добавочной (с последовательным включением) секции в ФКУ.

Последовательное включение секций для регулируемой установки более предпочтительно по следующим причинам:

• по капиталовложениям в большинстве случаев установки с последовательным соединением секций получаются дешевле, чем при параллельном;

• возможно исполнение практически любых соотношений мощностей секций;

• значительно проще осуществить переключение секций, так как в этом случае коммутировать приходится не при напряжении 27,5 кВ, а при пониженном напряжении, в частности на 10 кВ и ниже; коммутационный аппарат при этом применяется на напряжение 10 кВ и ниже;

• значительно проще выполнить модернизацию и перевод существующих установок в регулируемый режим;

• высокая эксплуатационная надежность из-за уменьшения износа изоляции, так как реально большую часть времени установки работают при пониженной мощности, т. е. при последовательно включенных конденсаторах. В этом случае напряжение на конденсаторах практически будет в два раза меньше номинального напряжения.

2. Условия работы тиристорного ключа переключаемой ФКУ. В настоящее время вторую секцию переключаемой ФКУ шунтирует (расшунтирует) вакуумный выключатель на 10 кВ, автоматика его включения настроена так, что в течение суток происходит 6–8 переключений. Конечно, при замене выключателя на тиристорный ключ (ТК) эффективность работы установки будет повышена. На Горьковской железной дороге планируется замена в переключаемой ФКУ вакуумного выключателя на ТК, разрабатываемый в настоящее время ООО «ЭКРА» (г. Чебоксары).

Рассмотрим переходные процессы переключаемой ФКУ при изменении режимов ее работы: переход с первой (пониженной мощности) на вторую (повышенной мощности) ступень.

На рис. 2. представлена схема переключаемой двухступенчатой ФКУ, выполненная на основании отечественных изобретений [4, 5, 6, 7]. Схема представляет собой принципиально новое техническое решение регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно.

Наличие двух секций обеспечивает две ступени мощности ФКУ — пониженную и повышенную. Первая ступень пониженной мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей $C1$ и $C2$ и двух фильтровых реакторов $L1$ и $L2$. Каждая секция ФКУ настроена в общем случае на резонансную частоту 135–142 Гц в соответствии с нормативными документами.

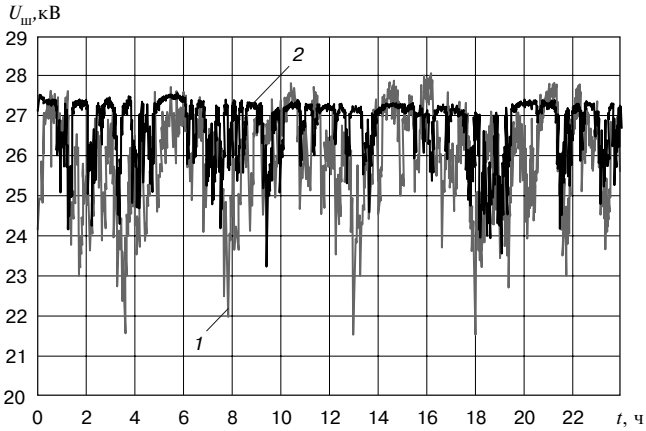

Рис. 1. Режимы напряжения на шине поста секционирования $U_ш$: *1* — при отключенном СГРМ; *2* — при включенном СГРМ

Fig. 1. Voltage modes on the sectioning post bus $U_ш$: *1* — with disabled static reactive power generator (SRPG); *2* — when the SRPG is on

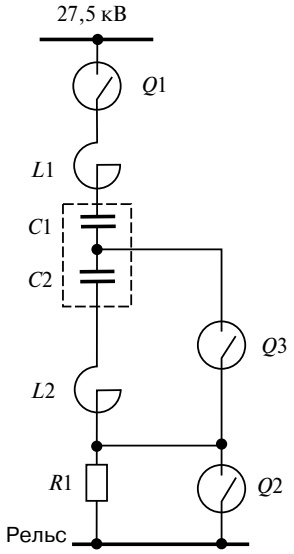

Рис. 2. Переключаемая двухступенчатая ФКУ: $Q1$ – главный выключатель; $C1$ — конденсаторная батарея первой секции; $L1$ — фильтровый реактор первой секции; $C2$ — конденсаторная батарея второй секции (дополнительная секция); $L2$ — фильтровый реактор второй секции; $R1$ — демпфирующий резистор; $Q2$ — выключатель демпфирующего резистора; $Q3$ — выключатель второй секции ФКУ

