

5. **Yermolenko D.V.** *Pokazateli elektromagnitnoi sovместимости i metody yeye obespecheniya v sisteme elektricheskoi tyagi peremennogo toka* (Indicators and methods for electromagnetic compability of its software in a system of electric traction AC). Diss. for the Degree of Dr. Sci. (Eng.). Moscow, VNIIZhT, 1999, 345 p.

6. **Timofeyev D.V.** *Rezhimy v elektricheskikh sistemakh s tyagovymi nagruzkami* (Modes of electrical systems with traction loads). Moscow, Publ. «Energia», 1972, 296 p.

7. **Karyakin R.N.** *Rezonans v tyagovykh setyakh i ego dempfirovaniye* (Resonance in traction networks and damping). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1961, 230 p.

8. **German L.A., Serebryakov A.C., Yermolenko D.V., Goncharenko V.P., Kvashchuk V.A., Maksimova A.A.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ. (Bulletin of All Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport)*, 2014, No. 1, pp. 47–54.

9. **German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and Electrical Transport)*, 2014, No. 3, pp. 9–14.

10. **Pravila zashchity ustroystv provodnoi svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoi seti elektrofisirovannykh zhelesnykh dorog peremennogo toka (Rules protection of wire communication and wire broadcasting from the influence of electrified railway traction network AC road). Moscow, Publ. «Transport», 1096, 135 p.**

11. **Markvardt G.G.** *Primeneniye teorii veroyatnostei i vychislitel'noi tekhniki v sisteme energosnabzheniya* (Application of

probability theory and computer technology in power supply systems). Moscow, Publ. «Transport», 1972, 224 p.

12. **Kosarev A.B.** *Osnovy teorii elektromagnitnoi sovместимости sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* (Basic theory of electromagnetic compability tranction power AC systems). Moscow, Publ. «Intekst», 2004, 272 p.

13. **Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbinenko L.V.** *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya zhelesnykh dorog peremennogo toka* (Electromagnetic processes in AC railway power supply systems). Moscow, Publ. «VMG-Print», 2015, 349 p.

14. **GOST 32144-2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovместимost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.* (Electric energy. Electromagnetic compability of technical means. Power quality limits in general type of power supply systems). Moscow, «Gosstandart», 2012.

15. **Patent RF** na poleznuyu model No. 117691. *Ustroystvo dlya modelirovaniya preobrazovatel'nogo elektrovoza peremennogo toka* (Utility patent No. 117691 (RF) A device for simulating of AC converter locomotive). Bulletin of inventions, 2012, No. 18.

16. **Bronstein I.N., Semendiyayev K.A.** *Spravochnik po matematike* (Hand-book of Mathematics). Moscow, State Publ. House of Physical and Mathematical Literature, 1969, 608 p.

* * *

Электричество, 2016, № 8, с. 46–52.

Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СтатКом

НЕНАХОВ А.И., ГАМАЗИН С.И.

Разработана и настроена полная модель нагрузки (в виде дуговой печи), работающая в комплексе с моделью источника питания и компенсирующим устройством. Проведена идентификация модели нагрузки для получения характеристик работы, близких к реальной печи. Такая модель в полной мере позволяет описать особенности работы установки и выявить наиболее приемлемый подход к управлению. Предварительно рассмотрены возможности компенсации реактивной мощности данной нагрузки с помощью СТК. Моделирование показало результаты, близкие к реальным оценкам по подавлению фликера. Рассмотрены различные схемы построения управляемого инвертора. К преимуществам такого компенсатора перед СТК относится помимо высокой скорости реализации задания тока наличие накопителя энергии. Выбор схемы с одним накопителем для трех фаз дает возможности по работе также и с активными мощностями в небольших промежутках времени. В связи с этим для такого устройства могут быть использованы подходы к управлению, отличные от классических. Для моделирования выбран один из трех типов схемы управляемого инвертора и рассчитаны параметры системы установки с учетом емкостей накопителя постоянного напряжения. Для данной схемы рассмотрены наиболее эффективные варианты управления.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсатор, FACTS, инвертор напряжений

Устройство СтатКом. Одним из направлений развития электротехники в настоящее время становится все более частое внедрение устройств, относящихся к системам FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems – гибкие системы передачи переменного тока). Наиболее востребованные устройства этой группы – это установки компенсации реактивной мощности (PM). И к самым современным устройствам из них относятся статические компенсаторы, построенные на IGBT-транзисторах или СтатКом.

