УДК 621.316.722.076.12

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Д-р техн. наук, проф. **Герман Л.А.**[1]
Д-р техн. наук, проф. **Серебряков А.С.**[2]
Канд. техн. наук, доц. **Осокин В.Л.**[2]
Канд. техн. наук, доц. **Дулепов Д.Е.**[2]
[1] *Самарский государственный университет путей сообщения. Филиал в г. Нижний Новгород*
[2] *Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино*

Аннотация. *Работа установок поперечной емкостной компенсации при их включении вдали от источника питания (например, на постах секционирования в тяговой сети или в сетях общего назначения, например, в пунктах ответвления от магистральных сетей) при распределенной нагрузке имеет ряд особенностей. Эти особенности рассмотрены на примере электрифицированного участка железной дороги. В частности, проанализирована проблема регулирование мощности КУ при средних и максимальных нагрузках.*

Ключевые слова: *поперечная емкостная компенсация, тяговая сеть переменного тока, электрифицированный участок железной дороги, снижение потерь мощности*

Работа установок поперечной емкостной компенсации (КУ) при их включении вдали от источника питания (например, на постах секционирования в тяговой сети или в сетях общего назначения, например, в пунктах ответвления от магистральных сетей) имеет ряд особенностей. Рассмотрим эти особенности на примере электрифицированного участка железной дороги. В частности, проанализируем известную проблему регулирование мощности КУ.

При расчете мощности установок поперечной емкостной компенсации (КУ) и разработке принципов её регулирования до недавнего времени специалисты ориентировались на известные нормативные документы. Однако известно [1], что КУ являются мощным техническим средством повышения пропускной способности участков железной дороги. Поэтому неслучайно в последнее время стали выполнять ряд мероприятий по КУ с целью повышения пропускной способности.

Цель работы заключается в разработке методов и технических средств для комплексной системы регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации в системах с распределенной нагрузкой, обеспечивающей экономию электроэнергии при малых и средних нагрузках и заданное значение напряжения при больших нагрузках.

Материалы и методы. Управление и автоматика существующих установок поперечной емкостной компенсации (КУ) рассмотрены в [1]. В [2] указано, что для регулирования мощности КУ поста секционирования (ПС) используется третья гармоническая тягового тока. Это объясняется тем, что измерения тяговой нагрузки у поста секционирования не отражают реальную нагрузку, относящуюся к ПС. Действительно, если одинаковые токи расположены с двух сторон на одинаковом расстоянии от ПС, то тяговый ток, отнесенный (приходящийся) к ПС, равен нулю (через ПС ток не протекает), и измеренный ток питающей линии ПС равен нулю. Кроме того, недостаток [2] в том, что регулирование мощности КУ происходит только для снижения потерь мощности в тяговой сети, и совсем не учитывается главный показатель режима – пропускная способность участка.

Для повышения пропускной способности участка железной дороги повышают уровень напряжения в тяговой сети, и поэтому в настоящее время для этого увеличивают мощность установок КУ. Наиболее распространенные установки КУ на отечественных железных дорогах – конденсаторные установки, включенные фильтром на третью гармонику с последовательным включением основной конденсаторной батареи и реактора для предотвращения резонансных явлений. Увеличение мощности КУ сопровождается дополнительной установкой секции конденсаторов, позволяющей выполнять регулирование мощности КУ, при этом дополнительная секция может включаться параллельно или последовательно с основной конденсаторной батареей [3,4]. Преимущества и недостатки указанных принципов включения рассмотрены в [4]. Далее будем рассматривать включение дополнительной секции КУд параллельно основной конденсаторной батареи.

Таким образом, главная цель проведенных авторами исследований – выполнить регулирование мощности КУ так, чтобы повысить пропускную способность электрифицированного участка железной дороги.

Предлагаем следующую схему регулирования мощности КУ (рис. 1).