Fig. 2. Switchable two-stage filter compensating installation (FCI): $Q1$ — main switch; $C1$ — capacitor bank of the first section; $L1$ — filter reactor of the first section; $C2$ — capacitor bank of the second section (additional section); $L2$ — filter reactor of the second section; $R1$ — damping resistor; $Q2$ — damping resistor switch; $Q3$ — circuit breaker of the second section of FCI

Включение первой ступени в работу происходит следующим образом. При отключенных выключателях $Q2$ и $Q3$ включается главный выключатель $Q1$, а затем через заданное время демпфирующий резистор $R1$ шунтиру-

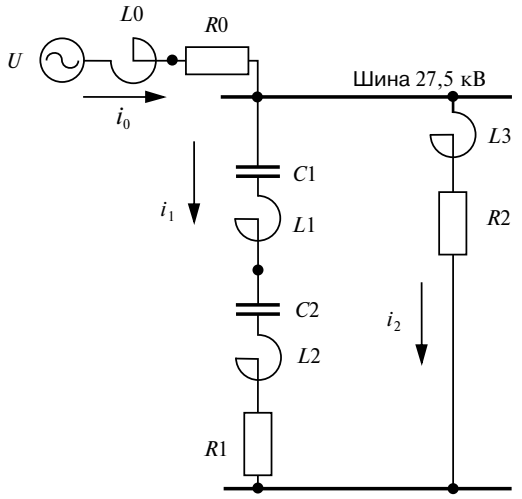

Рис. 3. Расчетная схема ФКУ с учетом системы внешнего электроснабжения и тяговой нагрузки
Fig. 3. Design scheme of the FCI taking into account the external power supply system and traction load

ется включением выключателя $Q2$. Первая ступень для ФКУ на посту секционирования тяговой сети обеспечивает допустимый режим напряжения при малых нагрузках и рассчитывается с целью наибольшего снижения потерь электроэнергии в тяговой сети при средней мощности тяговой нагрузки межподстанционной зоны.

Вторая ступень ФКУ повышенной мощности состоит из включенных в первой секции конденсаторной батареи $C1$ и фильтрового реактора $L1$. Включение в работу второй ступени ФКУ при включенной первой происходит путем шунтирования второй секции ($C2-L2$).

Схему по рис. 2 можно реализовать и при одном реакторе. Если применить, например, реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом [8] и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, максимальная мощность может иметь значения 4–6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть любым в соответствии с графиком нагрузки. При соотношении максимальной мощности к минимальной не более чем в 1,5 раза напряжение на выключателе $Q3$ в установившемся режиме не будет превышать $U_ш/3$, где $U_ш$ — напряжение на шинах ФКУ (принимаем $U_ш = 27{,}5–29$ кВ). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя $Q2$.

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации [2, 5, 8] показывают, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60–80 % всего времени. Срок службы конденсаторов в большей степени зависит от напряжения [2, 8]. Расчеты показывают, что снижение напряжения в режиме минимальной нагрузки повышает ресурс работы конденсаторов в несколько раз. Вот почему в условиях эксплуатации рекомендуется переводить существующие и работающие много лет нерегулируемые установки поперечной емкостной компенсации в регулируемый режим, т. е. делать их переключаемыми.

Расчеты электромагнитных процессов в секции $C1-L1$ при шунтировании секции $C2-L2$ выполнены по схеме замещения (рис. 3), включающей переключаемую ФКУ ($C1$, $L1$, $C2$, $L2$, $R1$), систему внешнего электроснабжения (U, $L0$, $R0$) и тяговую нагрузку, эквивалентируемую в первом приближении цепью $L3-R2$.

Переходные процессы в переключаемой ФКУ с двумя секциями были исследованы в [2] с помощью интегрированного пакета MathCAD, где определены значения перенапряжений в секции $C1-L1$ при шунтировании секции $C2-L2$.

3. Процесс шунтирования второй секции ($C2-L2$). Переключение на вторую ступень. Рассмотрим процессы в секции $C2-L2$ при условии ее рационального шунтирования и расшунтирования.

Поскольку вторая секция замыкается накоротко и отделяется от остальных элементов схемы, то на процессы в ней не оказывают влияния ни система внешнего электроснабжения, ни тяговая нагрузка.

