

УДК 621.331

В. Д. БАРДУШКО (ИрГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра Электроснабжение железнодорожного транспорта, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, тел.: +7 (3952) 63-83-45, эл. почта: barvadan@iriit.irk.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Дальнейшее повышение энергетической эффективности дорог переменного тока средствами устройств поперечно-емкостной компенсации может быть реализовано с привлечением таких концепций, которые ранее были невозможны. Понятно, что наилучшие результаты можно получить при наличии регулируемых компенсирующих устройств (КУ) непосредственно на каждом электровозе. В этом случае, закон регулирования таких КУ сводился бы к поддержанию их емкостных токов, равных по модулю индуктивным тяговым токам, которые в каждый момент времени реализуются соответствующими электровозами (ЭПС). Однако, в ближайшее время вряд ли появятся дешевые, малогабаритные и с достаточной необходимой мощностью конденсаторные установки и средства их регулирования, которые могли бы быть смонтированы на каждом электровозе. Кроме того, во-первых, опыт эксплуатации показывает, что необходимость решения вопросов снижения реактивной мощности, с точки зрения экономического критерия, имеет место далеко не на всех межподстанционных зонах (МПЗ), обеспечивающих тягу поездов. Во-вторых, коэффициент использования таких КУ, если они появятся, по понятным причинам будет достаточно низким.

Многочисленные исследования [1, 2, 3], касающиеся повышения энергетической эффективности КУ, базируются на принципе, который предполагает одну КУ в МПЗ с неизменной координатой, равной примерно середине длины МПЗ. Однако, если новые технологии приведут к появлению новых дешевых и надежных конденсаторов, то КУ может быть выполнена распределенной вдоль МПЗ. Каждая отдельная батарея такой распределенной КУ может управляться на основе закона, непрерывно формируемого в ходе реального времени. Вид этого закона определяется значением координат ЭПС, располагающихся в МПЗ и их реактивных токов. Могут иметь место различные варианты распределенной КУ:

1) все частичные батареи включены и имеют оптимальное с точки зрения энергетической

эффективности емкостные токи, которые могут быть нерегулируемыми;

2) для большей эффективности, емкостные токи изменяются в зависимости от индуктивных токов ЭПС и ряда других факторов.

Ниже рассмотрен вопрос синтеза параметров распределенной в границах МПЗ КУ, для которой в каждый расчетный момент времени включена лишь одна батарея в той или иной координате. И координата, и ток КУ должны соответствовать минимуму целевой функции. То есть в каждый момент времени емкостной ток и координата включения КУ, должны отвечать критерию оптимизации. Таким образом, целевая функция, в качестве которой целесообразно принять потери электроэнергии в тяговой сети, является функцией двух переменных. Задачей анализа целевой функции является определение тока КУ (I_k) и координаты ее подключения (y) в МПЗ.

Упрощенный подход решения этой задачи может быть основан на методе равномерно распределенной нагрузки вдоль тяговой сети. Вид эпюры токов в тяговой сети [4], в этом случае имеет вид представленный на рис. 1.

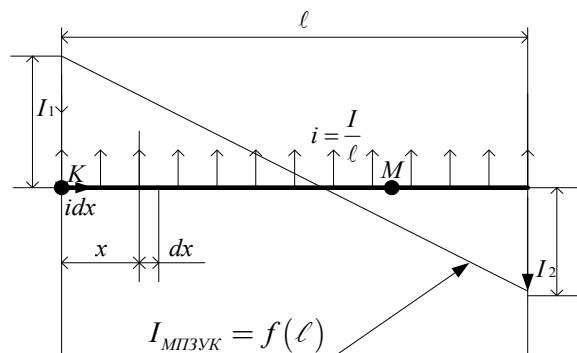


Рис. 1. К определению закона изменения тока в тяговой сети расчетной МПЗ при отсутствии КУ для наиболее общего случая ($I_1 \neq I_2$).

Следует отметить, что этот метод будет тем точнее определять искомые параметры, чем выше размеры движения, то есть чем большее число поездов размещается в МПЗ. Это обстоятельство оправдывает использование метода равномерных нагрузок в ряде случаев, поскольку

устройства компенсации реактивной мощности как раз и целесообразны при высоких размерах движения. Для дальнейшего анализа явлений в тяговой сети необходимо получить закон изменения тока вдоль межподстанционной зоны. Обращаясь к рис. 1, можно выразить погонную тяговую нагрузку через суммарную нагрузку от всех электропоездов (ЭПС) I , находящихся в межподстанционной зоне (МПЗ)

$$i = \frac{I}{\ell},$$

где $I = I_1 + I_2$; I_1 ; I_2 - токи фидеров смежных подстанций, питающие расчетную МПЗ.

