
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 681.5.033.2

¹ А.С. Серебряков, ¹ Л.А. Герман, ² В.Л. Осокин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ

¹ Московский государственный университет
путей сообщения Императора Николая II
² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет

В электротехнической системе железнодорожного транспорта (тяговой электросети) важной задачей является повышение пропускной способности сети. Одно из перспективных решений этой задачи связано с использованием фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ). В статье рассмотрена конструкция регулируемой переключаемой установки ФКУ и особенности ее функционирования в тяговой сети переменного тока. Важной особенностью рассматриваемой ФКУ является последовательное включение регулируемых секций конденсаторов с основной батареей. С учетом результатов эксплуатации ФКУ в тяговой сети Горьковской железной дороги отмечены достоинства предложенного варианта реализации переключаемой установки. Приведены осциллограммы переходных процессов для переключаемой ФКУ, полученные с помощью MathCAD. Установлено, что в переходных режимах при переключении ступеней ФКУ обеспечиваются допустимые значения перенапряжений.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, компьютерное моделирование, переходный процесс, потери электроэнергии, тяговая сеть переменного тока.

1. Введение

Значения мощностей фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ) в тяговой сети, рассчитываемые для повышения пропускной способности железной дороги, как правило, превосходят 6-8 Мвар [1-3]. Поэтому при снижении тяговой нагрузки в межподстанционной зоне повышается напряжение в контактной сети и при достижении 29 кВ ФКУ аварийно отключается. Исходя из анализа режима напряжения в тяговой сети с ФКУ

предлагается формировать следующее техническое решение по типу ФКУ на постах секционирования: ФКУ в тяговой сети мощностью более 4-5 Мвар должны быть регулируемыми.

II. Схема и параметры переключаемой ФКУ

Предлагаемая регулируемая переключаемая установка ФКУ в тяговой сети переменного тока железных дорог выполнена на основании отечественных изобретений [4-6]. Она представляет собой принципиально новую схему регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно. На рисунке 1 представлена схема переключаемой ФКУ.

Наличие двух секций обеспечивает две ступени мощности ФКУ – наименьшую и наибольшую. Первая ступень наименьшей мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей $C1$ и $C2$ и двух фильтровых реакторов $L1$ и $L2$. Каждая секция ФКУ настроена на резонансную частоту 140 Гц, поэтому обе ступени ФКУ настроены 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 через заданное время демпфирующий резистор R шунтируется 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 по средней мощности тяговой нагрузки межподстанционной зоны.

Вторая ступень ФКУ наибольшей мощности состоит из включенных первой $C1$ секции конденсаторной батареи 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 для обеспечения заданной пропускной способности [7].

Схему, представленную на рисунке 1, можно реализовать и при одном реакторе. Если, например, применить реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом [1], и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, а максимальная мощность может быть на 4-6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть любым. При соотношении максимальной мощности к минимальной более двух, напряжение на выключателе $Q2$ не будет превышать $U_{ш}/3$, где $U_{ш}$ – напряжение на шинах ФКУ (принимая $U_{ш} = 27,5-29$ кВ). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя $Q2$.

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации показывают, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60-80% всего времени. Срок службы конденсаторов в значительной 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 и работающие много лет нерегулируемые установки поперечной емкостной компенсации в регулируемый режим, т.е. делать их переключаемыми.

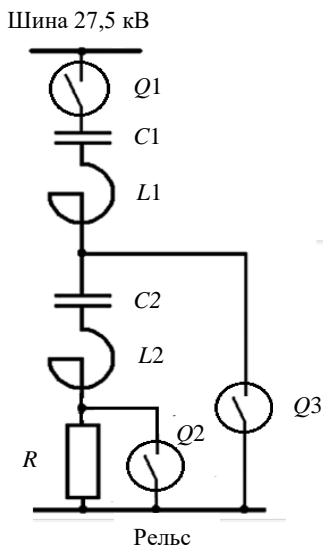


Рис. 1. Переключаемая ФКУ:

- $Q1$ – главный выключатель; $C1$ – конденсаторная батарея 1 – ой секции;
- $L1$ – фильтровый реактор 1 – ой секции; $C2$ – конденсаторная батарея 2 – ой секции;
- $L2$ – фильтровый реактор 2 – ой секции; R – демпфирующий резистор;
- $Q2$ – выключатель 10 кВ демпфирующего резистора;
- $Q3$ – выключатель 10 кВ 2 – ой секции ФКУ.