Характер переходных процессов в замыкаемой накоротко второй секции зависит от параметров ее элементов ($C2$, $L2$) и начальных условий. Данное обстоятельство позволяет исследовать процессы в этой секции при ее замыкании по упрощенной программе. Выключатель $Q3$ при анализе представлен в виде нелинейного дискретно управляемого резистора, имеющего очень большое сопротивление в выключенном состоянии и близкого к нулю во включенном состоянии. Это можно сделать при помощи стандартной функции с условием *if* в пакете MathCAD.

С учетом вышесказанного система дифференциальных уравнений в форме Коши для переходного процесса во второй секции будет записываться двумя уравнениями

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{-u_{C2} - ri_2}{L2};$$
$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{i_2}{C2},$$

где i_2 — ток во второй секции; u_{C2} — напряжение на конденсаторе второй секции; $C2$ — емкость конденсатора второй секции; $L2$ — индуктивность реактора второй секции; r — небольшое собственное внутреннее активное сопротивление, которым обладает вторая секция; t — время.

Внутреннее активное сопротивление всегда реально присутствует. Если бы его не было, то в замкнутой накоротко второй секции существовали бы беско-

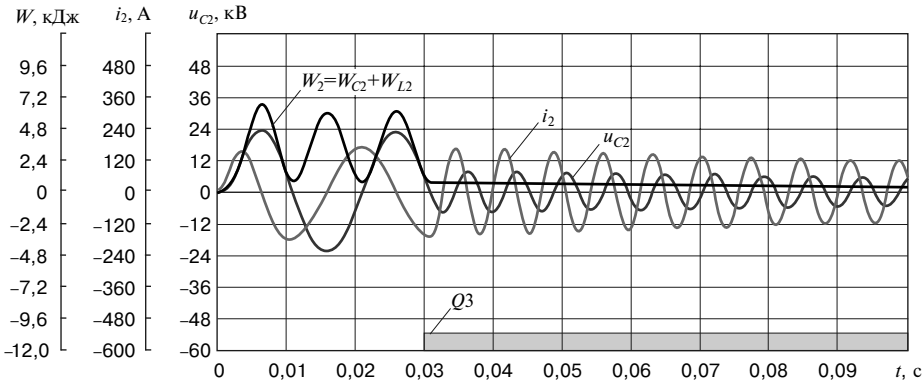

Рис. 4. Процессы в замкнутой накоротко второй секции при ее шунтировании со штатным реактором в момент нулевого напряжения на конденсаторе

Fig. 4. Processes in short-circuited second section when it is shunted with a standard reactor at the moment of zero voltage on the capacitor

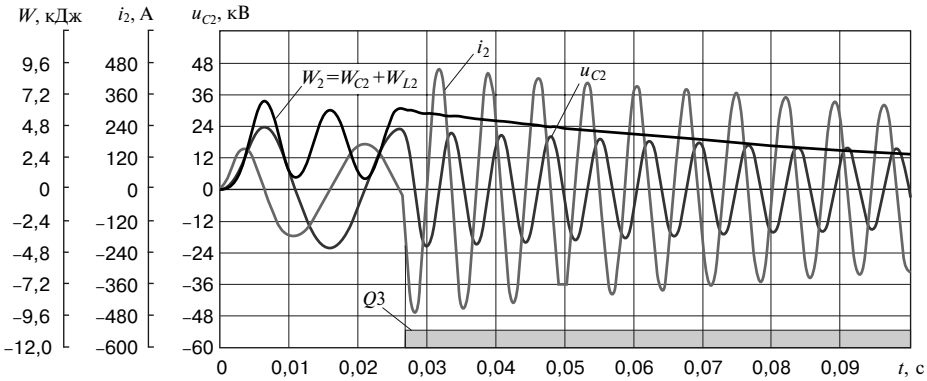

Рис. 5. Переходный процесс перевода ФКУ в режим повышенной мощности со штатным реактором в момент нулевого тока во второй секции

Fig. 5. Transition process of switching the FCI to the maximum power mode with a standard reactor at the moment of zero current in the second section

нечно долго незатухающие колебания. При моделировании это сопротивление для наглядности процесса затухания взято несколько больше реального (в данном случае — $r = 0{,}6$ Ом).