На основании первого закона Кирхгофа для узла следует $I_1 - idx = 0$. Тогда для произвольной точки M справедливо

$$\begin{aligned} I_x &= I_1 - \int_0^x idx; \\ I_x &= -\frac{I_1 + I_2}{\ell} x + I_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Полезно заметить, что для частного случая справедливо

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}; \quad I_x = -\frac{I}{\ell} x + \frac{I}{2}.$$

Выражение (1) с определенной степенью точности отражает закон изменения тока в границах МПЗ при отсутствии поперечного емкостного компенсирующего устройства (КУ). При наличии КУ в произвольной координате ее y расчетная схема трансформируется к виду, представленному на рис. 2.

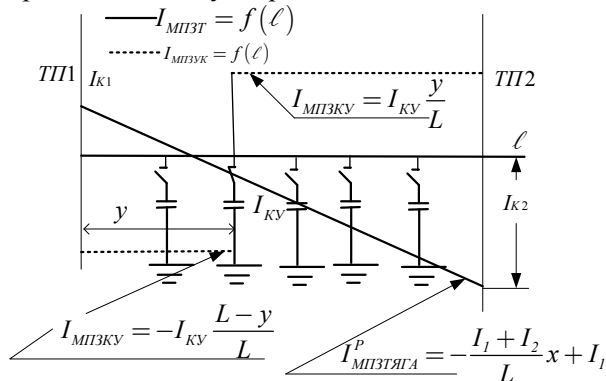


Рис. 2. К определению закона изменения тока в тяговой сети расчетной МПЗ при наличии КУ.

Потери электроэнергии в тяговой сети зависят от параметров тяговой сети и протекающего по ней тока. При неизменных параметрах тяговой сети потери зависят от тока, величина ко-

торого меняется вследствие изменения тяговой нагрузки и от тока УК. Ток УК, компенсируя реактивную составляющую, уменьшает потери в тяговой сети, величина которых, однако, не может снизиться до нуля, что означало бы прекращение передачи к электроподвижному составу электроэнергии.

Закон изменения тока вдоль тяговой сети в границах анализируемой МПЗ позволяет записать целевую функцию в виде двух составляющих (для упрощения анализа принято, что погонное сопротивление тяговой сети равно единице, что не влияет на ход анализа и получаемые результаты, связанные с оценкой координат и тока КУ)

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \int_0^y \left(-\frac{I_1 + I_2}{L} x + I_1 - I_k \frac{L - y}{L} \right)^2 dx; \\ \Delta P_2 &= \int_y^L \left(-\frac{I_1 + I_2}{L} x + I_1 + I_k \frac{L - y}{L} \right)^2 dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Необходимость представления закона в виде двух составляющих определяется тем обстоятельством, что, как это видно из расчетной схемы на рис. 3, правее точки токораздела тока КУ, знак тока КУ меняется на противоположный и в отличие от тягового тока (уместно напомнить, что речь идет о реактивных составляющих), протекающего по тяговой сети, автоматически не может быть отражен формулой.

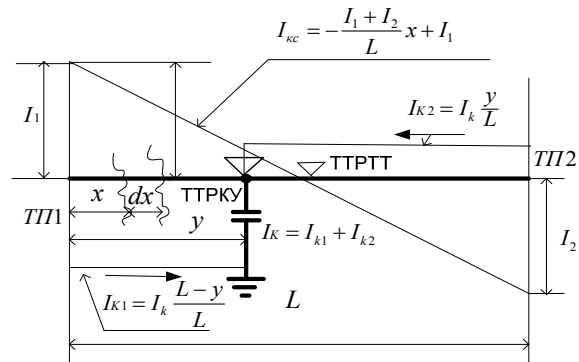


Рис. 3. К формированию целевой функции.

На рис. 3 ТТРТТ – точка токораздела реактивной составляющей тяговой нагрузки; ТТРКУ – точка токораздела тока КУ.