Технологии СтатКом в электрических системах РФ в настоящее время практически не используются, так как в ряде случаев хотя и могут дать большую эффективность, они проигрывают в цене классическим тиристорным компенсаторам. СтатКом строится на базе управляемого инвертора напряжения (УИН), включаемого на напряжение сети через реактор (или трансформатор). Это позволяет в широких пределах регулировать выходной ток, изменяя не только его значение и фазу,

но также и форму [1], поэтому в определенных случаях уже сейчас целесообразно их внедрение.

К примеру, для дуговых печей мощностью менее 20 МВт, которые обладают наихудшими характеристиками выходного тока, установка СтатКом может быть сравнима по цене с установкой СТК аналогичной мощности. При этом такое устройство позволит не только компенсировать РМ, но и симметрировать активную мощность, а также улучшать гармонический состав тока, потребляемого комплексом.

Принцип работы основан на формировании выходного напряжения инвертора методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Выходной ток при этом образуется за счет разности напряжений на выводах реактора (рис. 1), т.е. выходного напряжения инвертора и напряжения сети:

$$I_{ст} = \frac{U_c - U_{ин}}{X_p} \quad (1)$$

Если оба напряжения синусоидальные и имеют одну фазу, в сеть будет протекать реактивный ток. В случае, когда напряжение инвертора выше напряжения сети, ток будет иметь ёмкостный характер, когда ниже — индуктивный. Для формирования активного тока напряжение УИН сдвигают по фазе. Потребление активного тока необходимо контролировать, чтобы компенсировать потери в устройстве и поддерживать постоянное напряжение на конденсаторах.

Для реализации СтатКом могут использоваться самые разнообразные схемы инверторов и их комбинации [2]. Использование того или иного варианта обосновывается расчетной мощностью, напряжением подключения и заложенными функциями. Но вне зависимости от структуры преобразователя характеристики его работы определяются не только параметрами оборудования, но и в большей степени алгоритмом его управления.

Функции компенсирующего устройства. Чтобы разработать такой алгоритм, нужно помимо выбора

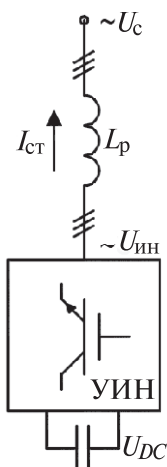


Рис. 1. Принципиальная схема работы СтатКом

принципиального устройства, провести рассмотрение требований к выполняемым функциям, т.е. условий компенсации РМ. Отчасти эти требования аналогичны требованиям для СТК, которые описаны Чарльзом Штейнметцом в начале XX столетия.

Для любого компенсатора алгоритм управления строится исходя, во-первых, из условия обеспечения нулевой реактивной мощности в линии питания и, во-вторых, с целью симметрирования протекающих активных токов по фазам. Решения данной задачи называют алгоритмом Штейнметца [3].

Расчёт может быть проведен несколькими различными путями: с использованием комплексных величин или с разложением токов на симметричные составляющие, а также рассмотрение может вестись в различных системах координат. Так или иначе основной проблемой является быстрое преобразование показаний с исходных датчиков в форму, пригодную для расчётов, как правило, комплексную.

Так в исходном доказательстве для обеспечения указанных условий использовалось представление как нагрузки, так и компенсатора, в виде междофазных комплексных проводимостей. В общем случае проводимости нагрузки, как и токи, являются функциями времени. При расчете предполагается, что в определенный момент времени нагрузочные проводимости являются отличными друг от друга и представляют собой общую несбалансированную нагрузку устойчивого состояния. Последовательное рассмотрение дискретных моментов времени заменяет рассмотрение процесса с изменяющейся нагрузкой. Такой расчёт справедлив при скоростях измерения ниже частоты переменного тока. А также используется при работе с быстроизменяющимися токами при условии, что преобразование измеряемых мгновенных величин проводится без значительных задержек.

