

УДК 621.314

СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УЗЛЕ НАГРУЗКИ*

**Ю.П. Кубарьков¹, А.И. Чивенков², Н.Н. Вихорев², А.В. Шалухо²,
И.А. Липуэжин²**

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Аннотация. Статья посвящена устройствам и способам автоматизированного регулирования потоков мощности в интеллектуальных электрических сетях. Приведено описание способа векторного регулирования тока линий электропередачи, электрически объединенных в общем узле нагрузки, посредством введения добавочной э.д.с. и применения сетевого дросселя с известными электрическими параметрами. Приведена векторная диаграмма напряжений и токов энергосистемы, поясняющая принципы формирования параметров тока сетевого дросселя, установленного в регулируемой линии электропередачи. Описан виртуальный инструмент, выполненный в среде графического программирования LabVIEW на базе платформы ContrastRIO, используемый как элемент системы управления преобразователем напряжения, реализующим управление электрическими потенциалами на сетевом дросселе. Описано влияние начального фазового сдвига между напряжениями соединяемых узлов линий электропередачи. Приведены результаты анализа системы векторов напряжений в регулируемой энергосистеме при измерении начального фазового сдвига между напряжениями линий электропередачи и формировании заданного характера тока сетевого дросселя; показано изменение величины, генерируемой/потребляемой инвертором напряжения активной мощности.

Ключевые слова: векторное регулирование тока, инвертор напряжения, интеллектуальная система, микросеть, сетевой дроссель, система управления, LabVIEW.

Развитие в России направления интеллектуальных электрических сетей, в том числе расширение распределенной энергетики, предполагает разработку активно-адаптивных устройств, обеспечивающих автоматическое регулирование

* Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).

Кубарьков Юрий Петрович (д.т.н., доцент), проф. кафедры «Электрические станции».

Чивенков Александр Иванович (д.т.н., доцент), проф. кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Вихорев Николай Николаевич, ст. преп. кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Шалухо Андрей Владимирович (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Липуэжин Иван Алексеевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электроэнергетика, электро-снабжение и силовая электроника».

параметров электрической сети и эффективную интеграцию в энергетическую систему возобновляемых источников малой и средней мощности [1–3]. Реализация данных функций во многом связана с разработкой технических решений в области регулирования потоков электрической мощности. Причем особое внимание должно быть уделено электрическим сетям среднего и низкого напряжения, поскольку в них отсутствуют устройства, способные эффективно выполнять перечисленные функции.

Авторами предложен способ векторного регулирования тока линий электропередачи [4–8] за счет установки регулятора в общем узле нагрузки (рис. 1), с помощью которого возможно регулировать потоки мощности между источниками генерации и потребителями электроэнергии.

На рис. 1 приведена структурная схема участка электрической сети с двумя линиями электропередачи Л1 и Л2. К линии электропередачи 1 может быть подключен автономный источник энергии или локальная сеть (*MicroGrid*, *NanoGrid*). Линия электропередачи 2 может быть подключена к централизованной электрической сети или к другой локальной сети.

Линии соединены в узле нагрузки с помощью регулятора, в состав которого входят: силовой трансформатор T , сетевой дроссель L , инвертор напряжения INV , система управления (CY) и узел связи с диспетчерским центром [9, 10].

Инвертор напряжения INV подключен к первичной обмотке силового трансформатора T и позволяет вводить в линию электропередачи Л1 добавочную э.д.с., изменяя тем самым разницу потенциалов (a , b) на сетевом дросселе L . Таким образом, при известных параметрах сетевого дросселя L может быть сформирован ток линии Л1 с заданной амплитудой и фазовым углом. Питание инвертора может осуществляться либо от вспомогательного источника постоянного напряжения, либо от рабочей линии с помощью выпрямителя.