На рис. 4 и 5 приведены осциллограммы переходных процессов во второй секции при переключении ФКУ с пониженной мощности на повышенную, т. е. при шунтировании второй секции в разные моменты времени: при напряжении, равном нулю, и максимальном токе (рис. 4) и при токе, равном нулю, и максимальном напряжении (рис. 5). Включение выключателя $Q3$, замыкающего накоротко вторую секцию, показано на рис. 4 и 5 серой полосой внизу осциллограммы. Напряжение на конденсаторе $C2$ второй секции обозначено u_{C2}, а ток в ней — i_2. На этих рисунках шунтирование второй секции происходит без введения в ее цепь демпфирующего резистора. Правомерность такого технического решения является чрезвычайно важным вопросом.

В связи с этим дадим пояснения приведенным осциллограммам. При возникновении переходных процессов в секциях ФКУ энергия, запасенная в магнитном поле реактора и в электрическом поле конденсатора, как известно, не может изменяться скачком. Исследованиями установлено, что если секция $C2-L2$ шунтируется в момент максимального тока в ней и нулевого напряжения на конденсаторе $C2$ (рис. 4), то в замкнутой накоротко секции не происходит бросков тока и напряжения. Это наиболее благоприятный момент для шунтирования секции. Дело в том, что в процессе работы секции в ее элементах $C2$ и $L2$ периодически накапливается и отдается электрическая энергия. Емкостное сопротивление конденсатора $C2$ больше индуктивного сопротивления реактора $L2$ примерно в 9 раз, а точнее в $(140/50)^2 = 2{,}8^2 = 7{,}84$ раза. Поэтому максимальное значение запасаемой электрической энергии в конденсаторе $W_э = \dfrac{C2U_{C2m}^2}{2}$ больше, чем максимальное значение запасаемой магнитной энергии в реакторе $W_м = \dfrac{L2I_{L2m}^2}{2}$ в 7,84 раза (здесь U_{C2m} и I_{L2m} — максимальные значения напряжения и тока на конденсаторе во второй секции до ее шунтирования). Мгновенное значение суммарной электромагнитной энергии будет определяться как $W_2 = W_э + W_м = \dfrac{C2U_{C2m}^2}{2} + \dfrac{L2I_{L2m}^2}{2}$. За счет энергии, запасенной в элементах $C2$ и $L2$, в замкнутой накоротко второй секции возникают синусоидальные колебания с частотой 140 Гц, которые из-за активного сопротивления r постепенно затухают. Чем меньше запасенная энергия, тем меньше амплитуда колебаний в замкнутой накоротко секции. Изменение суммарной энергии $W_2 = W_{C2} + W_{L2}$ в замыкаемой накоротко второй секции приведено на рис. 4 и 5. Следовательно, наиболее благоприятный момент для шунтирования второй секции — это момент времени, когда напряжение на конденсаторе $C2$ близко к нулю и запасенная в нем

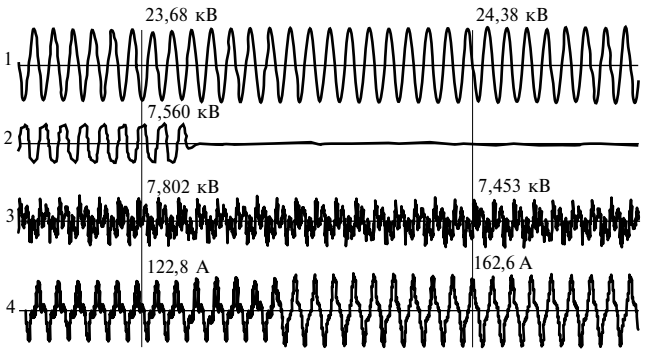

Рис. 6. Шунтирование второй секции (осциллограммы): кривая 1 — напряжение шин переключаемой ФКУ; кривая 2 — напряжение на второй секции; кривая 3 — напряжение на реакторе; кривая 4 — ток переключаемой ФКУ

Fig. 6. Shunting of the second section (oscillogram): curve 1 — bus voltage of the switched FCI; curve 2 — voltage in the second section; curve 3 — voltage at the reactor; curve 4 — current of the switchable FCI

