

В. Г. ЯГУП (ХНУГХ), Е. В. ЯГУП (УКРГАЖТ)

Кафедра электроснабжения городов, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, ул. Революции, 12, Харьков, Украина, 61002, эл. почта: Yagup_Walery@mail.ru

Кафедра автоматизации систем электрического транспорта, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, эл. почта: Kate.Yag@rambler.ru

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Постановка проблемы

Электрификация железных дорог является естественным процессом, связанным с повышением показателей качества обслуживания пассажирских и грузовых перевозок. При этом обеспечиваются высокие показатели в отношении скорости, пропускной способности, экологии и комфорта пассажиров. Статистика показывает, что большая часть электрифицированных железных дорог работает с системами электроснабжения на переменном токе промышленной частоты 50 Гц при напряжении 25 кВ [1]. Являясь мощными потребителями электроэнергии, тяговые системы железнодорожного транспорта оказывают существенное влияние на питающую сеть. Это влияние оказывается негативным, так как снижает такие показатели, как коэффициенты симметрии и мощности. Основной схемой питания тяговой нагрузки на железной дороге является схема питания от трехфазной сети через трансформатор. Первичная обмотка трансформатора соединяется в звезду, а вторичная – в треугольник. Питание тягового электропривода осуществляется от одной из сторон вторичного треугольника по схеме однофазной нагрузки [2]. Таким образом, системы электроснабжения переменного тока характеризуются существенной несимметрией нагрузки. Это в свою очередь приводит к появлению в системе реактивной мощности.

Анализ последних публикаций и выделение нерешённых проблем

Частичное ослабление влияния несимметрии пытаются достичь использованием схемы так называемого «винта» [2]. В этом случае для нескольких подстанций переменного тока изменяются точки подключения и фазировка тяговой нагрузки. Но эти мероприятия в полной мере не позволяют решить проблему несимметрии тяговой нагрузки и появления реактивной мощности. Всё это приводит к увеличению потерь и снижению коэффициента полезного действия.

В последние годы резко возрос интерес к вопросам симметрирования и компенсации реак-

тивной мощности в сетях электроснабжения железных дорог [3,4], однако в указанных работах отсутствует детальный анализ режимов оборудования, в том числе трансформаторного, а также точное определение параметров симметрирующих и компенсирующих элементов. Поэтому представляется актуальным поиск методов снижения несимметрии и компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения железнодорожной тяговой однофазной.

Целью исследования является поиск возможных условий, при которых обеспечивается полная компенсация реактивной мощности в системе электроснабжения на переменном токе тяговой железнодорожной нагрузки. Для этого необходимо проанализировать режимы и электромагнитные процессы в системе питания тяговой нагрузки переменного тока, найти параметры симметрирующего устройства (СКУ) на реактивных элементах, при которых минимизируются реактивная мощность и несимметрия в системе; а также убедиться в том, что оптимизированный режим действительно имеет более высокие показатели по условиям работы оборудования системы электроснабжения.

Изложение основного материала статьи

Рассматривается система электроснабжения железнодорожной тяги на переменном токе с однофазной нагрузкой в виде одного состава на линии. Это соответствует случаю наиболее резко выраженной несимметрии в системе электроснабжения. Расчетная схема изображена на рис.1.

Здесь источники синусоидального напряжения имитируют питающую сеть неограниченной мощности, каковой можно считать в целом энергосистему, от которой питается тяговая подстанция. Элементы L_0 и r_0 отображают сопротивления линий электропередачи к тяговому трансформатору. Первичные обмотки этого трансформатора соединены в звезду, а вторичные – в треугольник (по схеме 11 группы соединения). Выводы вторичной обмотки a , b , c используются для питания тяговых нагрузок.