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 $(8000-100000)/100 = (80-100)$ А, где 100 – сопротивление демпфирующего резистора. Это меньше номинального тока конденсаторов, поэтому переключения происходят спокойно, без перегрузок.

Важно отметить ограниченные броски напряжения при переключении ступеней. Во-первых, переключается не вся, а лишь дополнительная мощность ФКУ. Во-вторых, переключается она в два этапа: сначала 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.

III. Опыт эксплуатации переключаемой ФКУ

Переключаемая ФКУ в течение четырех лет эксплуатируется в тяговой сети участка Сергач – Шумерля Горьковской железной дороги. ФКУ работает 60-80% времени в режиме пониженной мощности (работает первая ступень). Это благоприятно сказывается на надежности конденсаторов и эффективном снижении 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 поездов повышенной массы около 10-13 единиц в сутки, и проходят они, как правило, пачками.

Учитывая, что для реальных условий тягового электроснабжения плавное регулирование мощности ФКУ можно заменить ступенчатым, а скорость переключения напряжения не имеет решающего преимущества, можно упростить схему ФКУ, приводя ее к приемлемым стоимостным показателям. Это продемонстрировано на приведенной переключаемой ФКУ (рис. 1). Кроме 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) работа ЭПС при ступенчатом регулировании напряжения вряд ли принесет какие-либо неприятности. Что касается снижения потерь мощности в контактной сети, то давно доказана технико-экономическая целесообразность перехода на ступенчатые, не более 2-3 ступеней, ФКУ [1].

IV. Программы расчета и осциллограммы переходных процессов в переключаемой ФКУ

Расчеты выполнены по схеме замещения (рис. 2). Схема включает переключаемую ФКУ ($C1, L1, C2, L2, R1$), систему внешнего электроснабжения ($L0, R0$) и тяговую нагрузку, эквивалентную в первом приближении цепью $L3 - R2$. Для этой схемы составлена программа в интегрированном пакете MATHCAD (рис. 3). Расчеты выполнены для ФКУ, у которой мощность первой ступени – 3 Мвар, а второй – 6 Мвар.

Выключатели $Q1$, $Q2$ и $Q3$ на схеме (рис. 2) не показаны. Их срабатывание, изменяющее параметры элементов схемы замещения, заложено в программе, которая приведена на рис. 3. С помощью этой программы методом Рунге-Кутты четвертого порядка решается система из пяти дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши.

Анализ показал, что броски напряжения на конденсаторах не превосходят 110% от номинального значения. Наибольшие броски тока ФКУ переходного режима получаются в секции $C1 - L1$ при шунтировании секции $C2 - L2$. По нижеприведенной программе в интегрированном пакете *MATCAD* [2, 3] рассчитан переходной процесс, изображенный на рисунке 3. На участке стационарного режима $t_n = 0-0,05$ с включены обе секции и ФКУ работает с уменьшенной мощностью (первая ступень). В момент $t_n = 0,05$ с происходит шунтирование секции $C2 - L2$ и броски тока в секции $C1 - L1$ возрастают до $600/350 = 1,7$ (где 350 – установившееся амплитудное значение тока ФКУ второй ступени).

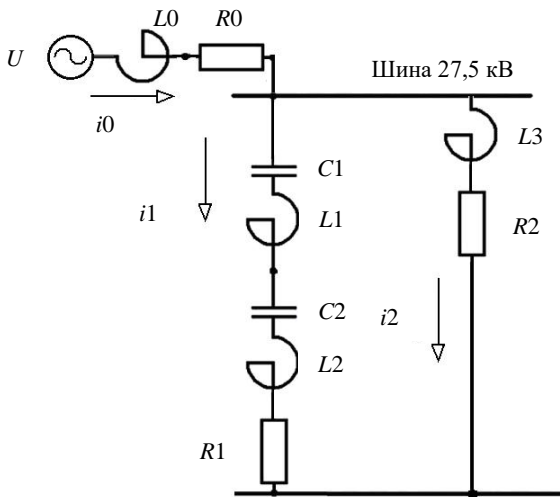


Рис. 2. Схема замещения

$$\begin{aligned}
 U &:= 27500 & f &:= 50 & \psi &:= \frac{0 \cdot \pi}{180} & \omega &:= 2\pi \cdot f = 314.159 \\
 \mathbf{u}(t) &:= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) & R0 &:= 1.1 & L0 &:= 0.015 + 0.032 \\
 C1 &:= 24 \cdot 10^{-6} & R2 &:= 97 & L3 &:= 0.25 & C2(t) &:= \text{if}(t \leq 0.0514, 24 \cdot 10^{-6}, 10) \\
 L1 &:= 0.054 & R1(t) &:= \text{if}(t \leq 0.0514, 70, 0.0) & L2(t) &:= \text{if}(t \leq 0.0514, 0.054, 0)
 \end{aligned}$$