Очевидно, что для компенсации индуктивной проводимости необходимо ввести в схему равную ёмкостную проводимость. При этом полная проводимость схемы находится суммированием значений проводимостей параллельных элементов. В результате реактивная мощность в фазах источника протекать не будет. Это справедливо не только при индуктивной, но и при ёмкостной нагрузке. Так выполняется первое условие работы — компенсация реактивной мощности в фазах.

Вторая задача также решается компенсатором РМ. Математически доказано [3], что не представляет сложности протекающую в одной фазе нагрузку активную мощность равномерно перераспределить на три фазы путем введения параллельно нагрузке реактивных проводимостей компенсатора.

Причем, если активная нагрузка включена только в фазе *AB*, то фаза *BC* должна содержать емкостную проводимость, равную $B_{BC}^{(AB)} = \frac{G_{AB}}{\sqrt{3}}$, а фаза *CA* – индуктивную $B_{CA}^{(AB)} = \frac{G_{AB}}{\sqrt{3}}$ (верхний индекс указывает фазу активной нагрузки, для симметрирования которой предназначены эти проводимости). Нижний индекс соответствует фазе, в которой данная проводимость задается. Аналогичными будут формулы для нагрузки в других фазах.

На рис. 2 представлены векторные диаграммы исходного активного тока (*a*) и токов с учетом компенсации (*б*).

Конечные фазные токи комплекса определяют согласно преобразованию из треугольника в звезду как

$$I_a = I_{R,ab} - I_{L,ca}; \tag{2}$$

$$I_b = I_{C,bc} - I_{R,ab}; \tag{3}$$

$$I_c = I_{L,ca} - I_{C,bc}. \tag{4}$$

Формулы (2)–(4) показывают возможность обеспечения симметрирования за счет работы

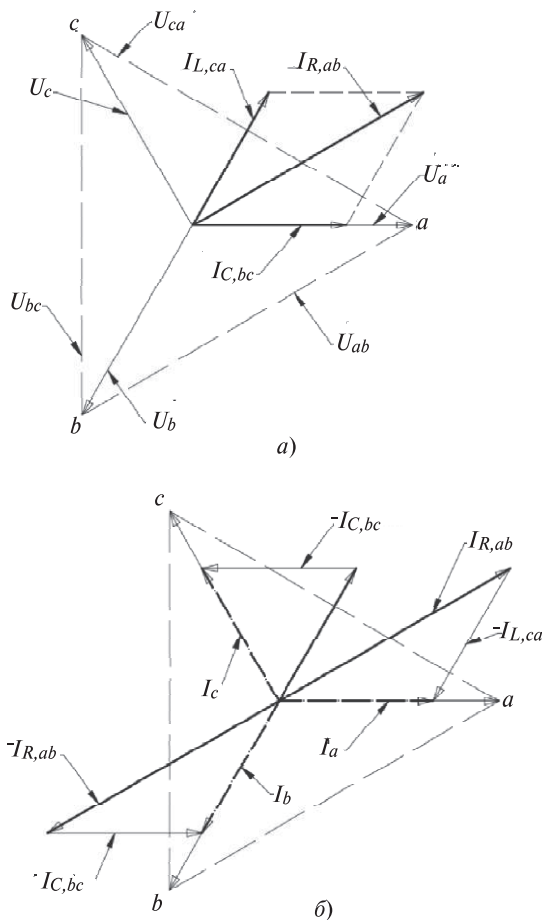


Рис. 2. Векторные диаграммы напряжений и токов при симметрировании по алгоритму Штейнметца