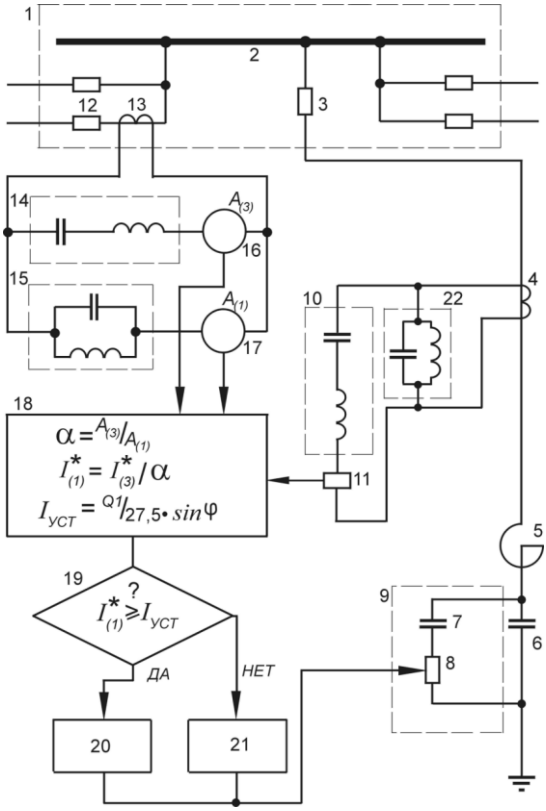

Рис. 1. Схема регулирования мощности КУ

Условные обозначений на рис. 1:

1 – пост секционирования (ПС) с питающими линиями контактной сети на выключателях;

2 – шина ПС;

3 – главный выключатель КУ;

4 – трансформатор тока КУ;

5 – реактор КУ;

6 – основная конденсаторная батарея КУ;

7 – дополнительная конденсаторная батарея $КУ_д$;

8 – коммутационный аппарат дополнительной конденсаторной батареи $КУ_д$;

9 – блок дополнительной конденсаторной батареи КУд с коммутационным аппаратом;

10 – первый резонансный фильтр на третью гармонику во вторичной обмотке трансформатора тока КУ;

11 – реле контроля третьей гармоники тока КУ;

12 – выключатель питающей линии ПС;

13 – трансформатор тока питающей линии ПС;

14 – второй резонансный фильтр третьей гармоники во вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии;

15 – второй заграждающий фильтр третьей гармоники во вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии;

16 – амперметр $А_{(3)}$ третьей гармоники тока питающей линии;

17 – амперметр $А_{(1)}$ первой гармоники тока питающей линии;

18 – расчетный блок

19 – блок сравнения $I^*(1) \geq I_{уст}$

20 – блок включения дополнительной секции $КУ_д$;

21 – блок отключения дополнительной секции $КУ_д$;

22 – первый заграждающий фильтр на третью гармонику во вторичной обмотке трансформатора тока КУ.

Описание работы и характеристик блоков в схеме.

Мощность дополнительной секции КУ 9. На основании [5] мощность КУ ($Q1$) поста секционирования по реальным нагрузкам обычно равна 4…5 Мвар и определяется необходимостью снижения реактивной мощности межподстанционной зоны до нормируемых значений по формуле «разности тангенсов» [1]. Кроме того, в [6,7] представлены нормативные документы, требующие повышения мощности КУ (до $Q2$) для соблюдения требования обеспечения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) не менее 21(24) кВ. По опыту проектирования обычно выполнение [6,7] требует увеличения мощности КУ по сравнению с требованием [5] ($Q1$) в 1,5 раза. При выполнении требования повышения пропускной способности потребуется ещё больше увеличить мощность КУ ($Q3$), расчет которой предлагается в [8]. По опыту проектирования выполнение [8] требует увеличения мощности КУ ($Q3$) по сравнению с вариантом ($Q2$) ещё в 1,5–2 раза. В настоящее время на сети железных дорог переменного тока таких КУ более 200 установок, практически все они по срокам и физическому состоянию требуют капитального ремонта и соответствующей

модернизации. Поэтому логично в настоящее время обратить внимание на модернизацию существующих КУ с учетом повышения пропускной способности участков, что и рассматривается в настоящей статье.