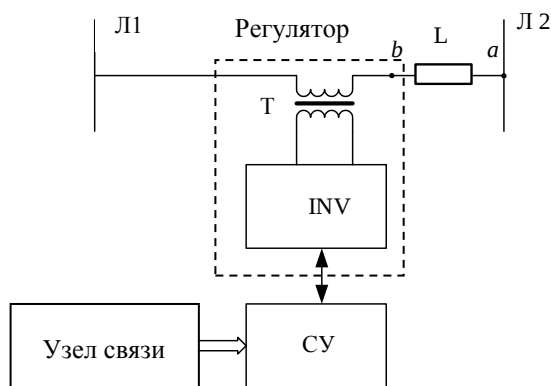


Рис. 1. Участок электрической сети с регулятором, установленным в линии электропередачи

Регулирование величины и фазового угла напряжения на сетевом дросселе позволяет изменять величину и характер (фазовый угол) тока в линии электропередачи Л1 и соотношения токов в обеих линиях Л1, Л2, в том числе «отключать» любую из линий электропередачи (ток линии равен нулю) без использования коммутационных аппаратов.

Векторная диаграмма напряжений и токов в электрической сети с регулируемой линией электропередачи, поясняющая принципы формирования заданных параметров тока сетевого дросселя, приведена на рис. 2.

Вспомогательный вектор $\vec{S}$, а также фазовые углы для него относительно вектора напряжения линии электропередачи Л1 (φ_s') и вектора напряжения линии электропередачи Л2 (φ_s) введены для упрощения расчетов и геометрических построений при формировании заданных параметров тока сетевого дросселя.

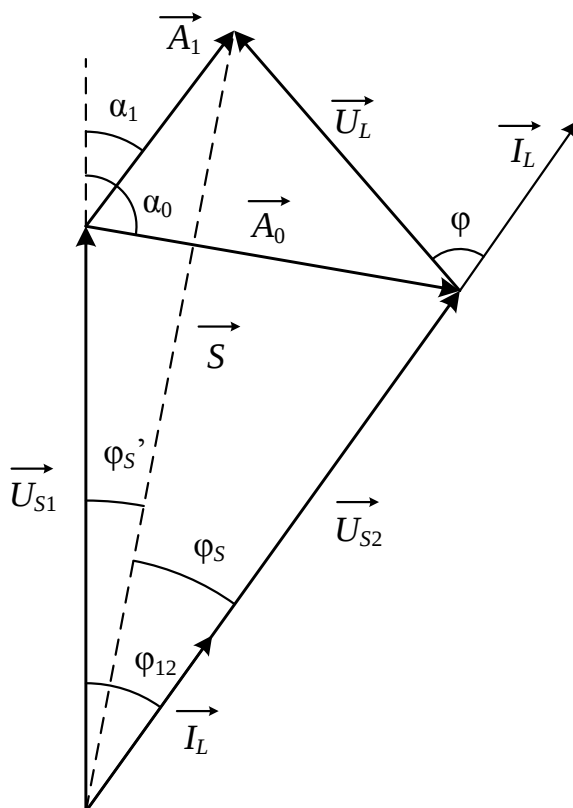


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений при регулировании параметров тока линии электропередачи:

$\vec{U}_{S1}$ – вектор напряжения линии электропередачи Л2; $\vec{U}_{S2}$ – вектор напряжения линии электропередачи Л1; $\vec{U}_L$ – вектор напряжения сетевого дросселя; $\vec{I}_L$ – вектор тока сетевого дросселя; $\vec{A}_0$ – вектор напряжения сериесного трансформатора, соответствующий нулевому току потребления от линии электропередачи Л1; $\vec{A}_1$ – вектор напряжения сериесного трансформатора, соответствующий заданному току потребления от линии электропередачи Л1 (току сетевого дросселя); α_0 – фазовый угол вектора сериесного трансформатора, соответствующий нулевому току потребления от линии электропередачи Л1; α_1 – фазовый угол вектора вольтодобавочного трансформатора, соответствующий заданному току потребления от линии электропередачи Л1 (току сетевого дросселя); φ_{12} – фазовый сдвиг между векторами напряжений линии электропередачи Л1 и Л2; φ – фазовый угол между векторами тока и напряжения сетевого дросселя.

Из приведенной на рис. 2 векторной диаграммы следует, что введение с помощью инвертора напряжения *INV* в линию электропередачи Л1 добавочной э.д.с. позволяет:

- сформировать режим нулевого значения тока между Л1 и Л2;

- сформировать режим компенсации реактивной мощности любого характера;
- произвести управляемое разделение нагрузки между Л1 и Л2;
- осуществить реверс мощности из линии электропередачи Л2 в линию Л1.