только с реактивными проводимостями (мощностями). Полные реактивные проводимости фаз компенсатора при работе с трехфазной несимметричной нагрузкой, таким образом, складываются согласно формулам:

$$B_{AB}^{(C)} = B_{AB} + B_{AB}^{(BC)} + B_{AB}^{(CA)} = -B_{AB} + \frac{G_{CA} - G_{BC}}{\sqrt{3}}; \tag{5}$$

$$B_{BC}^{(C)} = -B_{BC} + B_{BC}^{(AB)} + B_{BC}^{(CA)} = -B_{BC} + \frac{G_{AB} - G_{CA}}{\sqrt{3}}; \tag{6}$$

$$B_{CA}^{(C)} = B_{CA} + B_{CA}^{(AB)} + B_{CA}^{(BC)} = -B_{CA} + \frac{G_{BC} - G_{AB}}{\sqrt{3}}, \tag{7}$$

где $B_{AB}^{(C)}$, $B_{BC}^{(C)}$, $B_{CA}^{(C)}$ – расчетные проводимости фаз компенсатора; B_{AB} , B_{BC} , B_{CA} – исходные реактивные проводимости нагрузки; $B_{AB}^{(BC)}$, $B_{AB}^{(CA)}$, $B_{BC}^{(CA)}$, $B_{BC}^{(AB)}$, $B_{CA}^{(AB)}$, $B_{CA}^{(BC)}$ – проводимости, обеспечивающие симметрирование активных токов; G_{AB} , G_{BC} , G_{CA} – активные проводимости нагрузки.

При этом для симметрирования однофазной нагрузки может потребоваться как положительная, так и отрицательная реактивная мощность, а значение ее будет не более значения однофазной активной мощности, сниженной в $\sqrt{3}$ раз.

Данный расчет показывает, что перераспределение активной нагрузки между фазами не потребует дополнительных источников энергии и может быть выполнен полностью управляемым компенсатором реактивной мощности.

Классический метод управления. При работе с резкопеременной нагрузкой факторами, влияющими на эффективность компенсации, являются: сам алгоритм управления и быстродействие системы, которая его реализует. При использовании СТК из-за особенностей схемы так или иначе возникает определенная задержка между вычислением сигнала управления и его выполнением. Очевидно, что форма и значение тока определяются примерно на 10 мс раньше его фактической реализации, так как импульс на открытие тиристора задается 1 раз за полупериод промышленной частоты, при этом угол открытия тиристора рассчитывается, как правило, еще на предыдущем периоде. Поэтому для СТК увеличение скорости расчетов системой управления, хотя и является важным, не позволяет значительно улучшить показатели работы.

В свою очередь, современные устройства на IGBT, использующие для формирования тока метод широтно-импульсной модуляции, не обладают подобными задержками и могут с гораздо большей скоростью изменять значение тока (в пределах одной полуволны). При этом все вычисления и их реализация должны проводиться по текущим зна-

чениям входных параметров в очень короткое время (не более 1–3 мс).

Современная элементная база уже позволяет вести необходимое количество расчетов в реальном времени с частотой дискретизации порядка 10 кГц. При этом период обновления данных составляет 100 мкс. Этого вполне достаточно, чтобы снять все ограничения, вызванные скоростью расчета управляющего сигнала, и на первый план выходит вопрос, как математически рассчитывать необходимые токи компенсации, когда для выделения активной и реактивной мощности в классическом представлении требуется рассмотреть, как минимум, период входных сигналов тока и напряжения.

Для использования алгоритма Штейметца в таком устройстве необходимо иметь возможность преобразования текущих токов и напряжений в комплексные значения в одной системе координат. Такое преобразование, обеспечивающее быструю реакцию на изменения тока, можно осуществить, используя датчики активных и реактивных токов, применяемые СТК.

Данные датчики основаны на использовании операций численного дифференцирования как сигнала тока, так и напряжения.