Как указано, мощность дополнительной секции $КУ_д$ 9, определяется с помощью [8]. Поэтому полная мощность КУ совместно с дополнительной секцией $КУ_д$ определяется

$$Q3 = (U_ж - U_{мин})\, U_{сгрм}/X_{вх}, \quad (1)$$

тогда мощность дополнительной секции $КУ_д$ 9, равна

$$Q_{куд} = Q3 - Q1, \quad (2)$$

где:

$U_ж$ – желательное напряжение на токоприемнике, для повышения пропускной способности участка в зависимости от характера нагрузки $U_ж$ = 25-28 кВ;

$U_{мин}$ – минимальное напряжение на токоприемнике тяжеловесного состава по расчету;

$U_{сгрм}$ – номинальное напряжение статического генератора реактивной мощности СГРМ;

$X_{вх}$ – входное индуктивное сопротивление поста секционирования;

$Q1$ и $Q3$ – мощности КУ соответственно по нормативу [5] и по условию повышения пропускной способности участка [8].

О необходимости формирования фильтров гармонических составляющих тягового тока.

Для получения тока отнесенного к ПС, к сожалению, нельзя определить его по измерениям. Действительно, при одинаковых токах ЭПС с двух сторон и при одинаковых расстояниях от ПС ток ПС равен нулю. Под отнесенным током к ПС понимаем ток ПС в данной мгновенной схеме, полученный в результате разложения мгновенных токов межподстанционной сети между тяговыми подстанциями и ПС.

Поэтому для расчета тока ПС используется ток третьей гармоники $I_{(3)}$, характерный для выпрямительного электроподвижного состава (ЭПС), как это предложено в [2]. Как бы не располагались ЭПС и сколько их не было все токи третьей гармоники ЭПС будут замыкаться через КУ ПС, так как сопротивление КУ для третьих гармоник всех электровозов рассматриваемой межподстанционной зоны будет практически равным нулю [1]. Вот почему к трансформатору тока КУ ПС 4 подключен резонансный фильтр на третью гармонику 10 с последовательно включённым реле контроля тока третьей гармоники 11 в КУ

ПС. Отметим, что необходимость включения заграждающего фильтра третьей гармоники диктуется соблюдением режима работы трансформатора тока: так как через него всегда протекает ток первой гармоники, определяемый напряжением на шинах ПС, что исключает режим отсутствия тока во вторичной обмотке трансформатора тока установки поперечной емкостной компенсации.

В КУ ПС будет сосредотачиваться весь ток третьей гармоники тяговой сети, относящийся к ПС, и по его максимальному значению будем далее определять ток первой гармоники тягового тока, по которому следует включать дополнительную секцию КУ.

Однако, для контроля реального тока первой и третьей гармоник тягового тока следует выполнять их замеры на питающей линии контактной сети (на любой питающей, например, на линии с выключателем 12 (рис. 1).

Необходимость получения токов первой и третьей гармоник диктуется определением отношения указанных токов в тяговой сети при нормальной работе межподстанционной зоны. В тяговом токе преобладают наибольшие значения первая и третья гармонические составляющие. Датчики тока третьей и первой гармоник тока КУ формируются на вторичной стороне трансформатора тока 13 питающей линии, для этого цепь трансформатора тока замыкается на резонансный фильтр третьей гармоники 14 и заграждающий фильтр также третьей гармоники (для получения тока первой гармоники в цепи этого фильтра 15), в цепь которых включены амперметры $A_{(1)}$ 17, и $A_{(3)}$ 16. Для экспериментального определения коэффициента α ($\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}$) следует выполнить на момент измерения одностороннюю схему питания с отключением соседней подстанции (для повышенных значений тяговых токов и $I^*_{(3)}$ и исключения уравнительных токов).