электрическая энергия также равна нулю. Суммарная энергия в этот момент будет минимальной и равной $W_2 = W_м = \frac{L2I_{L2m}^2}{2}$. Максимальное значение энергии, получаемое реактором при колебаниях энергии в замкнутой накоротко цепи, в этом случае не сможет превысить максимальное значение энергии в реакторе до коммутации. Следовательно, и максимальное значение тока при колебаниях энергии в замкнутой цепи не сможет превысить тока в цепи до коммутации. Конденсатор *C*2 при колебаниях энергии в замкнутой цепи в этом случае будет получать энергию, которая была запасена в реакторе $W_м = \frac{L2I_{L2m}^2}{2}$ и которая меньше максимальной энергии в конденсаторе до коммутации в 7,84 раза. Следовательно, это значение энергии может зарядить конденсатор лишь до напряжения, которое меньше докоммутационного максимального значения на нем в $\sqrt{7{,}84} = 2{,}8$ раза, что видно из рис. 4.

Если же шунтирование второй секции происходит в момент, когда напряжение на конденсаторе *C*2 максимальное и запасенная энергия максимальна (рис. 5), то при колебательном процессе обмена энергией конденсатор *C*2 не может получить энергии больше, чем было у него до коммутации. Следовательно, напряжение на конденсаторе в этом случае не может превысить максимальное докоммутационное значение. Реактор *L*2 будет при обменном процессе получать энергию, которая больше докоммутационной энергии реактора в 7,84 раза. Это значит, что максимальное значение тока в короткозамкнутой второй секции в начальные моменты времени может превысить докоммутационное значение в $\sqrt{7{,}84} = 2{,}8$ раза (рис. 5).

По рис. 4 и 5 можно сделать вывод о том, что шунтировать вторую секцию следует при нулевом напряжении на конденсаторе *C*2. Из приведенных осциллограмм видно, что если шунтирование второй секции происходит в момент, когда напряжение на конденсаторах равно нулю, то процесс протекает спокойно. Напряжение и ток конденсатора не превосходят номинальных значений. Теоретически реактор во второй секции можно убрать. Но если напряжение на конденсаторе в момент коммутации по ряду причин может отличаться от нуля, то возможны большие экстратоки. Опыт НИИЭФА-ЭНЕРГО показывает, что при отсутствии реактора во второй секции следует вводить индуктивное сопротивление небольшой величины в цепь тиристора.

Исследования на действующей установке тяговой подстанции Шумерля при экспериментальном подключении ТК подтверждают указанные расчеты. На рис. 6 и 7 представлены осциллограммы исследования переключаемой установки ФКУ (рис. 2) при отсутствии реактора *L*2, а в качестве *Q*3 включен ТК на 10 кВ. Как видно по рис. 6, при шунтировании секции с *C*2 (индуктивность *L*2 отсутствует) в ноль напряжения процесс перехода с первой на вторую ступень повышенной мощности ФКУ проходит спокойно, без существенных бросков тока и напряжения. Ток изменился с 122,8 до 162,6 А, напряжение на шинах увеличилось с 23,68 до 24,38 кВ, т. е. при изменении тока на 39,8 А напряжение изменилось на 0,7 кВ. Что касается возможных повышенных значений тока в конденсаторе *C*2 в переходном периоде, то они были ограничены включением индуктивного сопротивления в цепь тиристора.

Дадим пояснения к измерениям тока и напряжения в ФКУ по рис. 6. Совершенно ясно, что уже сегодня с ростом тяжеловесного движения повышение напряжения в указанном случае на 0,7 кВ недостаточно. Такую «прибавку» напряжения сейчас дает действующая установка на тяговой подстанции Шумерля (проект был выпущен в 1985 г.) мощностью в 4,6 Мвар. Данный эксперимент подтвердил, что следует увеличить мощность первой секции на указанной подстанции хотя бы в 1,5 раза — до 6–7 Мвар.

4. Расшунтирование секции *C*2–*L*2. Переход на вторую ступень. При расшунтировании второй секции тока в ноль (как видно из осциллограммы, снятой на действующей установке, рис. 7) единичный бросок амплитуды напряжения в первый момент превышает установившееся значение в 1,6 раза. Поэтому для предотвращения повышенных бросков напряжения может быть двоякое решение: или увеличить запас по напряжению для ТК (примерно в два раза), или расшунтировать *C*2–*L*2, предварительно

введя резистор в цепь коммутационного аппарата, который затем шунтируется ТК.