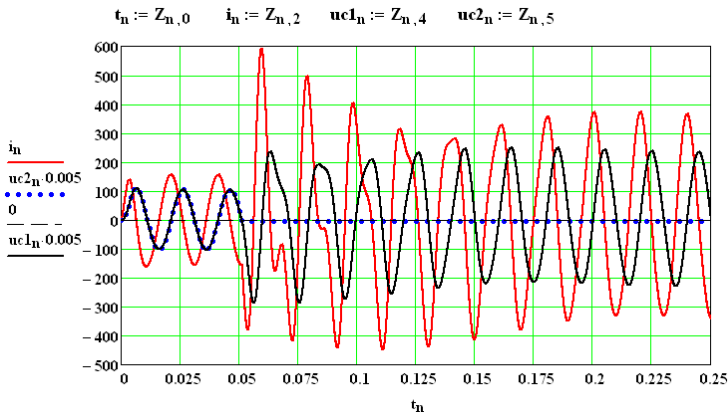
$$\mathbf{x} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{D}(t, \mathbf{x}) := \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R2 \cdot \mathbf{x}_2) \cdot (L1 + L2(t)) + L3 \cdot (\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R1(t) \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_4)}{L0 \cdot (L1 + L2(t) + L3) + L3 \cdot (L1 + L2(t))} \\ \frac{(L0 + L3) \cdot (\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R1(t) \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_4) - L0 \cdot (\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R2 \cdot \mathbf{x}_2)}{L0 \cdot (L1 + L2(t) + L3) + L3 \cdot (L1 + L2(t))} \\ \frac{[(-L0) \cdot (\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R1(t) \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_4) + (L0 + L1 + L2(t)) \cdot (\mathbf{u}(t) - R0 \cdot \mathbf{x}_0 - R2 \cdot \mathbf{x}_2)]}{[L0 \cdot (L1 + L2(t) + L3) + L3 \cdot (L1 + L2(t))]} \\ \frac{1}{C1} \cdot \mathbf{x}_1 \\ \frac{1}{C2(t)} \cdot \mathbf{x}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 Z &:= \text{rkfixed}(\mathbf{x}, 0, 0.5, 50000, \mathbf{D}) & n &:= 0..50000 \\
 t_n &:= Z_{n,0} & i_n &:= Z_{n,2} & uc1_n &:= Z_{n,4} & uc2_n &:= Z_{n,5}
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Расчет переходного процесса в двухступенчатой ФКУ

Результаты решения системы дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в схеме с переключаемой ФКУ (рис. 1) при шунтировании первой секции приведены на рисунке 4.

Для снижения бросков тока предлагается шунтирующий выключатель $Q3$ отсоединить от рельса и подключить к точке соединения реактора $L2$ к резистору и, кроме того, параллельно выключателю подсоединить тиристорный ключ на 10 кВ. Осциллограмма процесса шунтирования секции $C2 - L2$ в этом случае показана на рис. 5.

Рис. 4. Осциллограмма шунтирования секции $C2 - L2$ в схеме по рис. 1

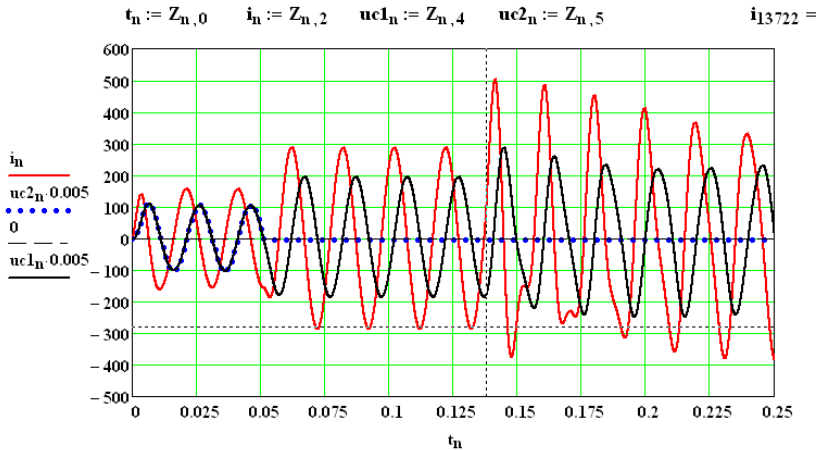


Рис. 5. Осциллограмма шунтирования секции $C2 - L2$ выключателем с тиристорным ключом

Как видно, при шунтировании резистора в момент $t_n = 0,132$ с броски тока снижаются до 1,4. Шунтирование балластного резистора в этом случае происходит в момент времени прохождения тока ФКУ через нуль.

