

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2020)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

KZ19VRY00029272

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных
и информационных систем, электромеханики
и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/BFOJ5102>

К. Ж. Калиева, З. К. Джабагина, Г. Т. Асканбай

Казахская академия транспорта и коммуникации имени М.Тынышпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы

ОСОБЕННОСТИ СИММЕТРИРОВАНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОРОГ 2×25 КВ

В данной работе приведен один из способов регулирования напряжения на тяговой сети с использованием применения продольной и поперечной емкостной компенсации путем симметрирования токов и напряжения по прямой и обратной последовательности на шинах тяговой подстанции.

Несимметричный режим в тяговой сети может быть вызван в несимметрией как источников, так и потребителей электрической энергии. При симметричном режиме должно быть равномерное распределение несимметричной нагрузки по фазам, что достигается применением специальных мер симметрирования.

Поэтому установка поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях решает такие задачи как компенсация реактивной мощности и симметрирование тяговой нагрузки.

На тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог необходима компенсация реактивной мощности прямой последовательности и симметрирование, то в этих тяговых сетях применяются однофазные установки поперечной ёмкостной компенсации, включаемые на отстающую фазу трансформатора.

Предлагаемый способ позволяет уменьшать реактивное сопротивление сети за счёт компенсации индуктивного сопротивления линии, трансформатора, контактной сети ёмкостным сопротивлением конденсаторов и соответственно улучшается качества электроэнергии в тяговой сети.

В данной статье произведены расчеты токи прямой последовательности и обратной последовательности тяговой нагрузки после включения установки поперечной ёмкостной компенсации и коэффициент несимметрии токов при включении на

отстающую фазу установки поперечной ёмкостной компенсации с установленной мощностью. Из полученных расчётных данных видно, что за счёт включения установки поперечной ёмкостной компенсации ток обратной последовательности, коэффициент несимметрии токов, ток прямой последовательности уменьшается.

Ключевые слова: система электроснабжения, тяговая подстанция, поперечная ёмкостная компенсация.

Введение

Система электроснабжения 2×25 кВ имеет ряд достоинств по сравнению с обычной системой переменного тока 25 кВ: меньшие нагрузки на провода контактной сети и потери напряжения и энергии в тяговой сети, уменьшенные влияния на линии связи.

Электрические железные дороги представляют собой несимметричный приёмник электрической энергии с несинусоидальной формой кривой потребления тока, с низким коэффициентом мощности и резко переменным характером нагрузки. Эти качества отрицательно влияют на уровень напряжения в тяговой сети [1].

Практика эксплуатации электрифицированных железных дорог показывает, что режим движения поездов и качество режима напряжения взаимосвязаны. Уровень напряжения и его отклонение влияют на скорость движения поездов и, следовательно, на экономические показатели работы железной дороги в целом.

Задача улучшения показателей качества напряжения в тяговой сети сводится к поддержанию его на оптимальном уровне, уменьшению отклонения напряжения от оптимального уровня, уменьшению несимметрии в тяговой сети электрических железных дорог.

Материалы и методы

В связи с этим возникает необходимость применения специальных мер по повышению уровня и стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций. Причём эффективность таких мер должна оцениваться и по их влиянию на снижение несимметрии напряжений, вызываемой тяговой нагрузкой.

Снижение потерь позволяет значительно увеличить расстояние между тяговыми подстанциями, что даёт определенный экономический эффект, и располагать их в наиболее удобных для эксплуатации местах.

Эти преимущества определили направления, где используется система дороги с большой грузонапряженностью, пролегающие в малонаселенных районах, а также линии с высокоскоростным пассажирским движением, отличающиеся большими токами электроподвижного состава.

В системе электроснабжения 2×25 кВ, так же как и в системе 25 кВ, необходимо осуществлять симметрирование токов в линиях электропередачи. Это симметрирование выполняют циклическим изменением присоединения трансформаторов подстанций к фазам высоковольтной линии (вл), так называемая фазировка.

В схеме фазировки однофазных трансформаторов (рисунок 1) к шинам контактной сети подключают начала первых обмоток 27,5 кВ обоих трансформаторов, к шинам питающих проводов концы вторых обмоток. Концы первых обмоток соединяют с началами вторых и подключают к рельсам.