5. Перспектива применения переключаемой ФКУ. Опыт проектирования и эксплуатации свидетельствует о том, что для соблюдения требований энергосистемы [2, 3] на тяговых подстанциях и на постах секционирования сети железных дорог России в большинстве случаев включены конденсаторные установки поперечной емкостной компенсации 3–4,6 Мвар с фильтрующим реактором ФРОМ-35 (их более 200). Практически все они сейчас требуют ремонта и модернизации. Предлагается для их модернизации использовать схему переключаемой ФКУ с ТК. При этом в большинстве случаев не потребуется установки второго реактора во вторую секцию. В этом случае возможно формировать на постах секционирования две ступени с мощностями: наименьшая — 3 Мвар и наибольшая — 5–6 Мвар. При необходимости выполнения требования настройки резонансной частоты в обеих секциях 135–142 Гц, а также для других соотношений мощностей ступеней необходимо установить реакторы в обеих секциях.

Для участков с движением поездов повышенной массы и со сравнительно слабой системой внешнего электроснабжения (мощность короткого замыкания на шинах питающей тяговой подстанции менее 500 МВА) при сильно искаженной форме кривой напряжения на токоприемнике у ЭПС будут проблемы в реализации режимов тяги и рекуперации. Поэтому при разработке проекта модернизации установки компенсации поста секционирования следует рассмотреть необходимость дополнительного включения демпфирующей цепи с резистором, формирующей полосовой фильтр [9].

В связи с вышесказанным необходимо разработать типовой проект модернизации существующих ФКУ с введением ТК.

Выводы. 1. Длительный опыт эксплуатации переключаемой ФКУ для поддержания напряжения на консольном участке тяговой сети 2×25 кВ Сергач — Шумерля (66,5 км) доказал правильность технического решения в последовательном подключении переключаемых конденсаторных секций. В настоящее время автоматика переключения секций настроена так, что среднесуточное число переключений второй секции не превышает шести-восьми.

2. Для повышения эффективности работы переключаемой ФКУ целесообразно заменить вакуумный выключатель на тиристорный ключ, переключающий вторую секцию.

3. Расчеты и экспериментальная проверка показали необходимость включения тиристорного ключа для шунтирования второй секции конденсаторов в ноль напряжения.

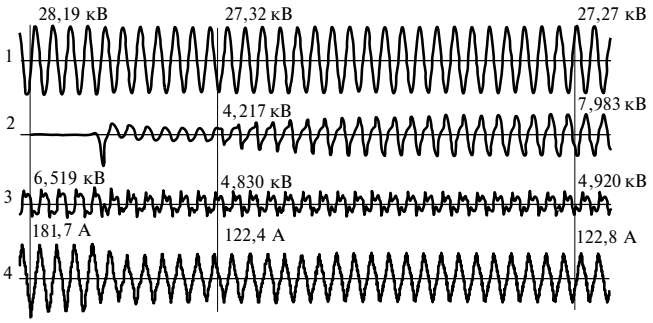

Рис. 7. Расшунтирование второй секции ФКУ (осциллограммы): кривая 1 — напряжение шин переключаемой ФКУ; кривая 2 — напряжение на второй секции; кривая 3 — напряжение на реакторе; кривая 4 — ток переключаемой ФКУ

Fig. 7. Shunt removal of the second section of the FCI (oscillogram): curve 1 — bus voltage of the switchable FCI; curve 2 — voltage in the second section; curve 3 — voltage at the reactor; curve 4 — current of the switchable FCI

4. Обычно схемы выключения тиристора производят выключение тока в ноль. В этом случае при расшунтировании второй секции (т. е. при отключении тиристора) возможны перенапряжения кратностью до 1,6 от установившегося значения. Поэтому тиристоры должны быть рассчитаны на двойное установившееся напряжение на второй секции или в процессе отключения следует вводить резистор для снижения перенапряжений по предлагаемой схеме.

5. Целесообразна модернизация существующих нерегулируемых ФКУ с переводом их в регулируемый режим путем введения тиристорного ключа для повышения пропускной способности участков железной дороги. При этом в большинстве случаев не потребуется установки второго реактора во вторую секцию. В этом случае возможно формировать на постах секционирования две ступени с мощностями: наименьшая — 3 Мвар и наибольшая — 5–6 Мвар и более.

Предлагаем в случае отсутствия реактора вводить во вторую секцию индуктивное сопротивление порядка 5 % от сопротивления реактора в первой секции.