Параметры любого из описанных выше режимов могут быть определены путем измерения текущих параметров напряжений линий электропередачи, а также формирования заданных параметров вектора тока сетевого дросселя. Результат расчетов – вектор добавочной э.д.с. $\vec{A}_0$, являющийся задающим сигналом для ШИМ-генератора инвертора напряжения INV [11–14].

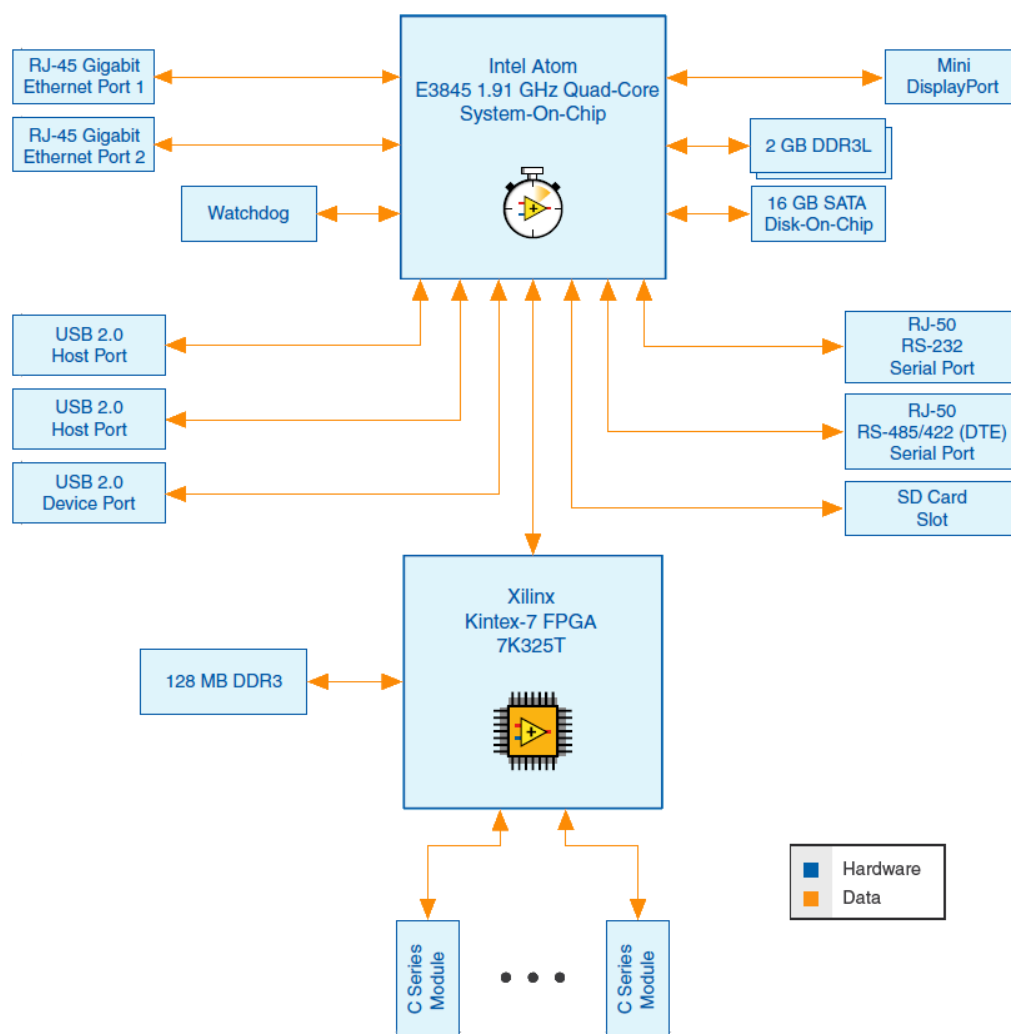


Рис. 3. Структура платформы *cRIO*

Одной из возможных реализаций системы управления преобразователя, ведомого сетью и автоматически корректирующего параметры выходного напряжения регулятора в условиях непрерывно изменяющихся параметров напряжения линии электропередачи, может выступать платформа *CompactRIO (cRIO)*. Данный аппаратный комплекс состоит из высокопроизводительной программно-

руемой логической интегральной схемы (ПЛИС), контроллера реального времени, набора протоколов удаленной связи и модулей расширения для формирования и приема логических сигналов управления, а также для цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования (рис. 3).