На основе выражения (2) целевая функция примет вид

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (4)$$

Характер изменения потерь, выступающих в качестве целевой функции, носит квадратичный характер от токов, а потери увеличиваются с увеличением этих токов. Исходя из этих оче-

видных физических представлений, можно отказаться от детального анализа целевой функции на экстремальные значения, поскольку становится ясным, что целевая функция от тока КУ является функцией параболического типа и имеет минимум.

Используя стандартные приемы анализа, можно получить искомые параметры как аргументы, соответствующие минимуму целевой функции по искомым параметрам. Частные производные по искомым параметрам $\frac{\partial}{\partial I_k} \Delta P_{\Sigma}$, $\frac{\partial}{\partial y} \Delta P$, очевидно, имеют вид, представленные выражениями ниже

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial I_k} \Delta P_{\Sigma} &= \frac{(L-y) \cdot (2 \cdot I_1 \cdot y^2 + 2 \cdot I_2 \cdot y^2 + I_1 \cdot L^2)}{L^2} + \\ &+ \frac{(L-y)(2 \cdot I_k \cdot L^2 - I_2 \cdot L^2 - 4 \cdot I_1 \cdot L \cdot y - 2 \cdot I_k \cdot L \cdot y)}{L^2}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \Delta P &= -\frac{I_k(6 \cdot I_1 \cdot y^2 + 6 \cdot I_2 \cdot y^2 + 5 \cdot I_1 \cdot L^2 - I_2 \cdot L^2)}{L^2} + \\ &+ \frac{I_k(2 \cdot I_k \cdot L^2 - I_2 \cdot I_1 \cdot L \cdot y - 4 \cdot I_2 \cdot L \cdot y - 2 \cdot I_k \cdot L \cdot y)}{L^2}. \end{aligned}$$

Поскольку координата y входит в уравнения в третьей степени, то решение содержит три корня, приемлемым же является тот, который имеет физический смысл: во-первых координата не должна быть отрицательной и, во-вторых лежать внутри границ анализируемой МПЗ. Аналогично следует поступить и по отношению тока КУ, имеющего, как это показывает анализ уравнений, два корня.

$$\left\{ \begin{aligned} y_1 &= L; \\ y_2 &= \frac{L^2 \left(\frac{4 \cdot I_1 \cdot L + 2 \cdot I_k \cdot L}{2 \cdot L^2} + \frac{\sqrt{2 \cdot I_1^2 + 2 \cdot I_2^2 - 4 \cdot I_2 \cdot I_k + I_k^2}}{L} \right)}{2 \cdot (I_1 + I_2)}; \\ \text{и} \\ y_3 &= \frac{L^2 \left(\frac{\sqrt{2 \cdot I_1^2 + 2 \cdot I_2^2 - 4 \cdot I_2 \cdot I_k + I_k^2}}{L} - \frac{4 \cdot I_1 \cdot L + 2 \cdot I_k \cdot L}{2 \cdot L^2} \right)}{2 \cdot (I_1 + I_2)}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I_{k1} &= 0; \\ I_{k2} &= \frac{I_2 \cdot L^2 - 6 \cdot I_2 \cdot y^2 - 5 \cdot I_1 \cdot L^2}{2 \cdot (L^2 - L \cdot y)} - \\ &+ \frac{-6 \cdot I_1 \cdot y^2 + I_2 \cdot I_1 \cdot L \cdot y + 4 \cdot I_2 \cdot L \cdot y}{2 \cdot (L^2 - L \cdot y)}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Значения тока КУ получается подстановкой одного из корней (y) в последнее уравнение. Значение (y) – обратной подстановкой. Ниже на рис. 4 и рис. 5 представлена графическая интерпретация анализируемой задачи.

Аналогично можно представить зависимость потерь мощности от реактивных токов в тяговой сети при наличии КУ- $\Delta P_{\Sigma KV}(y)$; $\Delta P_{TC}(y)$ - то же при отсутствии КУ (см. рис.6).

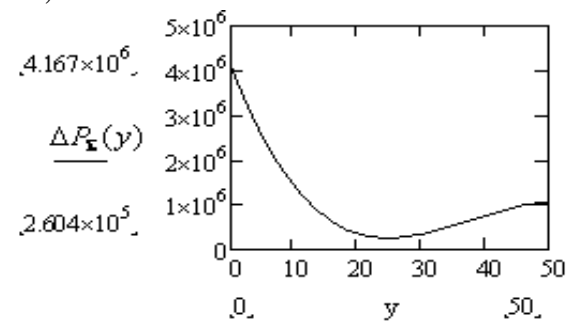


Рис. 4. Графическая интерпретация изменения целевой функции от места подключения КУ

Таким образом, параметрами распределенной КУ, расчетная схема которой приведена на рис. 2, являются ее координата (y) и емкостной ток $I_k(y)$.