6. При необходимых мощностях компенсации более 6–10 Мвар следует рассмотреть варианты трехступенчатой переключаемой ФКУ или целесообразность включения СГРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман Л. А., Серебряков А. С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. М.: «ФГБОУ УМЦ по образованию на ж.-д.транспорте», 2015. 316 с.

2. Герман Л. А., Серебряков А. С., Дулепов Д. Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог: монография. Княгинино: НГИЭУ, 2017. 402 с.

3. Никонов А. В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Омск, 2019.

4. Герман Л. А., Серебряков А. С., Максимова А. А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 1. С. 26–34.

5. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации: пат. № 2475912 Рос. Федерация: МПК H02H 3/00(2006.01) / А. С. Серебряков [и др.]; заявитель и патентообладатель Нижегородский гос. инж.-эконом. ин-т. № 2011108818/07; заявл. 09.03.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. 5.

6. Устройство автоматического регулирования компенсации реактивной мощности: пат. № 2459335 Рос. Федерация / С. Н. Васильев [и др.]; патентообладатель ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО». № 2011116045/07; заявл. 22.04.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. 23.

7. Установка ступенчатая поперечной емкостной компенсации: пат. № 2656368 Рос. Федерация: МПК H02J 3/18 (2006.01) / Л. А. Герман [и др.]; заявитель и патентообладатель Нижегородский гос. инж.-эконом. ун-т. № 2016126596; заявл. 01.07.2016; опубл. 05.06.2018, Бюл. 16.

8. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.

9. Установка поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2014. Т. 73. № 1. С. 47–54.

10. Трехступенчатая фильтрокомпенсирующая установка тяговой сети переменного тока: пат. № 2704023 Рос. Федерация / А. С. Серебряков; заявитель и патентообладатель Нижегородский гос. инж.-эконом. ун-т. № 2019108106; заявл. 21.03.2019; опубл. 23.10.2019, Бюл. № 30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГЕРМАН Леонид Абрамович,
д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО СамГУПС, Нижегородский филиал

СЕРЕБРЯКОВ Александр Сергеевич,
д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО СамГУПС, Нижегородский филиал

ОСОКИН Владимир Леонидович,
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация и автоматизация», ГБОУ ВО НГИЭУ

ЯКУНИН Денис Викторович,
старший электромеханик Арзамасской дистанции электроснабжения Горьковской дирекции по энергообеспечению, ОАО «РЖД»

Статья поступила в редакцию 27.12.2019 г., принята к публикации 16.03.2020 г.

Для цитирования: Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 80–87. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87.

Switchable filter compensating installation in AC traction network

L. A. GERMAN[1], A. S. SEREBRYAKOV[1], V. L. OSOKIN[2], D. V. YAKUNIN[3]

[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railway Engineering" (FBGOU VO SamGUPS), Nizhniy Novgorod Branch, 603011, Nizhniy Novgorod, Russia
[2] State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhniy Novgorod State Engineering and Economic University" (GBOU VO NGIEU), Knyaginino, 606340, Russia
[3] Arzamas electricity supply division of the Gorky Directorate for Energy Supply – structural unit of Transenergo, branch of the JSC "Russian Railways", Arzamas, 607229, Russia

Abstract. In the AC traction network, the use of adjustable transverse capacitive compensation systems has become necessary primarily for normalizing the voltage at the current collector of the electric rolling stock. Currently, static reactive power generators are used at the sections of the traction network, which have proved their effectiveness in increasing and stabilizing the voltage level, as a result of which the railway capacity is increased.

This article substantiates the necessity and expediency of the inclusion of adjustable transverse capacitive compensation installations at sectioning posts in AC traction networks to normalize the voltage at the current collector of electric rolling stock, and therefore, increase the throughput capacity of railway sections. It is shown that, in modern conditions, it is expedient and economically justified to modernize existing unregulated installations with transferring them to a controlled mode by introducing an additional subsequently connected second section of capacitors, which is automatically shunted by the switching device at high loads in the traction network. Modernized installation, proposed by the authors and called switchable, has been successfully operating on the Gorky Railway for more than 6 years. A description of the proposed installation is given and the results of a theoretical analysis of transients during shunting and unloading of the additional section are presented. An algorithm for switching the proposed installation is given. It is shown that the additional section should be shunted at a time when the voltage across the capacitors is zero. Theoretical and experimental oscillograms of switching processes are presented. Recommendations are given for choosing thyristors for a controlled key, as well as recommendations for improving the reliability of the proposed installation.

