

УДК 621.33

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_17

Л.А. Герман¹, А.И. Чивенков²

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАТИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

¹ Самарский государственный университет путей сообщения

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены задачи увеличения пропускной способности участков железной дороги и снижения потерь мощности в тяговой сети. В качестве решения предлагается регулирование мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирования. Целью исследования является оценка снижения потерь мощности в тяговой сети при стабилизации напряжения на шинах статических генераторов реактивной мощности (СГРМ). Предложена схема замещения СГРМ в тяговой сети, позволяющая рассчитать потери мощности. Особенностью схемы является определение параметров с помощью итерационного расчета схемы электроснабжения межподстанционной зоны участка железной дороги. Рассмотрен закон регулирования мощности установленных СГРМ на постах секционирования отечественных железных дорог. Разработаны решения по увеличению эффективности компенсации реактивной мощности в тяговой сети.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, потери электроэнергии, регулирование напряжения, статический генератор реактивной мощности, тяговая сеть.

1. Постановка задачи

В последние годы установки поперечной емкостной компенсации стали устанавливать на постах секционирования (ПС) для повышения напряжения в тяговой сети и, следовательно – увеличения пропускной способности электрифицированного участка и снижения потерь мощности в тяговой сети. В настоящее время на постах секционирования включают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) серии «RU-DRIVE SVG», изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг» [1-4], которые доказали свою эффективность в повышении пропускной способности участков железной дороги. Для условий электроснабжения железной дороги в общем случае требования к автоматике регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирования определяются следующими двумя условиями.

Во-первых, необходимо повысить напряжение на шинах поста секционирования. При этом напряжение на токоприемнике должно удовлетворять требованиям нормативных документов (21 кВ в общем случае и 24 кВ для скоростных участков). Кроме того, дополнительно устанавливается условие: для повышения пропускной способности участка следует повысить напряжение в контактной сети так, чтобы пропустить заданное число поездов (включая «тяжелые»). Во-вторых, одновременно следует минимизировать потери электроэнергии, а это значит, что следует выбрать на шинах поста секционирования такой уровень напряжения, при котором будет обеспечена заданная пропускная способность при минимальной потере электроэнергии в тяговой сети. Эти два существенных требования к задаче регулирования мощности установки на посту секционирования и учитываются в статье.

В соответствии с [1] в СГРМ можно реализовать следующие законы регулирования мощности.

- *Фиксированная компенсация.* В режиме фиксированной компенсации «RU-DRIVE SVG» генерирует определенную величину реактивного тока в соответствии с уставкой.
- *Динамическая компенсация.* В режиме динамической компенсации «RU-DRIVE SVG» автоматически генерирует необходимый ток для поддержания заданного значения коэффициента мощности сети.
- *Регулирование напряжения.* В данном режиме в соответствии с верхним и нижним пределом напряжения, установленным в настройках параметров, «RU-DRIVE SVG» автоматически регулирует выходную мощность, тем самым осуществляя регулирование напряжения.
- *Коэффициент мощности.* Компенсация в данном режиме производится исходя из уставок коэффициента мощности в контрольных точках.
- *Регулирование реактивной мощности с ограничением по напряжению.*

В данном режиме «RU-DRIVE SVG» работает по контрольным точкам. Если напряжение контрольной точки не выходит за пределы допустимого диапазона, устройство работает в соответствии с режимом динамической компенсации. Если напряжение находится вне установленного диапазона, реализуется режим регулирования напряжения.

В настоящее время на электрифицированных участках железной дороги принят закон регулирования мощности СГРМ – «регулирование напряжения». Он определяет стабилизацию напряжения на шинах ПС на заданном напряжении $U_{\text{зад}}$, обычно на уровне от 27 до 28 кВ. В частности, на СГРМ Оричи Горьковской железной дороги установлено $U_{\text{зад}} = 28$ кВ, а на СГРМ Северной железной дороги – 27 кВ.

Цель исследования – оценить эффект снижения потерь мощности в тяговой сети при стабилизации напряжения на шинах СГРМ. В статье рас-

смотрены простые мгновенные схемы двухпутного участка с постом секционирования и СГРМ, рассчитаны уровни напряжения и потери мощности. Для расчетов, прежде всего, необходимо было определиться со схемой замещения межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока с СГРМ на посту секционирования.