IV. Выводы

Предлагаемые варианты переключаемой фильтрокомпенсирующей установки обеспечивают допустимые значения перенапряжений в переходных режимах при переключении ступеней мощности ФКУ.

Для снижения бросков тока в ФКУ в переходных режимах предлагается шунтировать секцию $C2 - L2$ без резистора, который вводится для ограничения бросков тока и в первой и во второй секциях, а также ввести параллельно шунтирующему выключателю $Q3$ тиристорный ключ на 10 кВ.

© Серебряков А.С., 2018

© Герман Л.А., 2018

© Осокин В.Л., 2018

Библиографический список

- [1] Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

- [2] Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: ФГБОУ УМЦ, 2015. – 316 с.
- [3] Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Княгинино: НГИЭУ, 2017. – 402 с.
- [4] Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е., Семенов Д.А. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации, Пат. 2475912 РФ, заявл. 09.03.2011; опубл. 20.02.2013.
- [5] Васильев С.Н., Гончаренко В.П., Латманизов М.В., Мизинцев А.В. Устройство автоматического регулирования компенсации реактивной мощности, Пат. 2459335 РФ, заявл. 22.04.2011; опубл. 20.08.2012.
- [6] Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Якунин Д.В., Максимова А.А. и др. Устройство ступенчатой поперечной емкостной компенсации, Пат. 2656368 РФ, заявл. 01.07.2016; опубл. 05.08.2018.
- [7] 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. Введ. 2015-12-08.

¹ A.S. Serebryakov, ¹ L.A. German, ² V.L. Osokin

STUDY OF TRANSITION PROCESSES IN SWITCHABLE FILTER COMPENSATION INSTALLATION

¹ Nizhny Novgorod branch of Moscow State University of Railway Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod Engineering-economic State University
Knyaginino, Russia

Abstract. In the electrical system of railway transport (traction power), an important task is to increase the capacity of the network. One of the promising solutions of this problem is associated with the use of filter – compensating installations (FCI). The article describes the design of the adjustable switchable FCI unit and the peculiarities of its operation in an AC traction network. An important feature of the considered FCI is a series connection of adjustable capacitor sections with the main battery. Taking into account the results of the operation of the FCI in the Gorky Railway Traction Network, the merits of the proposed variant of the switchable unit implementation have been highlighted. The oscillograms of transients for switchable FCI, obtained with the help of MathCAD, are presented. It has been established that in switching the FCI steps, acceptable overvoltage values are provided in transition modes.

Keywords: AC traction network, computer modeling, electric power losses, reactive power compensation, transient process.

References

- [1] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, Condenser installation of electrified railways. Moscow: Transport, 1983.
- [2] L.A. German and A.S. Serebryakov, Adjustable capacitive compensation settings in rail traction power supply systems. Moscow: Federal Medical University, 2015.
- [3] L.A. German, A.S. Serebryakov and D.E. Dulepov, Filter compensating installations in traction power supply systems of railways. Knyaginino: NIEGU, 2017.
- [4] A.S. Serebryakov, L.A. German, D.E. Dulepov and D.A. Semenov, «Switchable single-phase transverse capacitive compensation device», R.F. Patent 2475912, Feb. 20, 2013.
- [5] S.N. Vasiliev, V.P. Goncharenko, M.V. Latmanizov and A.V. Mizintsev, «Device for automatic regulation of reactive power compensation», R.F. Patent 2459335, Feb. 8, 2012.
- [6] L.A. German, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko, D.V. Yakunin and A.A. Maksimova and other, «Device speed transverse capacitive compensation», R.F. Patent 2656368, Aug. 5, 2018.
- [7] Traction power supply system of the AC railway. Methodology of the choice of locations and power of devices for longitudinal and transverse compensation of reactive power. Russian Railways, 07.022.2-2015, Dec. 8, 2015.