Несимметричный режим может быть вызван в общем случае несимметрией как источников, так и потребителей электрической энергии. При симметричном режиме должно быть равномерное распределение несимметричной нагрузки по фазам, что достигается применением специальных мер симметрирования.

Несимметричный режим может быть вызван в общем случае несимметрией как источников, так и потребителей электрической энергии. При симметричном режиме должно быть равномерное распределение несимметричной нагрузки по фазам, что достигается применением специальных мер симметрирования.

Одним из способов уменьшения несимметрии является использование установок поперечной ёмкостной компенсации (УППК).

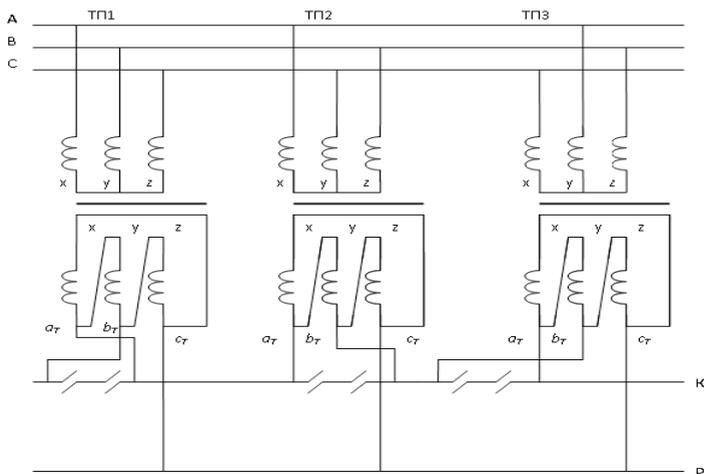


Рисунок 1 – Схема подключения тяговых подстанций к высоковольтной линии

Применение реактора объясняется с одной стороны, желанием разгрузить конденсаторы от высших гармоник токов электровозов, протекание которых по конденсаторам связано с повышенными потерями энергии в них, а с другой стороны целесообразностью шунтирования наибольших гармоник токов электровозов и недопущения их выхода в питающую сеть.

В трёхфазных сетях УППК выполняют трехфазными и их ёмкостную мощность равномерно распределяют по всем трём фазам, компенсируя передачу реактивной мощности от источника к потребителю (рисунок 2).

В тяговых сетях переменного тока перед установками поперечной ёмкостной компенсации ставят задачу [2] не только компенсации реактивной мощности, но и симметрирование тяговой нагрузки (компенсации мощности обратной последовательности).

Ввиду того, что на тяговых подстанциях переменного тока необходима компенсация реактивной мощности прямой последовательности и симметрирование, то в этих сетях нашли применение однофазные установки поперечной ёмкостной компенсации [3], включаемые на отстающую фазу трансформатора.