Законы формирования тока КУ и ее координаты при упрощенном методе формируются на основе минимального объема информации, состоящей из характеристики МПЗ-ее длины L и токов фидеров смежных тяговых подстанций I_1, I_2 , питающих анализируемую МПЗ.

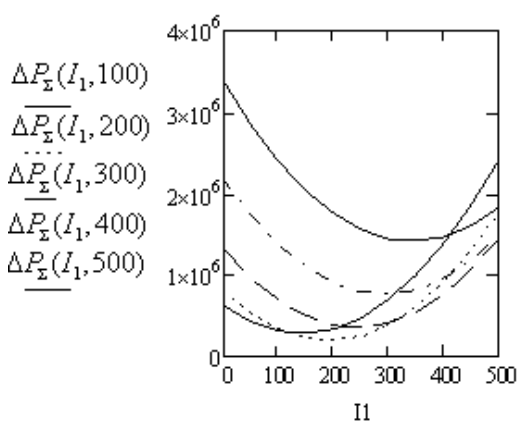


Рис. 5. Графическая интерпретация изменения целевой функции от соотношения токов тяговых подстанций

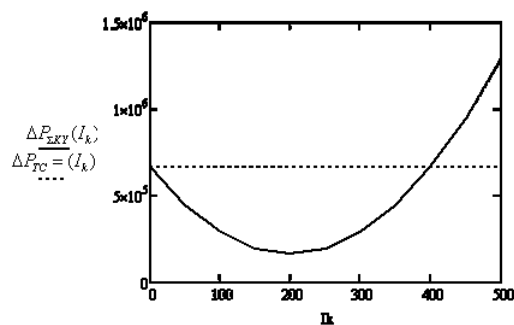


Рис. 6. Графическая интерпретация изменения целевой функции $\Delta P_{\Sigma кУ}$ от тока компенсирующей установки (прямая горизонтальная линия – потери мощности в тяговой сети при отсутствии КУ)

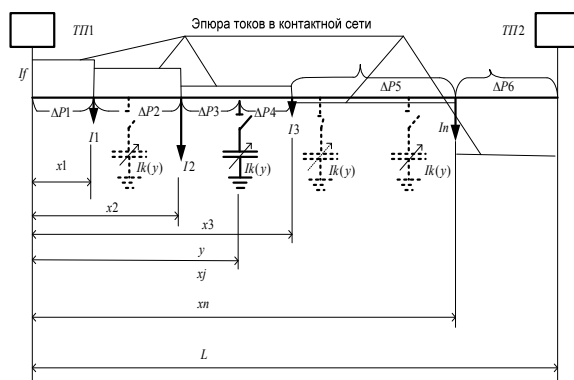


Рис. 7. К анализу формирования параметров и закона регулирования распределенной КУ по токам ЭПС и их координатам

Уточненный метод основывается на решении управляющей вычислительной машиной (УВМ) отдельных мгновенных схем, отстоящих на шаг дискретизации во времени Δt .

Для получения оптимальных параметров закона управления системой распределенной КУ целесообразно обратиться к схеме, приведенной на рис. 5.

Закон регулирования места включения (у) и емкостного тока $I_k(y)$, как будет показано ниже, синтезируется на основании индуктивных токов ЭПС и их координат – x_j . Этот принцип требует привлечения информации о координатах ЭПС и их реактивных токах для любого момента времени, регулирования распределенной КУ. Поэтому реализация рассматриваемого способа повышения энергетической эффективности тяговых сетей переменного тока должна формироваться с привлечением современных систем получения и передачи информации. Такими, например, являются ГЛОНАСС.

Принимая в качестве критерия минимальные потери в тяговой сети можно известным методом определить искомые параметры.