Так, если принять, что напряжение фазы выражается как $U(t) = u(t)\sin(\omega t)$, а ток нагрузки $I(t) = i(t)\sin(\omega t + \varphi)$, где $u(t)$ и $i(t)$ – значения текущих амплитуд; ω – угловая частота; φ – фаза тока относительно напряжения, то мощности могут быть представлены как

$$p(t) = i(t)u(t) + i'(t)u'(t) = U(t)I(t)\cos\varphi; \quad (8)$$

$$q(t) = i(t)u'(t) - i'(t)u(t) = U(t)I(t)\sin\varphi. \quad (9)$$

Такое вычисление позволяет устранить из входных сигналов датчиков составляющие двойной частоты, вызванные перемножением двух синусоидальных сигналов [4]. Дифференциальные датчики дают высокое быстродействие системы управления, которое необходимо для СтатКом, но и имеют определенные недостатки.

Стоит учитывать, что помимо активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ составляющей при работе с нелинейными нагрузками полная мощность включает также и мощность искажения $D(t)$. К этой части относят мощность, формируемую всеми составляющими неосновной частоты [6]. Данная мощность также не является полезной и должна быть с максимальной точностью устранена фильтрами и компенсатором.

Описанные вычисления основаны на тригонометрических представлениях токов и напряжений, что справедливо только для синусоидальных сигналов. Поэтому при работе с быстроизменяющимися токами, т.е. содержащими в себе большое количе-

ство гармонических составляющих, точность таких вычислений снижается, что сказывается на эффективности компенсации. Поэтому для первичной оценки систем, построенных на датчиках, работающих по описанным принципам, было проведено моделирование обработки несинусоидальных сигналов токов.

Результаты замеров показали, что наличие данных составляющих в сигналах, используемых для расчета, значительно снижает точность результатов. Причем, чем быстрее изменяется анализируемый ток, т.е. чем больше номер гармоники, тем большее влияние она оказывает на расчет. А для токов, содержащих широкий набор гармонических составляющих, следует ожидать более высокие погрешности.

В связи с этим ставится задача совмещения алгоритма с функцией активной фильтрации. Для компенсаторов, имеющих быстродействующие схемы формирования тока и собственные накопители энергии, это является перспективным направлением.

При обычной компенсации РМ достаточно вычислить реактивный ток (или мощность) по указанным формулам (5) и сформировать сигнал управления, соответствующий его значению.

А для работы с целью симметрирования активных нагрузок полученные величины активной и реактивной составляющих представляются как одна комплексная. После такого преобразования можно вычислять требуемые токи компенсации по методу симметричных составляющих или с использованием алгоритма Штейметца (что даст одинаковые результаты). В результате в токах, потребляемых из системы, устраняются реактивные токи и активные токи обратной последовательности. Таким образом строится управление для большинства современных компенсаторов.

На основании рассмотренных условий компенсации и методов расчета разработана расчетная математическая модель для анализа функционирования алгоритма. В ней были объединены модель дуговой печи [7], схема замещения питающей системы, модель силовой части установки СтатКом и модель системы управления, реализующая данный алгоритм. Структурная схема модели управления приведена на рис. 3.

На вход контроллера поступают измеренные значения токов нагрузки и сигналы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), соответствующие фазным напряжениям. Далее идет последовательная обработка в несколько этапов:

1) дифференциальными датчиками по формулам (8), (9) вычисляются активные и реактивные составляющие токов каждой фазы;