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014

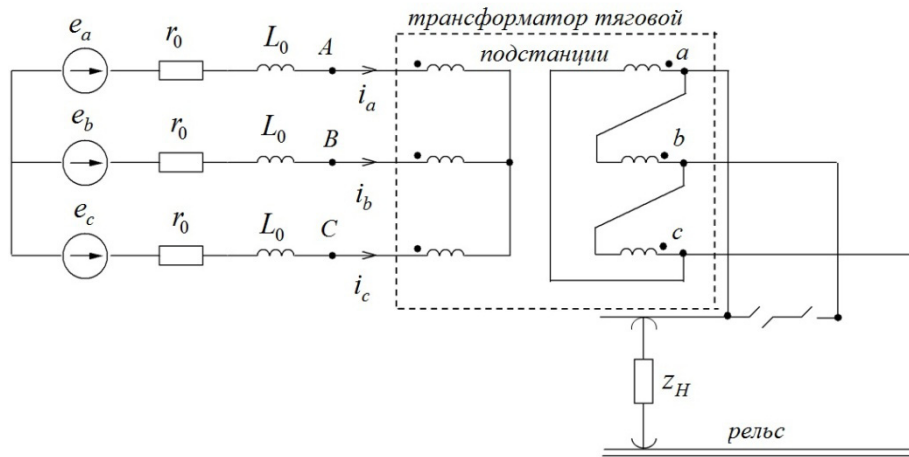


Рис. 1. Схема питания переменным током железнодорожной тяговой нагрузки

Фаза C заведена на рельс, а фаза A – на контактный провод.

Сопротивление Z_H отображает тяговую нагрузку, для которой будем полагать общепринятое значение $\cos \varphi=0,8$.

Будем рассматривать реальный случай питания тяговой нагрузки от тягового трансформатора типа ТДНЖ – 25000/110, параметры которого (паспортные данные) следующие:

Номинальная мощность 25 мВА, напряжение первичной стороны 110 кВ, напряжение вторичной стороны 27,5 кВ. Частота питающего напряжения 50 Гц. Напряжение короткого замыкания составляет 10,5%, потери короткого замыкания 120 кВт. Ток холостого хода составляет 0,7%, потери холостого хода 30 кВт.

Расчет параметров эквивалентной схемы замещения для визуальной модели привел к следующим результатам:

Активное сопротивление первичной обмотки 1,1616 Ом.

Индуктивность рассеивания первичной обмотки 0,080798 Гн.

Активное сопротивление вторичной обмотки 0,0726 Ом.

Индуктивность рассеивания вторичной обмотки 0,00505 Гн.

Индуктивность намагничивания 223,316 Гн.

Сопротивление, отражающее потери на перемагничивание, включаемое параллельно индуктивности намагничивания 403078,81 Ом.

Эти параметры используются в дальнейшем в свойствах визуальной модели трехфазного трансформатора, питающего тяговую нагрузку. Для определенности будем рассматривать токовую нагрузку порядка 180 А, соответствующую средней степени нагрузки, обеспечивающей движение одного состава. При необходимости может быть рассчитан любой иной вариант тяговой нагрузки.

Моделирование процессов осуществляем на визуальной Simulink-модели (рис. 2).