Также как и в предыдущем случае, целевой функцией являются потери мощности в тяговой

сети, выражение для которых можно составить на основании схемы рис. 7.

$$\Delta P1 = \frac{x1 \cdot [(I1 \cdot L + I2 \cdot L + I3 \cdot L + I4 \cdot L - I_k \cdot L) - (I1 \cdot x1 + I2 \cdot x2 + I3 \cdot x3 + I4 \cdot x4 - I_k \cdot y)]^2}{L^2}$$

или, свернув

$$\Delta P1 = \frac{x1 \cdot \left[L \cdot \left(\sum_{i=1}^n Ii - \sum_{i=1}^n Ii \cdot xi - I_k \cdot (L - y) \right) \right]^2}{L^2}$$

Аналогично

$$\Delta P4 = \frac{(x3 - y) \cdot \left[L \cdot \left(\sum_{i=3}^n Ii - \sum_{i=1}^n Ii \cdot xi - I_k \cdot y \right) \right]^2}{L^2};$$

$$\Delta P5 = \frac{(x3 - x4) \cdot \left[L \cdot \left(\sum_{i=4}^n Ii - \sum_{i=1}^n Ii \cdot xi - I_k \cdot y \right) \right]^2}{L^2};$$

$$\Delta P6 = \frac{(x4 - L) \cdot \left[L \cdot \left(I_k \cdot y - \sum_{i=1}^n Ii \cdot xi \right) \right]^2}{L^2};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P1 + \Delta P2 + |\Delta P3| + |\Delta P4| + \Delta P5 + \Delta P6.$$

В выражении для ΔP_{Σ} два его члена принимаются по абсолютной величине. Логика этого вытекает из анализа слагаемых $\Delta P3$ $\Delta P4$, в которых имеются множители $(x2 - y)$ и $(x3 - y)$. Ясно, что y , “пробегая” значения от 0 до L , приводит к ситуации, когда они могут быть отрицательными. Потери мощности отрицательными быть не могут, а поэтому $\Delta P3$ и $\Delta P4$ принимаются по абсолютной величине.

Искомые параметры определяются известным математическим методом, то есть решением уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial I_k} \Delta P_{\Sigma} = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \Delta P_{\Sigma} = 0. \end{cases}$$

Анализ показывает, что выражения для рассмотренных четырех нагрузок (ЭПС) получаются очень громоздкими. Однако для I_k оно является менее сложным и поэтому целесообразно для каждой мгновенной схемы сначала определять оптимальный ток КУ и обратной подстановкой находить оптимальную координату включения той или иной секции распределенной КУ.

Геометрическая интерпретация результатов, приведенная на рис. 8, показывает, что при симметричных мгновенных схемах могут иметь место два минимума и, в этом случае, целесообразно полученную оптимальную мощность КУ разделить пополам и включить в местах минимума.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электропитания железных дорог [Текст]: учебное пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М.: Транспортная книга, 2013. – 268 с.
2. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183с.
3. Герман, Л. А. Особенности компенсации реактивной мощности в системе тягового электропитания железных дорог [Текст] / Л. А. Герман, Б. М. Бородулин // Электро. – 2010 – №3. – С. 50 – 52.
4. Марквардт, К. Г. Электропитание электрических железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528с.

Поступила в печать 14.10.2013.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

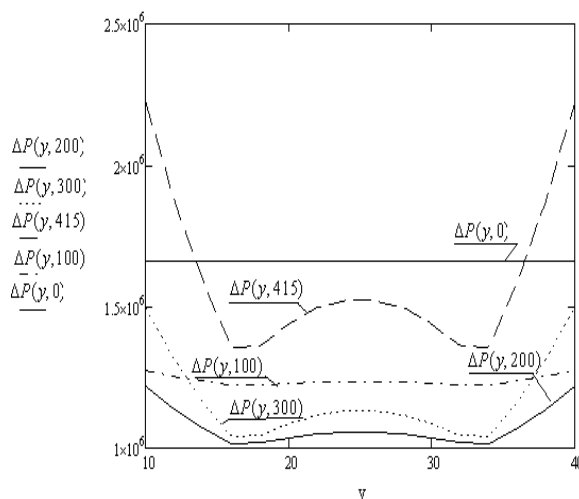


Рис. 8. Вид целевой функции при характеристиках режима отдельной мгновенной схемы в МПЗ: $L = 50 \text{ км}$; $I1 = 300 \text{ А}$; $I2 = 15 \text{ А}$; $I3 = 15 \text{ А}$; $I4 = 300 \text{ А}$; $x1 = 8.33 \text{ км}$; $x2 = 16.66 \text{ км}$; $x3 = 33.33 \text{ км}$; $x4 = 41.66 \text{ км}$

При большем числе ЭПС в МПЗ выражения для параметров оптимизации распределенной КУ существенно усложняются. Анализ показывает, что в этом случае наиболее рациональным является вычисление на УВМ значений целевой функции $\Delta P_{\Sigma}(y)$ с дальнейшим определением минимума простым перебором.