Система мониторинга и управления на базе платформы *cRIO* включает набор элементов, реализующих обмен измеряемыми величинами и параметрами режимов работы с удаленной системой мониторинга и управления посредством сетевого протокола *TCP/IP*, *RS 232/485*, *USB*. Встроенные твердотельные накопители позволяют вести дневник измерений и принимаемых команд, что упрощает последующий анализ.

Платформа *cRIO*, входящая в состав регулятора, выступает в роли сервера с фиксированным *IP*-адресом и зарезервированным для соединения портом и ожидает подключения к ней клиента, которым в данной схеме является удаленная система мониторинга и управления.

Программные компоненты, реализующие управление платформой *cRIO*, разрабатываются в среде графического программирования *LabVIEW* и носят название виртуальных инструментов (*virtual instruments (VI)*). Данные элементы являются аналогом подпрограмм текстовых языков программирования. Применение графических языков программирования позволяет значительно упростить разработку и наладку систем управления.

Приборные панели виртуальных инструментов, включенных в общую систему управления, позволяют локальному оператору контролировать наличие соединения с удаленным оператором, следить за качеством передаваемых данных, осуществлять ручной сброс соединения, фиксировать наличие ошибок в работе подсистемы приема/передачи.

Алгоритм векторного управления инвертором напряжения реализован в виде виртуального инструмента *VECTOR*, задачей которого является повторение построения векторной диаграммы (см. рис. 2), упрощающей восприятие работы регулятора для настройщика и оператора (рис. 4) [15, 16].

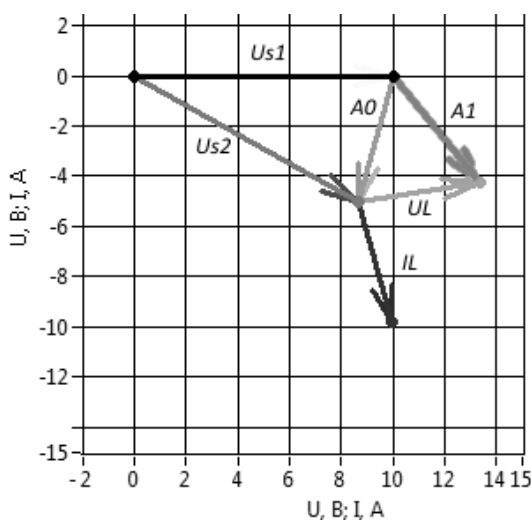


Рис. 4. Виртуальный инструмент *VECTOR*

На рис. 4 приведена векторная диаграмма при заданном угле генерируемого тока 45 электрических градусов опережающего характера относительно напря-

жения линии электропередачи 2 амплитудой 5 А. Для удобства восприятия напряжения линий приведены с амплитудными значениями 10 В.

Графический код выполнен с помощью стандартных библиотечных элементов, входящих в комплект *LabVIEW* 2015.

Входные параметры (амплитуды измеряемых или задаваемых токов и напряжения, а также их фазовые углы) преобразуются в координаты концов отрезков с помощью блоков преобразования данных полярной системы координат в прямоугольную (декартову) – *Polar to Re/Im* (библиотека *Mathematics* > *Numeric* > *Complex*).

Применение инструментов для работы с геометрическими объектами позволяет смещать или поворачивать построенные отрезки пропорционально задаваемым или измеряемым параметрам (библиотека *Mathematics* > *Geometry*).

Таким образом, виртуальные инструменты, оперируя с известными векторными величинами, формируют на координатной плоскости отрезки, соответствующие напряжению активного выпрямителя и выходного инвертора напряжения.

Полученные координаты отрезков конвертируются в параметры амплитуд и фазовых углов формируемых напряжений посредством блоков, осуществляющих обратное преобразование из прямоугольной системы координат в полярную (библиотека *Mathematics* > *Numeric* > *Complex*).