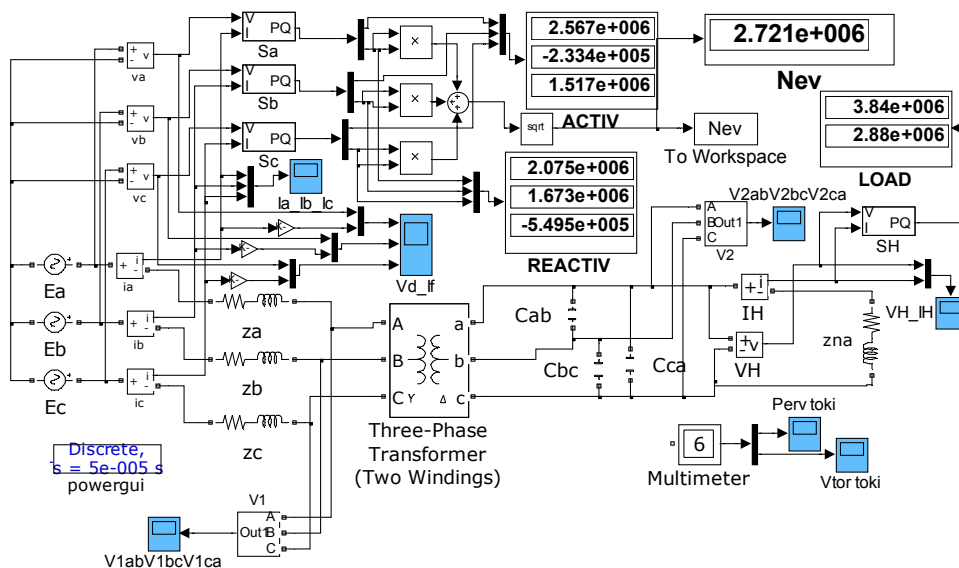


Рис. 2. Модель системы электроснабжения переменным током

Параметры линии электропередачи и нагрузки следующие: $r_0=1$ Ом; $L_0=0,01$ Гн; $R_n=(121+90,75j)$ Ом.

При работе модели используется метод дискретных моделей элементов, обеспечивающий преодоление явления жесткости системы дифференциальных уравнений. Шаг интегрирования принят равным 0,00005 с.

При моделировании на виртуальные осциллографы выводятся токи в линиях электропередачи (они же являются токами в источниках электроэнергии и первичных обмотках трансформатора), напряжения на зажимах трансформатора, а также токи и напряжения нагрузки. С помощью виртуальных измерительных приборов фиксируются активные и реактивные мощности, отдаваемые каждым источником электроэнергии с передачей этих значений на цифровые измерители.

Результаты моделирования установившегося процесса при несимметричной нагрузке приведены на рис.3.

Диаграммы свидетельствуют о весьма неблагоприятных условиях работы электрооборудования при несимметричной нагрузке на вторичных обмотках тягового трансформатора. На

рис. 3,а приведены напряжения каждого источника совместно с током этого источника (масштаб по токам увеличен в 1000 раз для улучшения наглядности). Здесь видно, что от фазы А отбирается отстающий ток, соответствующий индуктивному характеру нагрузки на эту фазу. Виртуальный измеритель мощностей показывает, что полная мощность, отдаваемая фазой А, имеет значение $S_A=2.567E6+j2.075E6$. Для фазы В значение полной мощности $S_B=-2.334E5+j1.673E6$, и диаграммы напряжения и тока (рис.3,а средняя) свидетельствуют о том, что источник фазы В работает в режиме потребления мощности. В фазе С (рис.3,а нижняя диаграмма) ток несколько опережает напряжение, что говорит о емкостном характере отдаваемой мощности, и значение полной мощности $S_C=1.517E6-j5.495E5$. Из значений реактивных мощностей сконструирован среднеквадратичный функционал, значение которого для несимметричного режима составляет величину $N_{ev}=2.721E6$ ВАр. В дальнейшем этот функционал будет приниматься в качестве целевой функции при проведении поисковой оптимизации.