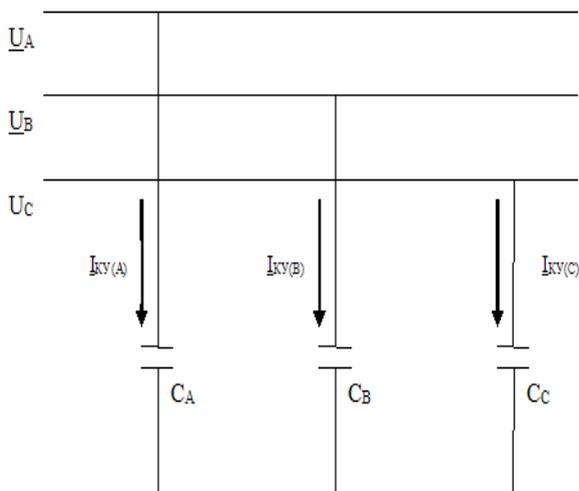


Рисунок 2 – УППК в а трехфазных сетях

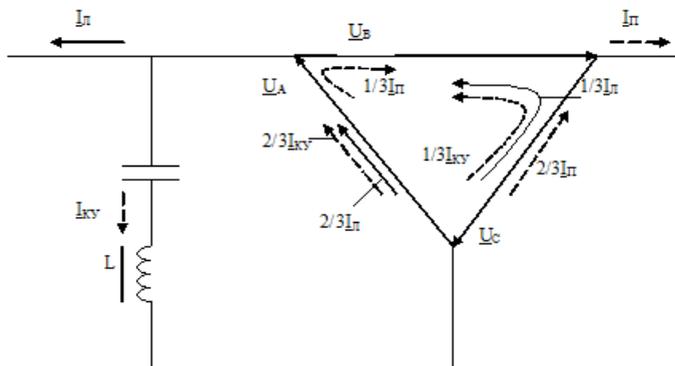


Рисунок 3 – Схемы включения УППК

Ток УППК распределится по фазам обмотки 27,5 кВ трансформатора следующим образом [2]:

$$\underline{I}_{\text{КУ(А)}} = \frac{2}{3} \underline{I}_{\text{КУ}} \quad (1)$$

$$\underline{I}_{\text{КУ(В)}} = -\frac{1}{3} \underline{I}_{\text{КУ}} \quad (2)$$

$$\underline{I}_{\text{КУ(С)}} = -\frac{1}{3} \underline{I}_{\text{КУ}} \quad (3)$$

Ток прямой последовательности ($\underline{I}_{\text{КУa1}}$) и ток обратной последовательности ($\underline{I}_{\text{КУa2}}$) определяются следующим образом:

$$\underline{I}_{\text{КУa1}} = \frac{1}{3} (\underline{I}_{\text{КУ(А)}} + a \underline{I}_{\text{КУ(В)}} + a^2 \underline{I}_{\text{КУ(С)}}) \quad (4)$$

$$\underline{I}_{\text{КУa2}} = \frac{1}{3} (\underline{I}_{\text{КУ(А)}} + a^2 \underline{I}_{\text{КУ(В)}} + a \underline{I}_{\text{КУ(С)}}) \quad (5)$$

Установка поперечной емкостной компенсации является нерегулируемой обладает неизменным комплексным сопротивлением $\underline{Z}_{\text{КУ}}$, пренебрегая активным сопротивлением конденсатора и реактора УППК, можно считать:

$$\underline{Z}_{\text{КУ}} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = -j \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right) = j(X_C - X_L), \quad (6)$$

где X_C и X_L – сопротивления соответственно конденсатора и реактора УППК на частоте 50 Гц.

Реактор установки поперечной ёмкостной компенсации настраивается с ёмкостью УППК в резонанс напряжений по третьей гармонике:

$$3\omega L = \frac{1}{3\omega C}, \quad (7)$$

где $\omega = 314$ рад/с при $f = 50$ Гц

Из формулы (7) следует, что

$$X_L = \omega L = \frac{1}{9\omega C} = \frac{1}{9} X_C \quad (8)$$

Ток конденсаторной установки определяется по формуле [4]:

$$I_{KV} = \frac{U_{KV}}{Z_{KV}} = \frac{U_{KV}}{X_C - X_L} \quad (9)$$

С учётом формулы (9) получаем:

$$I_{KV} = \frac{U_{KV}}{X_C - \frac{1}{9} X_C} = \frac{9}{8} \cdot \frac{U_{KV}}{X_C} \quad (10)$$

Определим напряжение на конденсаторе [6]:

$$U_C = I_{KV} \cdot X_C = \frac{9}{8} \cdot \frac{U_{KV}}{X_C} \cdot X_C = \frac{9}{8} U_{KV} \quad (11)$$

Напряжение на емкости УППК при наибольшем напряжении 29 кВ должно быть равно:

$$U_{C_{MAX}} = \frac{9}{8} U_{KV} = \frac{9}{8} 29 = 32,7 \text{ кВ}$$

При номинальном напряжении 27,5 кВ напряжение на конденсаторе будет равно:

$$U_{сНОМ} = \frac{9}{8} U_{кУ} = \frac{9}{8} 27,5 = 31 \text{ кВ}$$

Определим наибольшую установленную мощность конденсатора УППК:

$$Q_{сУСТ} = U_{сМАХ} \cdot I_{кУМАХ} = \frac{9}{8} \cdot 29 \cdot \frac{9}{8} \cdot \frac{29}{X_c} = \left(\frac{9}{8} \cdot 29 \right)^2 \cdot \frac{1}{X_c} \quad (12)$$