II. Схема замещения межподстанционной зоны

Схема замещения СГРМ представлена на рис. 1. Регулируемое емкостное сопротивление подключено к шине поста секционирования, на котором установлено заданное напряжение $U_{\text{зад}}$, поддерживаемое СГРМ и которое генерирует ток $I_{\text{сг}}$. Ток нагрузки $I_{\text{нагр}}$, приходящийся на ПС, рассчитывается путем переноса (перераспределения) нагрузки тяговой сети между тяговыми подстанциями и ПС [6]. Следует учесть, что этот ток нельзя измерить на ПС. Например, при равных токах, симметрично расположенных от ПС, ток ПС будет равен нулю, в отличие от тока ПС после перераспределения.

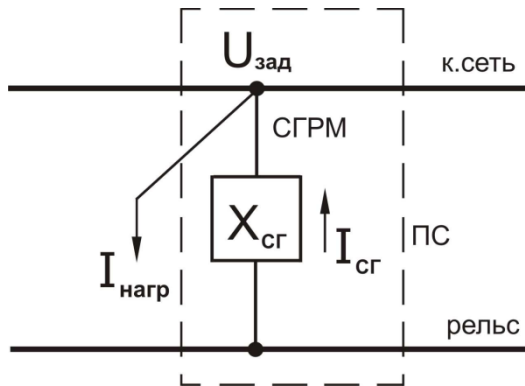


Рис.1. Схема замещения с СГРМ

Трудности измерения тока нагрузки, приходящегося на ПС, определяют погрешности расчета (и генерирования) необходимого емкостного тока существующих установок СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети.

Предлагается расчет мгновенной схемы вести в два шага. На первом шаге при расчете мгновенной схемы электроснабжения межподстанционной зоны тяговой сети схема замещения СГРМ представляется емкостным сопротивлением, значение которого определяется мощностью СГРМ. Es-

ли, например, мощность – 10 Мвар, то его сопротивление равно $X_{\text{сг}} = 10^3 \cdot 0,65 / 27,5$ Ом, где 0,65 – коэффициент, учитывающий увеличение мощности СГРМ для генерации инверсных гармоник.

После расчета мгновенной схемы участка анализируют напряжение на шинах СГРМ. Если это напряжение меньше заданного $U_{\text{зад}}$ (обычно от 27 до 28 кВ), то на втором шаге корректируют $X_{\text{сг}}$ для получения заданного напряжения путем изменения емкостного сопротивления (отрицательное сопротивление), при этом изменяется ток и мощность СГРМ. Если же после расчета мгновенной схемы напряжение выше заданного, заменяют емкостное сопротивление на индуктивное и изменяют его (регулируют положительное сопротивление) для достижения заданного напряжения $U_{\text{зад}}$. Обычно после второго этапа напряжение на шинах соответствует заданному. В противном случае необходим следующий шаг итерационного расчета. Нагрузочный режим для расчетных экспериментов задан, исходя из нагрузок по двум межподстанционным зонам реального участка Бумкомбинат-Лянгасово-Марадыковский Горьковской железной дороги с двумя постами секционирования, на которых работают СГРМ. По эксплуатационным данным средняя мощность тяговой нагрузки межподстанционной зоны принята равной 13 МВА с $\text{tg} = 0,75$ ($\cos = 0,8$). Равномерно распределенная нагрузка тяговой сети для упрощенного расчета сосредоточена на тяговых подстанциях и постах секционирования. Тогда на ПС приходится мощность $13/2 = 6,5$ МВА, т.е., средняя нагрузка равна $6500 / 27,5 = 236$ А. Таким образом, приняты нагрузки ПС в мгновенных схемах: минимальная – 120 А, средняя 200-300 А, максимальная – 500 А.

На межподстанционной зоне находятся три нагрузочных узла: два узла (1, 2) – тяговые подстанции и один узел (4) – ПС (рис. 2 и 3). Кроме того, для расчета добавлены еще нагрузочные узлы (3, 5) – два пункта параллельного соединения (ППС), их токи 200-400 А. Параметры тяговой сети двухпутного участка в 56 км с параллельным питанием путей: сопротивления $r = 0,12$ Ом/км, $x = 0,28$ Ом/км. Межподстанционная зона разделена постом секционирования и двумя ППС на четыре равных участка $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$ по 14 км (рис. 3). Нагрузки I_3, I_4, I_5 приложены к ППС и ПС. Сопротивления трансформаторов тяговых подстанций мощностью 40 МВА и напряжением 110 / 27,5 кВ совместно с сопротивлением питающих линий принимаем $Z_{01} = Z_{02} \approx X_{01} = X_{02} = 2,7$ Ом (приведено к напряжению 27,5 кВ, принимаем $X_{01} = X_{02} \approx Z_{01} = Z_{02}$). В расчетах используется программа РАСТ-05К [4].