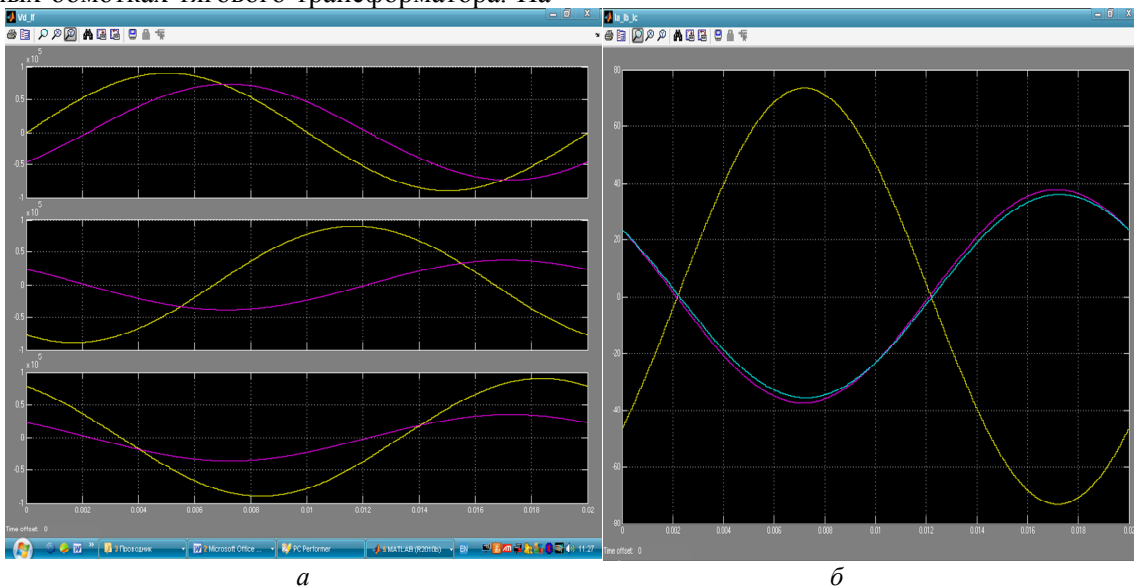


Рис. 3. Диаграммы для несимметричного режима:

а) токи и напряжения источников; б) токи в линиях электропередачи

На диаграмме рис.3,б изображены токи в линиях электропередачи (они же токи в первичных обмотках трансформатора). Амплитуда тока фазы А составляет величину 73,492 А, а токи в фазах В и С почти совпадают – их амплитуды равны соответственно 35,89 А и 37,614 А. Т В такой же пропорции отличаются и токи вторичных обмоток трансформатора – 167,94 А, 83,97 А. и 83,97 А. Это показывает, что обмотки стержня фазы А перегружены, а

остальные недогружены, и трансформатор работает с большим перекосом токов обмоток. Это в свою очередь обуславливает и несимметрию напряжений между выводами трансформатора: первичная сторона трансформатора – амплитуды наложений равны 15520, 15556 и 15540 В, вторичная сторона трансформатора – амплитуды напряжений равны 38305, 39057 и 38102 В. Полная мощность на тяговой нагрузке составляет величину $S_H=3.84E6+j2.88E6$. Мож-

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014

но сделать вывод, что каждый элемент электрооборудования системы электроснабжения работает при резкой несимметрии в весьма нерациональном режиме.

Поиск параметров компенсатора реактивной мощности осуществляется с помощью поисковой оптимизации на основе алгоритма метода деформируемого многогранника [5], реализуемого в системе MATLAB совместно с Simulink-моделью [6]. Методика организации такого поиска обоснована и разработана авторами применительно к обобщенной трёхфазной системе электроснабжения в [7].

В исследуемом случае параметрами оптимизации принимаются величины параметров элементов, подключаемых для симметрирования режима и компенсации реактивной мощности в рассматриваемой системе электроснабжения. В качестве СКУ выбрана схема из трёх реактивных элементов, включаемых по схеме треугольника к выводам вторичной обмотки тягового трансформатора. Поскольку заранее неизвестно, какой именно элемент должен быть подключен в схеме СКУ, включаем в каждую сторону треугольника СКУ конденсаторы. Это реализуется установкой соответствующего варианта с помощью раскрывающегося списка в окне свойств каждого элемента. Такой выбор вполне обоснован, поскольку нагрузка имеет индуктивный характер, и, как показал опыт исследования подобной схемы в [7], три конденсатора в СКУ способны симметрировать линейные токи и полностью компенсировать ре-

активную мощность в системе электроснабжения переменного тока. Однако, в данном случае решение не привело к ожидаемому эффекту. В действительности в процессе проведения поисковой оптимизации целевая функция после некоторого количества циклов перестала уменьшаться, и величина емкости конденсатора C_{bc} стала уменьшаться и стремиться достичь бесконечно малой величины. Это послужило сигналом для изменения в СКУ соответствующего конденсатора на дуальный элемент – индуктивность. После этого целевая функция свелась к величине, близкой к нулю. Это означает, что в системе реактивная мощность полностью скомпенсирована, и при этом линейные токи образовали совершенно симметричную систему.