Используемая ёмкостная мощность УППК при номинальных условиях определится:

$$Q_{сИСП} = U_{сНОМ} \cdot I_{кУНОМ} = \frac{9}{8} \cdot 27,5 \cdot \frac{9}{8} \cdot \frac{27,5}{X_c} = \left(\frac{9}{8} \cdot 27,5 \right)^2 \cdot \frac{1}{X_c} \quad (13)$$

Следовательно, если УППК должна надёжно работать при 29 кВ, то генерируемая конденсаторами УППК мощность при номинальном напряжении 27,5 должна быть меньше установленной в 1.11раз.

Генерируемая мощность при номинальных условиях меньше установленной ёмкостной мощности УППК в 1,25 раза.

Результаты и обсуждение

Включение последовательно с конденсаторами УППК реактора приводит к снижению используемой мощности УППК. Сам реактор, настроенный с ёмкостью УППК в резонанс на третью гармонику согласно формуле, является для этой гармоники токов электровозов ветвью нулевого сопротивления (если пренебречь активным сопротивлением конденсаторов и реактора). В результате третья гармоника тяговой нагрузки от электровозов через тяговую сеть замыкается на УППК и практически не выходит в питающую сеть.

Следовательно, эффективным средством повышения качества напряжения в тяговой сети электрических железных дорог переменного тока и уменьшения несимметрии является применение устройств ёмкостной компенсации и специальных схем циклического изменения присоединения трансформаторов тяговых подстанций к высоковольтной линии для уменьшения несимметрии.

Определим ток прямой последовательности и ток обратной последовательности тяговой нагрузки после включения установки

поперечной ёмкостной компенсации и коэффициент несимметрии токов при включении на отстающую фазу установки поперечной ёмкостной компенсации с установленной мощностью $Q_{\text{СУСТ}} = 5,8 \text{ МВАР}$. Напряжение на установке поперечной ёмкостной компенсации равно 28 кВ. Ток прямой последовательности и ток обратной последовательности тяговой нагрузки соответственно равны (4 и 5):

$$\underline{I}_{a1} = 375 e^{-j37} \text{ А} \quad \underline{I}_{a2} = 190,9 e^{j263} \text{ А}$$

1 Определим сопротивление конденсаторов установки поперечной ёмкостной компенсации:

$$X_C = \left(\frac{9 \cdot U_{\text{MAX}}}{8} \right)^2 \cdot \frac{1}{Q_C \text{ вст}} \quad (14)$$

$$X_C = \left(\frac{9}{8} \cdot 29 \right)^2 \cdot \frac{1}{5,8} = 183,5 \text{ Ом}$$

2 Определим ток УППК по формуле (10):

$$\underline{I}_{\text{кв}} = \frac{9}{8} \cdot \frac{U_{\text{кв}}}{-jX_C}$$

$$\underline{I}_{\text{кв}} = \frac{9}{8} \cdot \frac{28000}{183,5} = j167,8 \text{ А}$$

3 Определим токи по фазам обмоток трансформатора от УППК по формулам (1), (2), (3):

$$\underline{I}_{\text{кв}(A)} = \frac{2}{3} j167,8 = j112 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{\text{кв}(B)} = -\frac{1}{3} j167,8 = -j56 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{\text{кв}(C)} = -\frac{1}{3} j167,8 = -j56 \text{ А}$$

4 Определим токи прямой и обратной последовательностей, генерируемые УППК, по формулам (4) и (5):

$$\underline{I}_{кya1} = \frac{1}{3} (j112,4 \text{ A} - a \frac{1}{3} j56 - a^2 \frac{1}{3} j56) = j56 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{кya2} = \frac{1}{3} (j112,4 \text{ A} - a^2 \frac{1}{3} j56 - a \frac{1}{3} j56) = j56 \text{ A}$$