В схеме замещения (рис. 3), принятой для расчетов по программе РАСТ-05К, специально сформированы по правилам в программе нагрузочные узлы в тяговой сети 4,6 (ППС) и 5 (ПС). Мощность СГРМ принята равной 10 Мвар, следовательно, максимальный генерируемый СГРМ ем-

костной ток равен $10 \cdot 10^3 \cdot 0,65 / 27,5 = 236 \text{ А}$ (коэффициент 0,65 определяет мощность СГРМ на компенсацию реактивной мощности без доли мощности на активный фильтр).

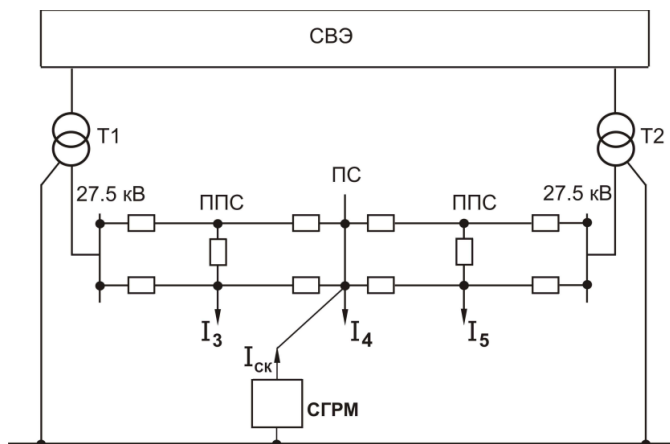


Рис. 2. Межподстанционная зона тяговой сети

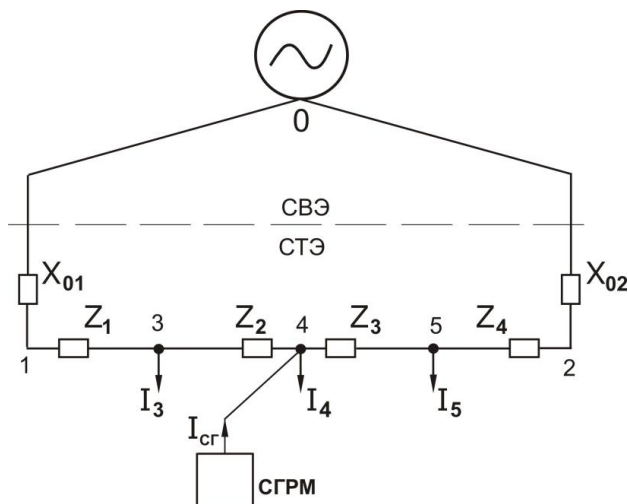


Рис. 3. Схема замещения межподстанционной зоны

III. Расчеты потерь мощности по программе РАСТ-05К

Расчеты выполнены при различной расстановке токов и их значений на ППС и ПС. Принят режим заданного напряжения на шинах СГРМ –

$U_{\text{зад}} = 27$ или 28 кВ, а напряжение холостого хода на ПС – 28 кВ. Выборочно в табл. 1 даны результаты расчетов потерь мощности в тяговой сети.