На рис.4 приведена модель системы электроснабжения после окончания процесса поисковой оптимизации. Этот режим достигнут при следующих параметрах СКУ: $C_{ab}=1.0031113E-05$ Ф; $L_{bc}=1.0767185$ Гн; $C_{ca}=1.2937435E-05$ Ф.

При этом значение целевой функции чрезвычайно мало - $N_{ev}=4.226E-6$. Приборы показывают отсутствие в системе реактивной мощности, и каждый из источников отдает лишь активную мощность $1.332E6$ Вт. Полная мощность в нагрузке определяется значением $S_H=3.996E6+j2.996E6$, что означает увеличение активной мощности на тяговой нагрузке по сравнению с несимметричным режимом при отсутствии СКУ.

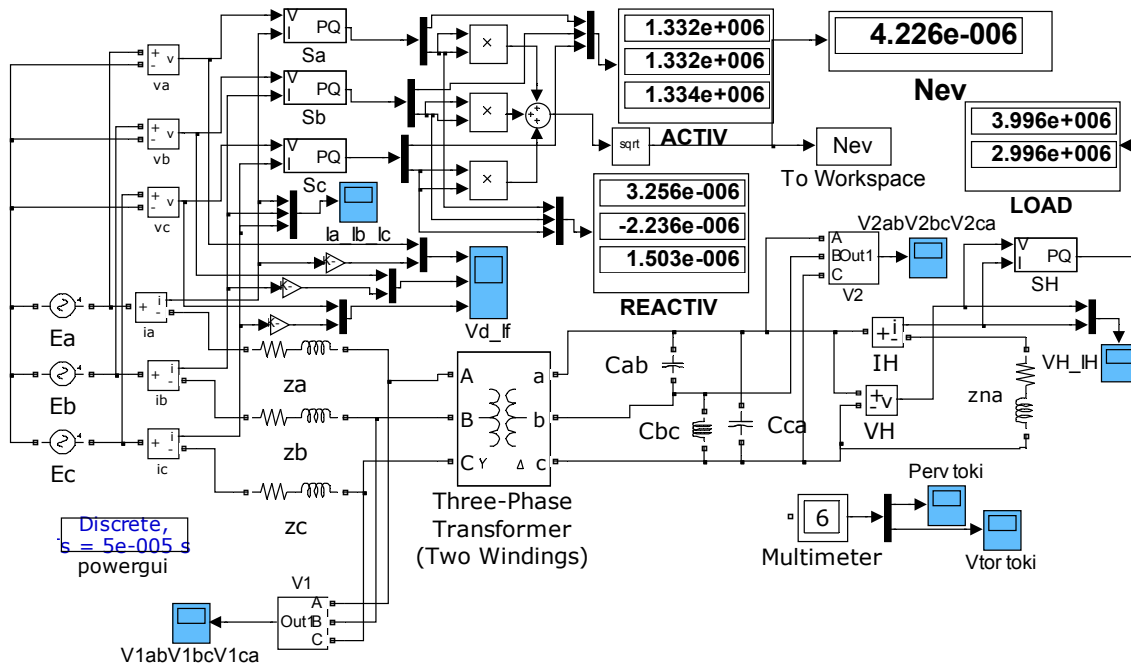


Рис. 4. Модель системы после нахождения параметров СКУ

На рис. 5 приведены диаграммы токов и напряжений, упомянутых и идентичных рис.3, но соответствующих симметричному режиму с компенсацией реактивной мощности. Из рис. 5,а видно, что токи в источниках питания совершенно совпадают по фазе с их задающими напряжениями. Из рис. 5,б видно, что и линия, и трансформатор нагружаются токами совершенно равномерно. Линейные напряжения на

первичной и вторичной стороне уравнились и имеют амплитуды соответственно 155510 и 38865 В. Аналогично уравнились и токи трансформатора и линии электроснабжения, амплитуды которых равны соответственно 29,68 и 68,63 А. Эти значения намного меньше соответствующих для несимметричного исходного режима.