Для сокращения графического кода все величины передаются между расчетными узлами в виде локальных переменных (*Local Variable*), а блоки *Expression Node* (библиотека *Numeric*) выполняют функцию преобразования радиан в электрические градусы, что упрощает расчеты и взаимодействие оператора с панелью управления.

Все векторные величины, как задаваемые, так и рассчитываемые, выводятся на инструмент графического отображения *XYGraph* (библиотека *Modern* > *Graph*). При этом все сформированные отрезки объединяются в единый массив (*Array*) посредством блока *BuildArray* (Библиотека *Arrays*).

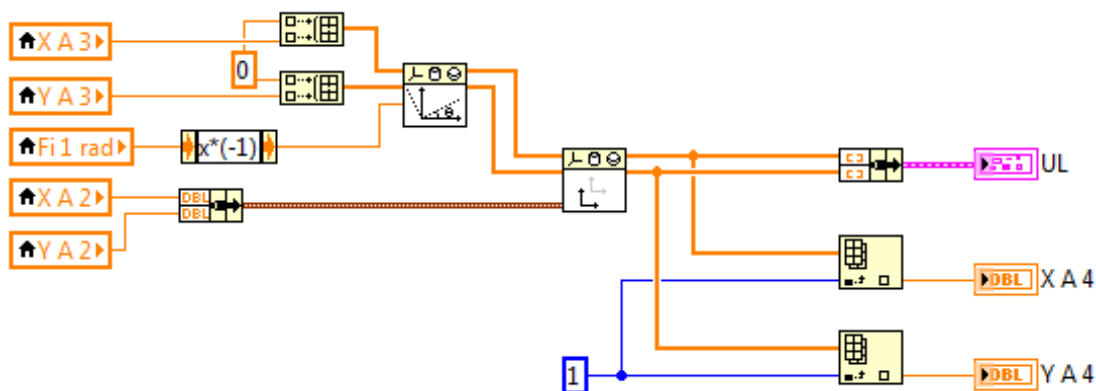


Рис. 5. Графически код узла расчета вектора напряжения сетевого дросселя

Элементы графического кода, реализующие расчет параметров вектора напряжения на сетевом дросселе L , приведены на рис. 5. Определение параметров остальных векторов выполняется сходными графическими структурами. Для удобства восприятия векторной диаграммы, воспроизводимой на виртуальном инструменте, начала и концы соответствующих друг другу векторов соединены.

Данный эффект достигается тем, что расчетные координаты концов одного вектора являются начальными для другого. Это реализуется с помощью локальных переменных X и Y , имеющих собственные индексы, соответствующие каждому вектору, использованному в инструменте.

Разработанная система управления учитывает возможное наличие начального фазового сдвига между напряжениями соединяемых линий электропередачи (рис. 6) [17].

Исследование поведения системы векторов при различных параметрах напряжения линий электропередачи позволило получить зависимость величины активной мощности, генерируемой/потребляемой инвертором напряжения INV , от задаваемого фазового угла тока сетевого дросселя (FiI) и величины фазового сдвига между напряжениями линий электропередачи (Fig).

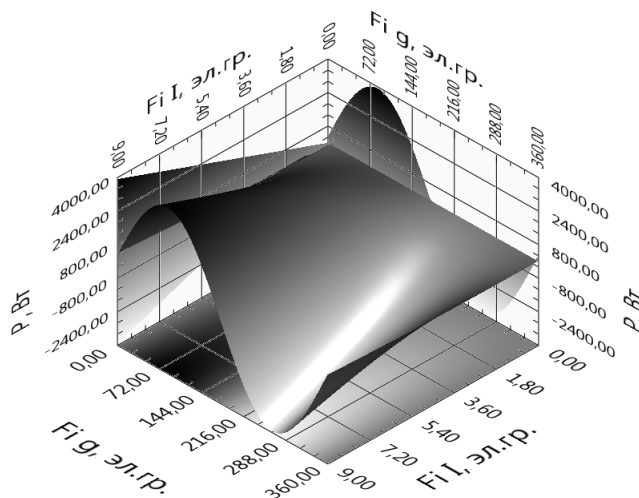


Рис. 6. Активная мощность, генерируемая/потребляемая инвертором напряжения INV , при опережающем характере напряжения линии Л2

Анализ параметров поверхности, образованной геометрическим местом соответствующих амплитудам активной мощности точек, позволяет сделать вывод, что потребление активной мощности минимально при отсутствии начального фазового угла сдвига между напряжениями линий электропередач. Максимум потребляемой от преобразователя мощности приходится на формирование тока реактивного характера в линии Л1 и увеличивается пропорционально увеличению начального фазового сдвига между линиями.