В заключение следует заметить, что приведенный анализ распространяется на случаи для двухстороннего питания тяговой сети однопутного участка или двухстороннего питания тяговой сети с полным параллельным соединением подвесок путей.

REFERENCES

1. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: uchebnoe posobie* [Position regulated capacitive compensation in traction power supply systems of railways: tutorial]. Moscow, Transportnaya kniga Publ., 2013. 268 p.
2. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Capacitor units electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p.
3. German L. A., Borodulin B. M. *Osobennosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog* [Features reactive power compensation in traction power supply system of railways]. *Elektro – Electro*, 2010, no.3, pp.50-52.
4. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznnykh dorog* [Electricity electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Наилучшие результаты повышения энергетической эффективности дорог переменного тока средствами устройств поперечно-емкостной компенсации можно получить при наличии регулируемых компенсирующих устройств непосредственно на каждом электровозе.

Новые технологии приведут к появлению новых дешевых и надежных конденсаторов, компенсирующие устройства могут быть выполнены распределенными вдоль межподстанционной зоны. Каждая отдельная батарея такой распределенной компенсации может управляться на основе закона, непрерывно формируемого в ходе реального времени. Вид закона управления определяется значением координат электроподвижного состава, располагающихся в межподстанционной зоне и их реактивных токов.

В статье рассматривается вопрос потенциальной возможности повышения эффективности поперечно-емкостных компенсаций на основе их регулирования в зависимости от мест размещения электроподвижного состава и его индуктивного электропотребления.

Ключевые слова: потери мощности, тяговая сеть, современные средства передачи информации, закон регулирования.

УДК 621.331

В. Д. БАРДУШКО (ІрГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, кафедра Електропостачання залізничного транспорту, Росія, 664074, м. Іркутськ, вул. Чернишевського, 15, тел. +7 (3952) 63-83-45, ел. пошта: barvadan@iriit.irk.ru

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЄМНІСНИХ КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Найкращі результати підвищення енергетичної ефективності залізниць змінного струму за допомогою пристроїв поперечно-ємнісної компенсації можна отримати за наявності регульованих компенсуючих пристроїв безпосередньо на кожному електровозі.

Нові технології приведуть до появи нових дешевих і надійних конденсаторів, компенсуючі пристрої можуть бути виконані розподіленими уздовж міжпідстанційної зони. Кожна окрема батарея такої розподіленої компенсації може управлятися на основі закону, який формується безперервно в ході реального часу. Вид закону управління визначається значенням координат електрорухомого складу, який розташовується на міжпідстанційній зоні та їх реактивних струмів.

У статті розглядається питання потенційної можливості підвищення ефективності поперечно-ємнісних компенсаций на основі їх регулювання в залежності від місць розміщення електрорухомого складу і його індуктивного електроспоживання.

Ключові слова: втрати потужності, тягова мережа, сучасні засоби передачі інформації, закон регулювання.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.331

V. D. BARDUSHKO (IrGUPS)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street,, Irkutsk, Russia, 664074, tel.: +7 (3952) 63-83-45, e-mail: barvadan@iriit.irk.ru

PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF PARALLEL CAPACITIVE COMPENSATING DEVICES IN TRACTION NETWORK IN MODERN CONDITIONS

The best results to improve energy efficiency of AC railroads are capacitance compensation devices that can be controlled in the presence of compensating devices directly to each locomotive.

New technologies lead to new cheap and reliable capacitors, compensating devices can be made distributed along zone between traction substations. Each separate battery such distributed compensation can be controlled on the basis of law that continuously generated during real time. View of the control law is determined by the coordinates of electric rolling stock which ranging in zone between substations and reactive currents.

The article discusses the issue of potential opportunities to improve the efficiency of the transverse capacitive compensation on the basis of their regulation, depending on the placement of the electric rolling stock and its inductive energy consumption.

Keywords: Loss of power, traction network, modern means of information transmission, the law of regulation.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Panasenko N. V.*