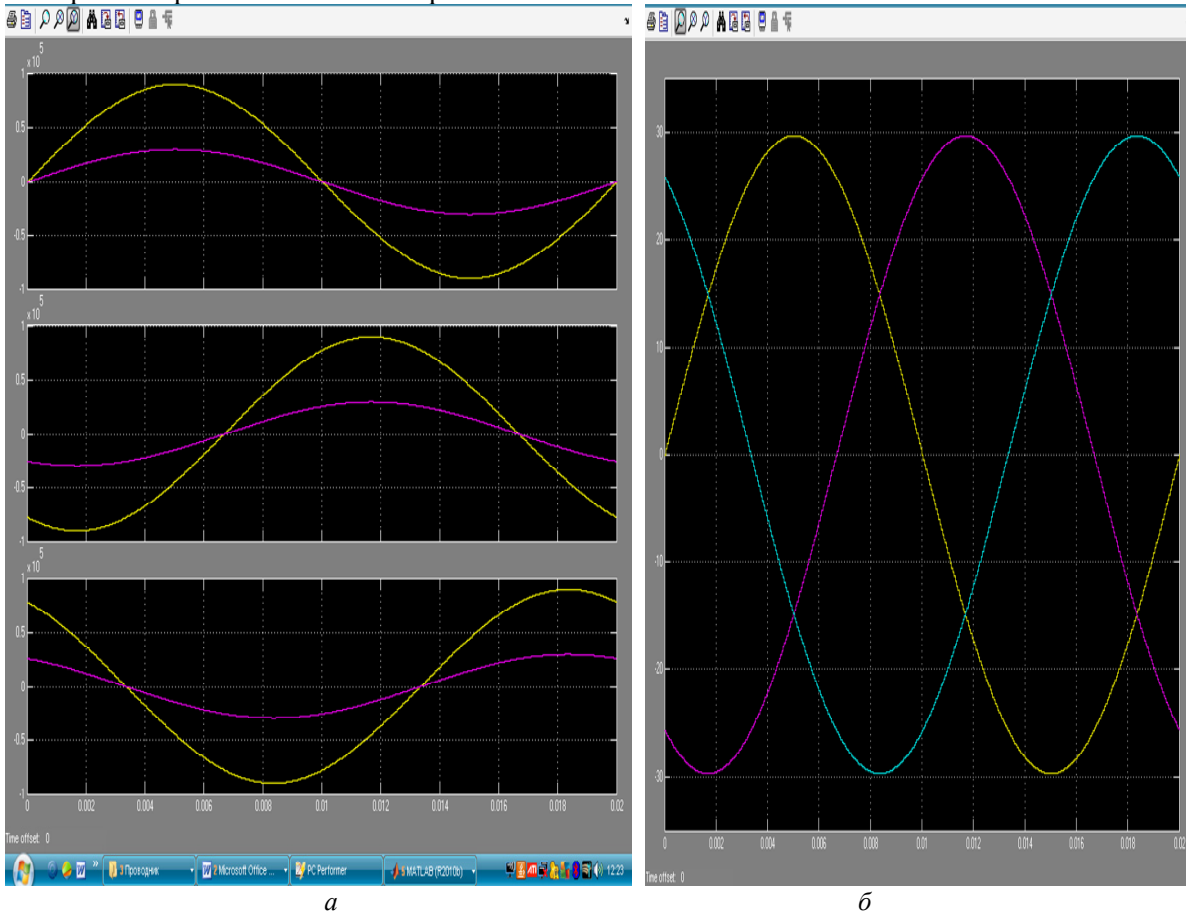


Рис. 5. Диаграммы для симметричного режима с полной компенсацией реактивной мощности:
а) токи и напряжения источников; б) токи в линиях электропередачи;