Как следует из результатов моделирования работы преобразователя, при различных начальных фазовых сдвигах между напряжениями в узлах подключения линий характер формируемого тока не идентичен характеру тока, потребляемому при этом инвертором напряжения.

Данное явление объясняется тем, что несмотря на заданный характер тока линии электропередачи вектор добавочной э.д.с. может иметь фазовый угол относительно тока сетевого дросселя и, как следствие, взаимодействие вводимой в линию э.д.с. и формируемого тока идет по собственному закону.

Характер фазового сдвига между напряжениями линий важен для определения активной составляющей мощности выходного преобразователя, регулирующего напряжение на сетевом дросселе. Отстающий характер напряжения линии

Л2 приводит к увеличению потребления активной мощности преобразователем от линии электропередачи при изменении фазового угла тока линии от 0 до 90 эл. гр. А в диапазоне 180–270 преобладает рост генерации активной мощности преобразователем в линию электропередачи (рис. 7).

Опережающий характер напряжения линии Л2 имеет зеркально обратную зависимость потребления/генерации активной мощности от задаваемого фазового угла тока и фазового сдвига между напряжениями линий.

Приведенные зависимости указывают на возникновение дополнительного потока мощности, не имеющего прямого влияния на формирование тока линии электропередач, однако способного оказывать воздействие на первичный источник энергии инвертора напряжения и на работу самого преобразователя посредством нарушения баланса мощностей в энергосистеме. Данный аспект должен учитываться при формировании тока, обеспечивающего стабильную работу инвертора напряжения, а также должны быть реализованы условия, допускающие работу инвертора в режиме рекуперации энергии.

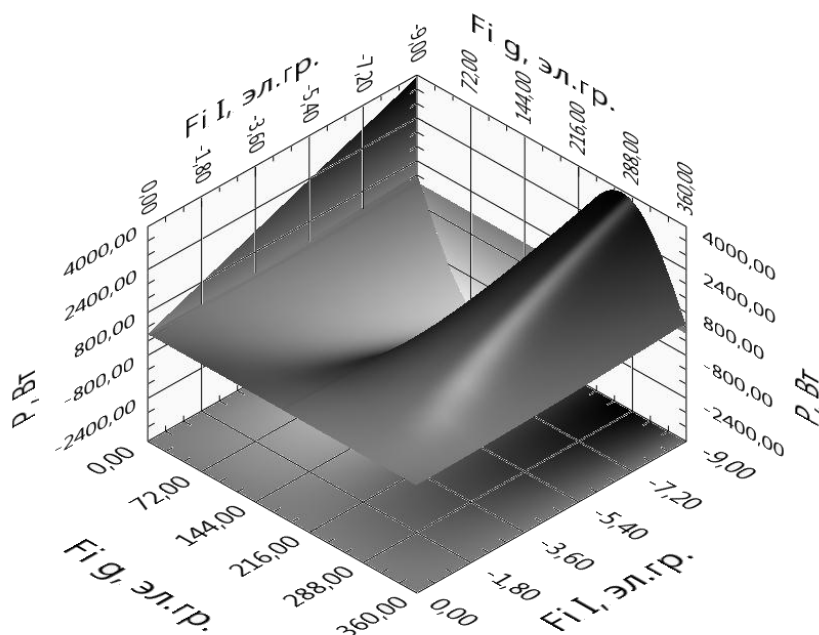


Рис. 7. Активная мощность, генерируемая/потребляемая инвертором напряжения INV, при отстающем характере напряжения линии Л2

Разработанный способ векторного регулирования тока линии электропередачи за счет управления величиной и фазовым углом напряжения на сетевом дросселе, посредством введения добавочной э.д.с. с заданными параметрами амплитуды и фазового угла относительно напряжения в точке подключения к линии позволяет реализовать:

- снижение нагрузки одной из линий электропередачи посредством перераспределения потоков мощности между линиями;
- реверс направления потока мощности из одной линии электропередачи в другую;
- режимы компенсации реактивной мощности.