В результате измерений получаем

$$\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}. \tag{3}$$

Для расчетов принимаем среднее значение α по проведенным измерениям. С помощью коэффициента $\alpha_{(3)}$ по формуле (4) определяется ток первой гармоники $I^*_{(1)}$.

$$I^*_{(1)} = I^*_{(3)} / \alpha, \tag{4}$$

где $I^*_{(3)}$ максимальное значение измеренной третьей гармоники тока тяговой сети при отключенной дополнительной секции $КУ_д$, а $I^*_{(1)}$ –

рассчитанное значение первой гармоники тягового тока, при которой включается дополнительная мощность $КУ_д$ при условии (5),

$$I^*_{(1)} \geq I\text{уст}, \quad (5)$$

причем при $I^*_{(1)} \geq I$уст дополнительная секция $КУ_д$ включена, а при $I^*_{(1)}$ < Iуст КУд – отключена. При необходимости контролировать емкостную составляющую тяговой нагрузки вместо $I_{(1)}$ и Iуст определяются $I_{(1)}\sin\varphi$ и Iуст $\sin\varphi$, где $\sin\varphi$ определяется путем измерений на рассматриваемом участке.

Расчетный блок 18 определяет:

– коэффициент третьей гармоники $\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}$ при максимальном значении $A_{(3)}$ и отключенной дополнительной секции $КУ_д$ с помощью 16 и 17;

– ток первой гармоники тягового тока, при котором происходит подключение дополнительной секции $КУ_д$ (4) и (5);

– ток уставки Iуст для перехода в режим повышения пропускной способности (см. (6)).

Таким образом, различают два режима работы КУ:

1. Режим снижения потерь мощности в тяговой сети с использованием алгоритма регулирования мощности из [2].

2. С повышением тока тяговой сети, отнесенного к ПС (5), следует переходить на второй режим – режим повышения пропускной способности участка.

Предлагаем предварительно установить ток уставки для включения дополнительной секции по мощности КУ $Q1$, определяемой по нормативному документу [5]:

$$I\text{уст} = Q1/(27{,}5 \sin\varphi) \quad (6)$$

Здесь введение $\sin\varphi$ в знаменателе определяет уставку для полного значения тягового тока. На каждом реальном участке железной дороги предварительное значение Iуст уточняется по реальной загрузке участка, характеру движении поездов и параметрам системы электроснабжения. Далее по максимальному току третьей гармоники в КУ $I^*_{(3)}$, измеренному при отключенной дополнительной секции $КУ_д$ и среднему значению коэффициенту α определяют ток первой гармоники тяговой нагрузки $I^*_{(1)}$ и при выполнении (5) происходит включение дополнительной секции $КУ_д$.

Новизна предложенного технического решения заключается в следующем:

1. Регулирование мощности КУ происходит не только для снижения потерь мощности в тяговой сети [2], но и для повышения пропускной способности участка железной дороги, то есть вводится комплексное регулирование мощности.

2. Необходимость введения регулирования мощности для повышения пропускной способности определяется повышенным значением тягового тока, отнесенного к ПС, и при тяговом токе первой гармоники более *I*уст включают дополнительную секцию $КУ_д$.

3. Тяговый ток первой гармоники, отнесенный к ПС, определяется путем измерения третьей гармоники тока в КУ и затем рассчитывается по формуле (4) при измеренном коэффициенте гармоники α.

4. Коэффициент третьей гармоники α для расчета первой гармоники тягового тока определяется путем формирования резонансного и заграждающего фильтров третьей гармоники на вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии контактной сети ПС.