Уменьшения токов линии электропередачи по фазам *A, B, C* означает уменьшение потерь в линиях электропередачи, которое соответствует квадратичной зависимости от токов. Это обеспечивает экономию электроэнергии, а кроме того тяговый трансформатор при этом работает в совершенно симметричном режиме. Это доказывает возможность энергосбережения на железной дороге путем оптимизации режимов тяговых подстанций переменного тока с помощью относительно простого дополнительного электрооборудования СКУ.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Возникающий в традиционной системе электроснабжения железных дорог на перемен-

ном токе несимметричный режим характеризуется значительными уровнями реактивной мощности в системе и несимметрией как токов, так и напряжений. Использование разработанной визуальной модели и предложенного метода поисковой оптимизации позволяет определить параметры симметро-компенсирующего устройства для реального случая. В процессе поисковой оптимизации представляется возможным выяснить тип каждого реактивного элемента, который должен включаться в состав симметро-компенсирующего устройства для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Подключение симметро-компенсирующего устройства с найденными в процессе исследования параметрами обеспечивает полное симметрирование систе-

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014

мы и компенсацию реактивной мощности в ней. Это существенно улучшает условия работы основного оборудования тяговой подстанции переменного тока и повышает коэффициент полезного действия системы в целом. Перспективой дальнейшего исследования может

быть расчет параметров СКУ для ряда значений тяговой нагрузки, в том числе и рассмотрение вариантов нагрузки системы электроснабжения от нескольких потребителей, подключаемых на обе рабочие фазы вторичных обмоток силового трансформатора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хворост Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития/ Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехніка і електромеханіка. – 2003. - №4. – С.104-113.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Закарукин, В. П., Крюков, А. В., Иванова, Е. С. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока. – Электрифікація транспорту, - №6. – 2013. – С. 26-33.
4. Бардушко, В. Д. Параметрический синтез систем параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях. – Электрифікація транспорту, - №6. – 2013. – С. 8-13.
5. Nelder, J.A., Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization [Текст]. – Computer J. – 1965. – №7. – р.308 – 313.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст]. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2002. – 768 с.
7. Ягуп, В. Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – вип. 11(186). – С.449-454.

REFERENCES

1. Khvorost N.V. Electric railways: stages and evolution perspectives / N.V. Khvorost, N. V. Panasenko // Electrical engineering and electromechanics. – 2003. - №4. – P. 104-113.
2. Markvardt, K. G. (1982). Electricity electrified railways. Moscow, Transport Publ, 528.
3. Zakarukin, V. P., Kryukov, A. V., Ivanova, E. S. Analysis of balancing schemes for railway AC traction substations. – Transport electrification. 2013. №6. – P. 26-33.
4. Bardushko, V. D. Parametric synthesis of the system of parallel capacitive compensating devices in traction network in modern conditions. Transport electrification. 2013. №6.– P. 8-13.
5. Nelder, J. A., Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization // – Computer J. – 1965. – №7. – p.308 – 313.
6. Diakonov, V. P. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Usage basics. Full user’s handbook. – Moscow. SOLON-Press. 2002. – 768 p.
7. Yagup, V.G., Yagup, K.V. The calculation of mode of reactive power compensation in asymmetrical power supply system with searching optimization method. – Scientific works of the Donetsk national technical university. Series “Electrical and power engineering”. – Donetsk. 2011; v.11(186).. 449-454.