Следует учитывать, что активные токи линии электропередачи, генерируемые устройством, будут иметь активно-реактивный характер по отношению к формируемому напряжению на выходе инвертора и, следовательно, оказывать влияние на баланс мощностей цепи питания инвертора.

На стадии разработки алгоритма управления и проведения пусконаладочных работ также следует учитывать начальный фазовый угол сдвига между напряжениями объединяемых линий в общем узле нагрузки, без учета которого могут возникать неявные энергетические потоки в контуре инвертора напряжения, подключенного к первичной обмотке серийного трансформатора.

Возникновение подобного эффекта нарушает корректное выполнение алгоритма управления и вызывает непрогнозируемое потребление или, наоборот, генерацию преобразователем активной мощности в линию электропередач, что может привести к нарушению энергетического баланса в звене постоянного тока и, как следствие, к некорректной работе преобразователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О., Окорочков В.Р. SMARTGRID как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом // Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – С. 52–58.
2. Zhang X.-P., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC transmission systems: Modeling and control. 2nd ed. Springer Nature, 2012. 552 p.
3. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9–27.
4. Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Трофимов И.М., Гедица А. Физическая модель Smart Grid // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. № 1 (116). С. 83–89.
5. 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.
6. Трофимов И.М., Зырин Д.В. О перспективах регулирования транспортных потоков мощности в электрических сетях // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2014. – Т. 2. – С. 102–107.
7. Вихорев Н.Н., Алешихин Д.А. Перспективные решения разработки адаптивных устройств автоматики нового поколения (энергорouter) // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки 2018»: труды научного конгресса. В 3 т. Т. 3. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – С. 77–82.
8. Sosnina E.N., Chivenkov A.I., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A. Development of medium voltage power flow control device // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018. P. 1–6.
9. Гребенщиков В.И., Чивенков А.И., Севастьянов В.В., Захаров И.А. Разработка систем управления интеллектуальных регуляторов параметров качества электрической энергии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 106–111.
10. Кубарьков Ю.П., Голубева К.А., Макаров Я.В. Использование распределенной генерации для улучшения уровней напряжения в интеллектуальных электросетях // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: мат. докладов IX открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 386 с.
11. Король С.В. Векторное управление активным корректором коэффициента мощности // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і Енергетика. – 2013. – № 1 (14). – С. 118–121.
12. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 23–31.
13. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. 2-е изд. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 664 с.
14. Hase Y. Handbook of power system engineering with power electronics applications, 2nd ed. 771 p.
15. Вихорев Н.Н., Панфилов С.Ю., Панфилов И.С., Чивенков А.И. Система управления электропитания с топливным элементом и буферным накопителем // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – С. 179–182.

16. Лоскутов А.Б., Чивенков А.И., Антропов А.П., Суяков С.А. Автоматизированная система управления узлом нагрузки в рамках концепции построения интеллектуальных электрических сетей // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 4–10.
17. Бедретдинов Р.Ш., Гедифа А., Чивенков А.И. К вопросу о регуляторе потоков мощности // NovalInfo.Ru. – 2016. – № 51. – Т. 1. – С. 16–23.

Статья поступила в редакцию 11 января 2018 г.

ALGORITHM OF POWER LINE CURRENT FORMATION AT LOAD NODE

**Y.P. Kubarkov¹, A.V. Chivenkov², N.N. Vikhorev², I.A. Lipuzhin²,
A.V. Shalukho²**

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva
24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

Abstract. *The paper is devoted to devices and methods for the automated regulation of power flows in the Smart Grids. A description of the method of the current vector control of the power transmission lines electrically combined in a general load power supply system by introducing an additional voltage and applying a line reactor with specified electrical parameters is given. A vector diagram of voltages and currents of the power system is presented, explaining the principles of forming the current parameters of a line reactor installed in an adjustable power line. A virtual tool made in the LabVIEW graphical programming environment based on the CompactRIO platform is described. It is used as an element of a voltage converter control system that implements control of electrical potentials on a line reactor. The effect of the initial phase shift between the voltages of the connected nodes of power lines is observed. The results of the analysis of the voltage vector system in the regulated power system when measuring the initial phase shift between the voltages of power lines and the formation of a predetermined nature of the current of the network choke are shown and the change in the value generated / consumed by the inverter active power voltage is shown.*