Таблица 1.
Результаты измерений

№	Токи ПС и ППС, А (мощность нагрузки, МВА)	Потери мощности без СГРМ $\Delta P_{6-ср}$, кВт	Потери мощности при включении СГРМ $\Delta P_{с-ср}$, кВт	Ток СГРМ, $I_{ср}$, А	$\frac{\Delta P_{с-ср}}{\Delta P_{6-ср}}$
1	ПС $I_4 = 600 = 360 + j \cdot 480$ (16,5)	1083	778 при $U_{ср} = 27$ кВ 913 при $U_{ср} = 28$ кВ	403 549	0,72 0,84
2	ПС $I_4 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (11)	481	353 при $U_{ср} = 27$ кВ 446 при $U_{ср} = 28$ кВ	208 373	0,73 0,93
3	ПС $I_4 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (8,3)	271	202 при $U_{ср} = 27$ кВ 245 при $U_{ср} = 28$ кВ	128 267	0,74 0,9
4	ПС $I_4 = 200 = 120 + j \cdot 160$ (5,5)	120	¹ 98 при $U_{ср} = 28$ кВ	- 155	- 1,29
5	ППС $I_3 = 600 = 360 + j \cdot 480$ (16,5)	850	777 при $U_{ср} = 27$ кВ 863 при $U_{ср} = 28$ кВ	225 350	0,91 1,02
6	ППС $I_3 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (11)	378	343 при $U_{ср} = 27$ кВ 391 при $U_{ср} = 28$ кВ	108 222	0,9 1,03
7	ППС $I_3 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (8,3)	183	¹ 187 при $U_{ср} = 28$ кВ	164	- 1,02
8	ППС $I_3 = I_5 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (22)	959	860 при $U_{ср} = 27$ кВ 968 при $U_{ср} = 28$ кВ	245 389	0,9 1,01
9	ППС $I_3 = I_5 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (16,5)	463	460 при $U_{ср} = 27$ кВ 486 при $U_{ср} = 28$ кВ	158 209	0,99 1,05
10	ППС $I_3 = I_5 = 200 = 120 + j \cdot 160$ (11)	206	¹ 225 при $U_{ср} = 28$ кВ	- 164	- 1,09

¹ при указанных нагрузках напряжение на ПС около 27 кВ и выше и СГРМ не генерирует емкостный ток.

При сосредоточении нагрузки у поста секционирования происходит эффективная компенсация реактивной мощности и потери в тяговой сети

снижаются на 7...18 % как при $U_{\text{зад}} = 27$ кВ, так и при 28 кВ. Причем при $U_{\text{зад}} = 28$ кВ повышается генерация емкостного тока и в результате перекompенсации уменьшается эффект в снижении потерь мощности. Также эффективна компенсация реактивной мощности по потерям электроэнергии при больших токах нагрузки, сосредоточенных у ППС. В общем случае при удалении тяговой нагрузки от поста секционирования (от СГРМ) и при ее уменьшении эффективность в снижении потерь мощности уменьшается.

Обобщим результаты всех измерений, в частности, указанных в табл. 1, в пяти положениях.

1. Расчет потерь мощности в тяговой сети при различных нагрузочных режимах показал, что возможны ситуации, когда при работе СГРМ на посту секционирования наблюдается режим перекompенсации реактивной мощности, что уменьшает эффект снижения потерь мощности.

2. Оценка целесообразного значения $U_{\text{зад}}$. При повышенном значении заданного напряжения $U_{\text{зад}}$ (например – 28 кВ) увеличивается емкостной ток СГРМ и, следовательно, расширяется зона работы СГРМ с перекompенсацией тяговой нагрузки. Как следствие, повышаются активные потери в тяговой сети. Например, при $U_{\text{зад}} = 27$ кВ потери – 778 кВт, а при $U_{\text{зад}} = 28$ кВ – 913 кВт (строка 1 в табл.1). Поэтому рекомендуется установить $U_{\text{зад}} = 27$ кВ, по крайней мере, на Северной железной дороге доказана возможность такого решения. Тем не менее, при росте числа тяжеловесного движения, с ростом их массы (например, до 12 000 т) возможен переход на повышенное значение $U_{\text{зад}} = 28$ кВ, так как в этом случае приоритет должен определяться надежным пропуском поездов повышенной массы, а не потерями электроэнергии. Это же относится и для вынужденных режимов и аварийных случаев.

3. Оценка режима тяговой сети при малых токах нагрузки. При снижении тяговой нагрузки повышается напряжение в тяговой сети и напряжение на ПС приближается к заданному напряжению на СГРМ $U_{\text{зад}}$. В этом случае при напряжении больше (или равно) $U_{\text{зад}}$ СГРМ переходит в режим генерации индуктивной нагрузки для стабилизации напряжения на уровне $U_{\text{зад}}$. Естественно, потери в тяговой сети растут. Это видно по строкам 4, 7, 9 табл. 1. В этом случае предлагается повышение $U_{\text{зад}}$ до значения 28 кВ, то есть следует $U_{\text{зад}}$ переключить с 27 на 28 кВ.

4. Расчеты показывают, что если по межподстанционной зоне перемещается «тяжелый» поезд, при расположении его между ППС и подстанциями потери мощности в тяговой сети при включенной СГРМ могут увеличиваться за счет перекompенсации. Однако, при приближении его к посту секционирования будет повышаться эффект компенсации реактивной мощности в тяговой сети. В реальных условиях на межподстанционной

зоне перемещается не один поезд, поэтому в дальнейшем следует рассматривать процесс работы межподстанционной зоны при пропуске заданного числа поездов с контролем суммарной потери электроэнергии.