Работа устройства

Устройство работает по алгоритму [2], то есть эффективно снижает потери мощности в тяговой сети. При повышении тягового тока, отнесенного к ПС до уставки *I*уст и выше, дается команда на включение дополнительной секции $КУ_д$. В результате суммарная мощность КУ увеличивается, следовательно, повышается напряжение в тяговой сети и улучшаются условия прохождения тяжеловесных поездов. Как только тяговый ток снижается ($I уст < I^*_{(1)}$), что свидетельствует об уменьшении тяговой нагрузки, то дополнительная секция $КУ_д$ отключается. Ток уставки для включения дополнительной мощности $КУ_д$ определяется по выражению (6).

Таким образом, реализуется комплексная система регулирования мощности КУ: до тягового тока $I^*_{(1)}$ происходит регулирование мощности КУ для снижения потерь мощности в тяговой сети, а в периоды, когда тяговая нагрузка $I^*_{(1)}$ превышает *I*уст (то есть $I^*_{(1)} \geq I уст$) регулирование мощности происходит по закону повышение пропускной способности, то есть подключается КУ*д*.

Выводы по работе

Идея комплексной системы регулирования мощности КУ должна быть внедрена на всех существующих КУ (в первую очередь, на ПС), где конденсаторная батарея с реактором включены фильтром на третью гармонику. Однако комплексная система регулирования мощности может быть использована и в других регулируемых КУ, например, в СГРМ [4].

Итак, комплексная система регулирования мощности КУ позволяет повысить пропускную способность железной дороги и сократить потери мощности.

Библиографический список

1. **Герман Л.А., Серебряков А.С.** Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: ФГБОУ УМЦ, 2015. 316 с. [eLIBRARY ID: 27909069]

2. А.с. 628520 СССР. Способ регулирования мощности поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с выпрямительными установками / Герман Л.А.; заявитель Герман Л.А. Опубл. 13.04.77. Бюл. № 38.

3. Пат. № 2475912 C2 Рос. Федерация МПК H02H 3/00, МПК H02H 7/16. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации / Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е., Семенов Д.А.; заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный инженерно-экономический институт от 09.03.2011. Опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5. [eLIBRARY ID: 37775810]

4. Переключаемая фильтрокомпенсируемая установка в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. Л. Осокин, Д. В. Якунин // Вестник ВНИИЖТ. 2020. № 2. С. 80–87. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87. [eLIBRARY ID: 42769716]

5. Приказ Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 № 49 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)».

6. Инструкция о порядке выбора параметров и мест размещения продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока. Утверждена ЦЭ ОАО «РЖД» 28.11.2011.

7. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. СТО РЖД 07.022.2 -2015.

8. **Герман Л.А.** Как разделить питание контактной сети / Локомотив. 2020. № 3. С. 35-36. [eLIBRARY ID: 42466575]

9. **Кучма К. Г., Марквардт Г. Г., Пупынин В. Н.** Защита от токов короткого замыкания в контактной сети: М.: Трансжелдориздат, 1960. 131 с.

THE COMPLEX SYSTEM OF POWER CONTROL OF TRANSVERSE CAPACITIVE COMPENSATION DEVICE IN A SYSTEM WITH DISTRIBUTED LOAD

L.A. German[1], A.S. Serebryakov[2], V.L. Osokin[2] and D.E. Dulepov[2]
[1] *Samara State University of Railways, Branch in Nizhny Novgorod*
[2]*Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino*

Abstract. The complex system of power control of transverse capacitive compensation device (CD) allows to increase the railroad traffic capacity and decrease power losses in the electrical traction network. The necessity of power control introduction to increase the traffic capacity is caused by the increased value of the traction current which is referred to the sectioning post and when the first harmonic traction current is higher than the current of the devices the additional section of capacitor battery is switched on. The suggested system can be implemented into CD where capacitor battery with reactor is connected through the filter on the third harmonic. It can also be used in other controlled CD, for example, in a static generator of reactive power.

Keywords: transverse capacitive compensation, AC traction network, electrified section of railroad, power losses decrease.