Поступила в печать 26.06.2014.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Рассматривается тяговая подстанция с соединением обмоток трансформатора по общепринятой схеме звезда-треугольник. Анализируется реальный вариант питания системы тягового электроснабжения от тягового трансформатора типа ТДНЖ 25000/110. Питание тяговой нагрузки осуществляется от одной из сторон треугольника на вторичной стороне трансформатора, что создает несимметрию в системе электроснабжения. В свою очередь несимметрия токов и напряжений уменьшает коэффициент мощности для источников питания в каждой фазе и увеличивает потери в линии электропередачи. Проведенное с помощью разработанной визуальной модели исследование электромагнитных процессов подтвердило наличие существенной несимметрии в системе. С помощью визуальной модели и поисковой оптимизации на основе метода Нелдера-Мида найдены параметры симметрирующего устройства, состоящего из реактивных элементов. При этом выравниваются токи в линии и обмотках трансформатора и полностью компенсируется реактивная мощность в системе электроснабжения. Благодаря совершенному симметрированию и полной компенсации реактивной мощности потери в системе становятся минимальными.

Ключевые слова: симметрирование, реактивная мощность, визуальное моделирование, поисковая оптимизация.

УДК 621.311

В. Г. ЯГУП (ХНУМГ), К. В. ЯГУП (УКРДАЗТ)

Кафедра електропостачання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Революції, 12, Харків, Україна, 61002, ел. пошта: Yagup_Walery@mail.ru

Кафедра автоматизації систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, ел. пошта: Kate.Yag@rambler.ru

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ТЯГОВІЙ СИСТЕМІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглядається тягова підстанція зі з'єднанням обмоток за загально прийнятою схемою зірка-трикутник. Аналізується реальний варіант живлення системи тягового електропостачання від тягового трансформатора типу ТДНЖ 25000/110. живлення тягового навантаження здійснюється від однієї із сторін трикутника на вторинній стороні трансформатора, що створює несиметрію в системі електропостачання. В свою чергу несиметрія струмів і напруг зменшує коефіцієнт потужності для джерел живлення в кожній фазі та збільшує втрати в лінії електропередавання. Проведене за допомогою розробленої візуальної моделі дослідження електромагнітних процесів підтвердило наявність суттєвої несиметрії в системі. За допомогою візуальної моделі та пошукової оптимізації на основі метода Нелдера-Міда знайдені параметри симетруючого пристрою, що він складається з реактивних елементів. При цьому вирівнюються струми в лінії та обмотках трансформатора та повністю компенсується реактивна потужність в системі електропостачання. Завдяки довершеному симетруванню і цілковитій компенсації реактивної потужності втрати в системі стають мінімальними.

Ключові слова: симетрування, реактивна потужність, візуальне моделювання, пошукова оптимізація.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.311

V. G. YAGUP (KNUME), E. V. YAGUP (USART)

Department of Municipal Power Supply, Kharkiv National University of Municipal Economy, Revolution str., 12, Kharkov, Ukraine, 61002, e-mail: Yagup_Walery@mail.ru

Department of Electrical Transport System Automation, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Feysbakh sq. 7, Kharkov, Ukraine, 61050, e-mail: Kate.Yag@rambler.ru

REACTIVE POWER COMPENSATION IN ALTERNATIVE CURRENT TRACTION SYSTEM

The alternative current traction substation is considered when primary transformer's windings are connected in a star and secondary windings connected in delta. Real case, when system is supplied from traction transformer of type TDNG 25000/110 is considered. A traction load is supplied from one side of delta connection. This creates asymmetrical mode in power supply, decreases power factor and increases copper losses in the system. Simulation of electromagnetic processes on visual model shows a considerable asymmetry in voltages and currents of transformer. Searching optimization based on Nelder-Mead algorithm is implemented on Simulink all at the same time with visual model of traction substation on SimPowerSystem. As searching optimization result are found parameters of simmetrizing device, which provides balanced voltages and currents on transformer's windings. Reactive power in system is completely compensated and copper losses in supply system are minimized.

Keywords: symmetrization, reactive power, visual simulation, searching optimization.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*