5 Определим токи прямой и обратной последовательностей при наличии УППК учётom рассчитанных величин:

$$\underline{I}_{a1\Sigma} = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{кya1} = 375 e^{-j37} + j56 = 299,5 - j169,68 = 344,2 e^{j29,5} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{a2\Sigma} = \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{кya2} = 190,9 e^{j263} + j56 = -23,3 - j133,5 = 135,5 e^{j260} \text{ A}$$

6 Определим коэффициент несимметрии токов без включения УППК и при включении УППК:

$$\varepsilon_I = \frac{I_{a2}}{I_{a1}} = \frac{190,9}{375} = 0,5$$

$$\varepsilon_{I(\text{УППК})} = \frac{I_{a2\Sigma}}{I_{a1\Sigma}} = \frac{135,5}{344,2} = 0,39$$

Таким образом, из расчёта видно, что за счёт включения УППК произошли следующие изменения:

- ток обратной последовательности уменьшился с 190,9 до 135,5А;
- коэффициент несимметрии токов уменьшился с 0,5 до 0,39;
- ток прямой последовательности уменьшился с 375А до 344,2А.

Следовательно, установки поперечной ёмкостной компенсации являются средством симметрирования тяговых нагрузок и компенсации реактивной мощности.

Выводы

Режим напряжения тяговой сети электрических железных дорог переменного тока зависит от качества электрической энергии.

Для трёхфазных цепей нормальный режим работы предполагает симметрию напряжения.

Для уменьшения несимметрии в системе электроснабжения 2×25 кВ рекомендуется применять специальные схемы циклического изменения присоединения трансформаторов тяговых подстанций к высоковольтной линии.

Эффективным средством повышения качества напряжения в тяговой сети электрических железных дорог переменного тока является применение продольной и поперечной ёмкостной компенсации. При применении продольной ёмкостной компенсации уменьшается реактивное сопротивление сети за счёт компенсации индуктивного сопротивления линии, трансформатора, контактной сети ёмкостным сопротивлением конденсаторов.

Список использованных источников

1 **Мамошин, А. Н.** Зимакова. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М. : Альянс, 2018.

2 **Герман, Л. А.** Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока: Учебник / – М. : МИИТ, 2009.

3 **Тамазов, А. И.** Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. – М. : Транспорт, 1987.

4 **Марков, А. С.** Монтаж устройств электроснабжения электрических железных дорог. – М. : Транспорт, 1990.

References

1 **Mamoshin, A. N.** Zimakova. E`lektrosnabzhenie e`lektrifitsirovanny`x zhelezny`x dorog. [Mamoshin, A. N. Zimakova. Electricity supply for electrified railways.] – Moscow : Alliance, 2018.].

2 **German, L. A.** Prodol`naya emkostnaya kompensaciya v sisteme tyagovogo e`lektrosnabzheniya peremennogo toka : Uchebnik [Longitudinal capacitive compensation in the AC traction power supply system: Textbook]. – Moscow : MIIT, 2009.

3 **Tamazov, A. I.** Nesimmetriya tokov i napryazhenij, vy`zy`vaemaya odnofazny`mi tyagovy`mi nagruzkami [Unbalance of currents and voltages caused by single-phase traction loads.] – Moscow : Transport, 1987.

4 **Markov, A. S.** Montazh ustrojstv e`lektrosnabzheniya e`lektricheskix zhelezny`x dorog. [Installation of power supply devices for electric railways.] – Moscow : Transport, 1990.

Қ. Ж. Қалиева¹, З. Қ. Жабағина², Г. Т. Асқанбай³

2×25 кВ электр жолдарын электрмен жабдықтау жүйесіндегі токтар мен кернеулерді симметриялау ерекшеліктері

^{1,2,3}М. Тынышпаев атындағы
Қазақ көлік және коммуникациялар академиясы,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
Материал 30.09.20 баспаға түсті.

K. Zh. Kaliyeva¹, Z. K. Jabagina², G. T. Askanbai³

Features of current and voltage symmetry in electric road power supply system 2 × 25 kV

^{1,2,3}Kazakh Academy of Transport and Communication
named after M. Tynyspayev,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Material received on 30.09.20.