Keywords: *control system, LabVIEW, line reactor, micro grid, smart grid, vector current regulation, voltage inverter.*

REFERENCE

1. Kobets B.B., Volkova I.O., Okorokov V.R. SMART GRID as a concept of innovative development of electric power industry abroad // *Energexpert*, 2010. no. 2. Pp. 52–58 (In Russian).
2. Zhang X., Rehtanz S., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modeling and control // *Springer Nature*, 2012. 552 p.

Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksandr I. Chivenkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Nikolay N. Vikhorev, Senior Lecture.
Ivan A. Lipuzhin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Andrey V. Shalukho (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

3. *Loskutov A.B.* Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies // Smart electrical engineering, 2018. no. 1. Pp. 9–27 (In Russian).
4. *Chivenkov A.I., Vikhorev N.N., Trofimov I.M., Gedifa A.* Physical model of Smart Grid // Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2016. no. 1(116). Pp. 83–89 (In Russian).
5. *Chivenkov A.I., Sevastyanov V.V.* Power modules of the integrated control system of electrical networks // Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2013. no. 2(99). Pp. 196–204 (In Russian).
6. *Trofimov I.M., Zyrin D.V.* On the prospects for the regulation of traffic in coffee networks // Innovative technologies: theory, tools, practice. 2014. Vol. 2. Pp. 102–107 (In Russian).
7. *Vikhorev N.N., Aleshin D.A.* Perspective solutions for the development of adaptive automation devices of a new generation (energy router) // Proceedings of 20th International Scientific and Industrial Forum «Great Rivers 2018». In 3 Vol. Vol. 3, N. Novgorod: NNGASU, 2018. P. 77–82 (In Russian).
8. *Sosnina E.N., Chivenkov A.I., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A.* Development of medium voltage power flow control device // Proceedings of the 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018. P. 1–6.
9. *Grebenshchikov V.I., Chivenkov A.I., Sevastyanov V.V., Zakharov I.A.* Development of control systems for intelligent regulators of electrical energy quality parameters // Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2014. no. 5 (107). Pp. 106–111 (In Russian).
10. *Kubarkov Yu.P., Golubeva K.A., Makarov Ya.V.* The use of materials of distributed generations to improve the voltage levels in the intellectual power grids // Proceedings of the IX open youth scientific and practical conferences «Dispatching and control in electric power industry», Kazan, Russia, 2015. 386 p (In Russian).
11. *Korol S.* Vector control of the active corrector of power factor // Naukovipratsi Donetsk national technical university. Series: electrical engineering and energy. 2013. no. 1 (14). Pp. 118–121 (In Russian).
12. *Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratiev D.E.* Pulse width modulation in three-phase voltage inverters // Electricity. 2008. no. 7. Pp. 23–31 (In Russian).
13. *Zinoviev G.S.* Fundamentals of power electronics, 2nd ed. Novosibirsk: NSTU, 2003. 664 p (In Russian).
14. *Hase Y.* Handbook of power system engineering with power electronics applications // 2nd ed. 771 p.
15. *Vikhorev N.N., Panfilov S.Yu., Panfilov I.S., Chivenkov A.I.* Power Management System with Fuel Cells and Buffer Storage // Proceedings of Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electric Power Industry, N. Novgorod, Russia, 2014. P. 179–182 (In Russian).
16. *Loskutov A.B., Chivenkov A.I., Antropov A.P., Suyakov S.A.* Automated load management system in the construction of intelligent power networks // Industrial Energy. 2012. no. 5. Pp. 4–10 (In Russian).
17. *Bedretdinov R.Sh., Gedifa A., Chivenkov A.I.* On the issue of power flow regulator // NovaInfo.Ru. 2016. no. 51, vol. 1. Pp. 16–23 (In Russian).