Keywords: filter compensating installation; AC traction network: capacitor section; transients; shunting the section of the filter compensating installation

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87

REFERENCES

1. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog. Ucheb. posobie* [Adjustable capacitive com-

pensation systems in traction power supply systems of railways. Training manual]. Moscow, "FGBOU UMTs po obrazovaniyu na zh.-d.transporte" [FGBOU UMT on education on railway transport] Publ., 2015, 316 p.

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

3. Nikonov A. V. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya raboty reguliruemykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. Kand. tekhn. nauk dis.* [Improving the operational performance of the traction power supply system by improving the operation of adjustable devices for transverse compensation of reactive power. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2019.

4. German L. A., Serebryakov A. S., Maksimova A. A. *Fil'trokompensiruyushchie ustanovki v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Filter compensating installations in AC traction networks]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 1, pp. 26 – 34.

5. Serebryakov A. S., German L. A., Dulepov D. E., Semenov D. A. *Ustroystvo pereklyuchaemoy odnofaznoy poperechnoy emkostnoy kompensatsii.* Pat. № 2475912 Ros. Federatsiya: MPK H02H 3/00(2006.01); opubl. 20.02.2013, Byul. 5 [Device for switched single-phase transverse capacitive compensation. Pat. No. 2475912, Russian Federation: MPK H02H 3/00 (2006.01); published on 20.02.2013, Bull. 5] (in Russ.).

6. Vasil'ev S. N., Goncharenko V. P., Latmanizov M. V., Mizintsev A. V. *Ustroystvo avtomaticheskogo regulirovaniya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti.* Pat. № 2459335 Ros. Federatsiya; opubl. 20.08.2012, Byul. 23 [Device for automatic regulation of reactive power compensation. Pat. No. 2459335 Russian Federation; published on 20.08.2012, Bull. 23] (in Russ.).

7. Serebryakov A. S., Goncharenko V. P., Yakunin D. V., Maksimova A. A., German L. A., Maralova V. F., Dulepov D. E. *Ustanovka stupenchataya poperechnoy emkostnoy kompensatsii.* Pat. № 2656368 Ros. Federatsiya: MPK H02J 3/18 (2006.01); opubl. 05.06.2018, Byul. 16 [Installation stepwise transverse capacitive compensation. Pat. No. 2656368 Russian Federation: MPK H02J 3/18 (2006.01); published on 05.06.2018, Bull. 16] (in Russ.).

8. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Condenser installations of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.

9. German L. A., Serebryakov A. S., Ermolenko D. V., Goncharenko V. P., Kvashchuk V. A., Maksimova A. A. *Ustanovka poperechnoy emkostnoy kompensatsii s fil'tratsiey i dempfirovaniem vysshikh garmonik v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Installation of transverse capacitive compensation with filtering and damping of higher harmonics in traction AC networks]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, Vol. 73, no. 1, pp. 47 – 54.

10. German L. A., Serebryakov A. S., Osokin V. L., Dmitrieva N. Yu. *Trekhstupenchataya fil'trokompensiruyushchaya ustanovka tyagovoy seti peremennogo toka.* Pat. № 2704023 Ros. Federatsiya; opubl. 23.10.2019, Byul. № 30 [Three-stage filter compensating installation of traction AC network. Pat. No. 2704023 Russian Federation; publ. 23.10.2019, Bull. 30] (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Leonid A. GERMAN,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, FBGOU VO SamGUPS, Nizhniy Novgorod Branch

Aleksander S. SEREBRYAKOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, FBGOU VO SamGUPS, Nizhniy Novgorod Branch

Vladimir L. OSOKIN,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department "Electrification and automatization", GBOU VO NGIEU

Denis V. YAKUNIN,
Senior Electrician, Arzamas Electricity Supply Distance, Gorky Directorate for Energy Supply, JSC "RZD"

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

Received 27.12.2019
Accepted 16.03.2020

For citation: German L. A., Serebryakov A. S., Osokin V. L., Yakunin D. V. Switchable filter compensating installation in AC traction network. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (2): 80–87 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Ч. 1 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричиани. М.: РАС, 2019. 272 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы, связанные с подвижным составом, процессами управления перевозками, совершенствованием локомотивной тяги и токосъема электроподвижного состава, а также вопросы пути, путевого хозяйства, металло- и материаловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.