Бұл жұмыста тарту қосалқы станциясының ииналарында тікелей және кері реттіліктегі ток пен кернеуді симметриялау арқылы бойлық және көлденең сыйымдылық қарымталауды қолдана отырып, тарту желісіндегі кернеуді реттеудің бір әдісі келтірілген.

Тартымдық желідегі симметриялы емес режим электр энергиясының көздерінің де, тұтынушыларының да симметриялы еместігі туындауы мүмкін. Симметриялық режимде симметриялы емес жүктеменің фазалар бойынша біркелкі таралуы болуы керек, оған арнайы теңгерім шараларын қолдану арқылы қол жеткізіледі.

Демек, тарту желілерінде көлденең сыйымдылықты қарымталауды орнату реактивті қуатты өтеу және тарту жүктемесін теңестіру сияқты мәселелерді шешеді.

Электрлендірілген теміржолдардың тарту қосалқы станцияларында реактивтік қуатты тікелей дәйектілік пен теңдестіруді өтеу қажет, содан кейін бұл тарту желілерінде трансформатордың артта қалу фазасына қосылған бірфазалы көлденең сыйымдылықты қарысталаушылары қолданылады.

Ұсынылған әдіс желінің, трансформатордың, байланыс желісінің индуктивті кедергісін конденсаторлардың сыйымдылық кедергісімен өтеу арқылы желінің реактивтілігін төмендетуге мүмкіндік береді және сәйкесінше тарту желісіндегі электр энергиясының сапасын жақсартады.

Бұл мақалада колденең сыйымдылықты қарымталауды артта қалу фазасына қосу кезінде колденең сыйымдылықты қарымталау мен токтардың теңгерімсіздік коэффициентін орнатқаннан кейін тартылыс жүктемесінің оң реттілігі мен теріс реттілігінің токтары есептелінді. Алынған есептік мәліметтерден колденең сыйымдылықты қарымталау қондырғысының қосылуына байланысты теріс реттілік тогы, ағымдағы теңгерімсіздік коэффициенті, оң тізбектілік тогының азаятындығын көруге болады.

Кілтті сөздер: электрмен жабдықтау жүйесі, тарту подстанциясы, колденең сыйымдылықты өтеу.

In this paper, one of the methods of voltage regulation on a traction network using the use of longitudinal and transverse capacitive compensation by balancing currents and voltages in the direct and negative sequence on the traction substation buses is presented.

The asymmetric mode in the traction network can be caused in the asymmetry of both sources and consumers of electrical energy. In the symmetrical mode, there must be a uniform distribution of the asymmetric load over the phases, which is achieved by using special balancing measures.

Therefore, the installation of transverse capacitive compensation in traction networks solves such problems as compensation of reactive power and balancing the traction load.

At traction substations of electrified railways, compensation of reactive power of positive sequence and balancing is necessary, then in these traction networks single-phase installations of transverse capacitive compensation are used, connected to the lagging phase of the transformer.

The proposed method allows you to reduce the reactance of the network by compensating the inductive resistance of the line, transformer, contact network with the capacitive resistance of the capacitors and, accordingly, improves the quality of electricity in the traction network.

In this article, the currents of positive sequence and negative sequence of traction load are calculated after turning on the installation of transverse capacitive compensation and the coefficient of unbalance of currents when turning on the lagging phase of the installation of transverse capacitive compensation with the installed power. From the calculated data obtained, it can be seen that due to the inclusion of the installation of transverse capacitive compensation, the negative sequence current, the current unbalance coefficient, the positive sequence current decreases.

Keywords: power supply system, traction substation, transverse capacitive compensation.

Теруге 30.09.2020 ж. жіберілді. Басуға 14.10.2020 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
2,99 Мб RAM
Шартты баспа табағы 23,30. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Тапсырыс № 3707

Сдано в набор 30.09.2020 г. Подписано в печать 14.10.2020 г.
Электронное издание
2,99 Мб RAM
Усл. печ. л. 23,30. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Заказ № 3707

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
8 (7182) 67-36-69
e-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik.tou.edu.kz