5. Перспективы учета изменения параметров структур мгновенных схем замещения. СГРМ, установленный на посту секционирования, осуществляет генерацию реактивной составляющей тока контактной сети, потребляемой подвижными составами поездов. СГРМ компенсирует реактивные составляющие токов тяговых подстанций, соответственно во внешней сети электроснабжения. Таким образом, потери от реактивных токов сконцентрированы на участках от точки подключения СГРМ до точки потребления мощности подвижным составом. Для оценки пропорциональных соотношений величин потерь и формирования оптимальных режимов работы следует учитывать изменение сопротивлений отдельных участков контактной сети при движении составов.

На рис. 4 представлена схема замещения контактной сети при наличии двух движущихся поездов, сформированная из распределенных сопротивлений участков сети $Z_{кc1}$, $Z_{кc2}$, $Z_{кc3}$, $Z_{кc4}$. С точки зрения формирования схемы замещения, количество поездов, участков распределенных сопротивлений не имеет принципиального значения и может быть определено в зависимости от графика движения поездов.

На рис. 4 обозначены узлы подключения нагрузки 1, 2 с токами нагрузки I_1 , I_2 и узел 3 подключения СГРМ с током $I_{сг}$. Сопротивления отдельных участков являются переменными при движении поездов, но соблюдается условие $Z_{кc1} + Z_{кc2} = \text{const}$, $Z_{кc3} + Z_{кc4} = \text{const}$. Следовательно, при определении параметров величин токов и их фазовых углов СГРМ требуется учет изменения распределенных параметров контактной сети.

Очевидно, что существуют режимы, при которых компенсация реактивных составляющих токов может приводить к увеличению суммарных потерь. Минимальные потери соответствуют подключению точки потребления тока подвижным составом в узле 3 (рис. 4). Оптимизация алгоритмов регулирования с учетом переменных во времени параметров является задачей для продолжения исследований.

Следует учитывать, что потери от протекания реактивных составляющих токов на любом участке рассматриваемой сети компенсируются из системы внешнего электроснабжения. Исследования аналогичных процессов в промышленных сетях электроснабжения *FACTS* рассмотрены в [7, 8].

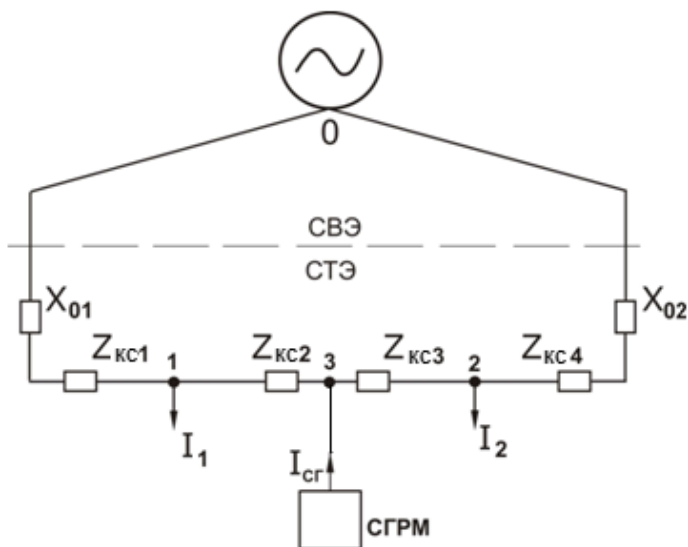


Рис. 4. Схема замещения при наличии двух поездов

IV. Выводы

Включение СГРМ на посту секционирования обеспечивает существенное повышение пропускной способности участков железной дороги.

1. Для расчета потерь мощности предложена схема замещения СГРМ в тяговой сети, параметры которой определяются путем итерационного расчета мгновенной схемы электроснабжения межподстанционной зоны участка железной дороги.

2. При различных нагрузочных режимах возможны ситуации, когда при работе СГРМ на посту секционирования в режиме стабилизации напряжения наблюдается режим перекомпенсации реактивной мощности, что уменьшает эффект снижения потерь мощности.

3. Закон регулирования мощности установленных СГРМ на постах секционирования отечественных железных дорог принят как стабилизация напряжения на шинах СГРМ на уровне заданного напряжения $U_{зад}$. Для снижения режимов перекомпенсации реактивной мощности предложено устанавливать заданное напряжение на уровне $U_{зад} = 27$ кВ.

4. При малых нагрузках в тяговой сети и приближении напряжения на посту секционирования к 27 кВ предлагается переключать режим $U_{зад}$ с 27 кВ на 28 кВ, что увеличит зону компенсации реактивной мощности, включая малые нагрузки, и поднимет уровень эффективной работы по компенсации реактивной мощности в тяговой сети до 28 кВ.

5. Трудности измерения тока нагрузки, проходящегося на ПС, определяют погрешности расчета необходимого емкостного тока существующих установок СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети.

© Герман Л.А., 2020
© Чивенков А.И., 2020

Библиографический список

- [1] Статический генератор реактивной мощности. Руководство по эксплуатации, ООО НПП «РУ Инжиниринг». – 26 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-drive.com/products/statische-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения 06.05.2020).
- [2] Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 316 с.
- [3] Герман Л.А. Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 2. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 6. С. 35-49.
- [4] Вржезинский А.Е., Смирнов С.А. Опыт внедрения устройств компенсации реактивной мощности на Северной железной дороге // Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта», Июнь 5, 2019, Москва, Россия. М.: РАС, 2019. Часть 2. С. 161-166.
- [5] Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: МИИТ, 2010. – 59 с.
- [6] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [7] Чивенков А.И., Севастьянов В.В. Силовой модуль интегрированной системы управления электрическими сетями // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 196-204.
- [8] Кубарьков Ю.П., Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Способ регулирования тока линии электропередачи в узле нагрузки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 1 (61). С. 128-138.

L.A. German¹, A.I. Chivenkov²

ELECTRICITY LOSSES IN AC TRACTION NETWORK WITH STATIC REACTIVE POWER GENERATOR

² The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper is devoted to the tasks of increasing the throughput capacity of railway sections and reducing power losses in the traction network. As a solution, it is proposed to control the power of the transverse capacitive compensation installation at the sectioning station. The purpose of the study is to assess the reduction of power losses in the traction network while stabilizing the voltage on the buses of static var generators (SVG). The equivalent circuit of the SVG in the traction network which allows calculating the power loss is proposed. A feature of the scheme is the determination of parameters using iterative calculation of the power supply scheme of the inter-substation zone of the railway section. The law of regulating the capacity of installed SVG at the sectioning stations of Russian railways is considered. Solutions to increase the efficiency of reactive power compensation in the traction network have been developed.

Keywords: electricity loss, reactive power compensation, traction network, static var generator, voltage regulation.

References

- [1] Stitcheskij generator reaktivnoj moshchnosti. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Static var generator. Manual], NPP «RU Inzhiniring» JSC. [Online]. Available at: <https://ru-drive.com/products/sticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> [Accessed: May 6, 2020] (in Russian).
- [2] L.A. German and A.S. Serebryakov, *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tyagovogo elektroснабzheniya zheleznyh dorog [Adjustable capacitive compensation devices in railway traction power supply systems]*. Moscow: UMC ZHDT, 2015 (in Russian).
- [3] L.A. German, «The adjustable filter compensating plants in AC current electric traction network. Part 2», *Electronics and electrical equipment of transport*, no. 6. pp. 36-40, 2018.
- [4] A.E. Vrzhezinsky and S.A. Smirnov, «Opyt vnedreniya ustrojstv kompensacii reaktivnoj moshchnosti na Severnoj zheleznoj doroge [Experience in implementing reactive power compensation devices on the Northern Railway]», in proc. *All-Russian Conf. Aktual'nye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta [Actual issues of the development of railway transport]*, June 5, 2019, Moscow, Russia, vol. 2, pp. 161-666 (in Russian).
- [5] L.A. German and D.A. Morozov, *Raschet tipovyh zadach tyagovogo elektroснабzheniya peremennogo toka na EVM [Calculation of typical tasks of trac-*

- tion power supply of alternating current on a computer].* Moscow: МИИТ, 2010 (in Russian).
- [6] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Electricity supply for electrified railways].* Moscow: Transport, 1982.
- [7] A.I. Chyvenkov and V.V. Sevastyanov, «The power module of integrated control sistem by power grids», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 2 (99), pp. 196-204, 2013.
- [8] Y.P. Kubarkov, A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev, A.V. Shalukho and I.A. Lipuzhin, «Algorithm of power line current formation at load node», *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, no. 1 (61), pp. 128-138, 2019.