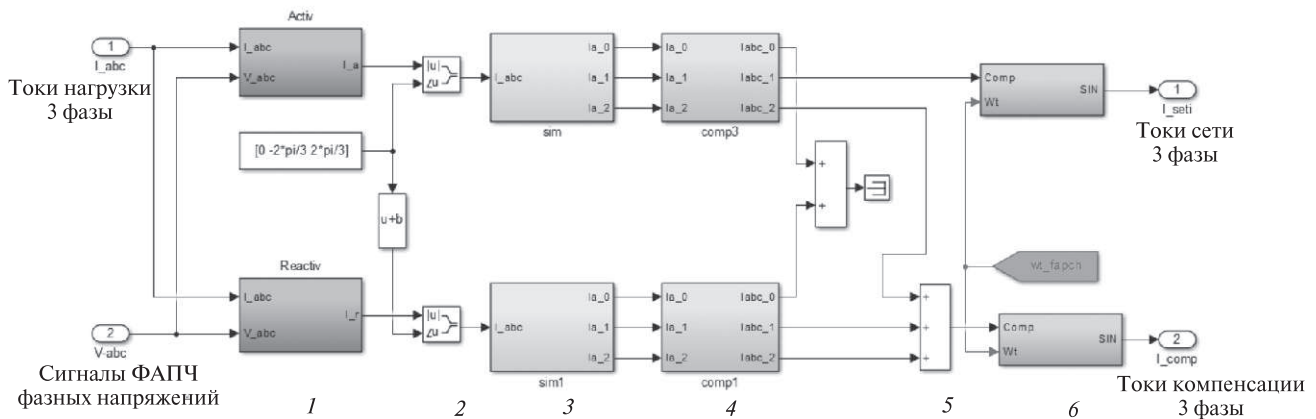


Рис. 3. Структурная схема расчета тока компенсатора

2) с использованием данных значений формируются комплексные значения отдельно для активных и реактивных токов в одной комплексной плоскости; так как для каждой фазы ток обрабатывается относительно своего же напряжения, необходимо учесть это при формировании комплексных чисел;

3) рассчитываются векторы прямой, обратной и нулевой последовательности каждой составляющей с использованием методов симметричных составляющих (МСС) [5] (вычисленные сигналы нулевой последовательности обусловлены ошибками в работе датчиков и в дальнейшем не используются);

4) так как преобразование МСС дает только один вектор для каждой последовательности, к ним добавляются два дополнительных для последующей работы по всем трем фазам;

5) полученные сигналы разделяются на две группы: к первой относятся те, что должны протекать в питающей комплекс линии, т.е. активные токи прямой последовательности; ко второй — те составляющие, которые должны быть скомпенсированы: активные токи обратной последовательности и реактивные токи (необходимо отметить, что вычисления в пп. 3) — 5) по смыслу соответствуют исходному алгоритму Штейметца и приводят к аналогичным результатам);

6) в завершение расчета полученные векторы переводятся во временные сигналы.

Стоит отметить, что при таком расчете активные токи от компенсатора будут симметричны, что обеспечит минимальную нагрузку на накопитель постоянного тока.

Дуговая печь по характеру своей работы оказывает негативное влияние на все показатели качества, и по их изменениям проводится оценка работы компенсатора. В связи с необходимостью расчета показателей в смоделированной системе были разработаны и проверены расчетные блоки для всех показателей, учитывающие основные требования стандартов на качество электроэнергии и средства

измерения [8]. При такой нагрузке важное значение имеют колебания напряжения, и поэтому эффективность компенсации в целом оценивается по дозе фликера. В смоделированной системе без учета компенсации средняя по трем фазам кратковременная доза фликера составляет 3,738.

В частности, рассматривается коэффициент подавления фликера K_p , равный отношению дозы фликера, вызванной работой нагрузки, к аналогичной величине с учетом компенсации. Как правило, для СТК данная величина находится в пределах 1,4–2 единиц, а для установок СтатКом достигает 4-х единиц.

Измерения в модели, учитывающей большое число влияющих факторов, показали, что компенсатор, работающий по описанному алгоритму управления, позволяет снизить дозу фликера до 0,974, при этом коэффициент подавления составляет не менее 3,8. Это указывает на высокую точность компенсации реактивной мощности, однако гармонический состав токов при этом не улучшается.

Необходимо отметить, что конечные показатели обусловлены не только самим алгоритмом управления, но и точностью модели установки.

Метод управления с использованием энергии накопителя. Чтобы максимально использовать возможности СтатКом по формированию токов сложной формы и использованию накопленной энергии, был предложен второй вариант расчета сигнала управления.

Токи печи имеют спектр с несколькими выраженными составляющими, частота которых кратна 50. Поэтому, анализируя график тока в течение одного периода (т.е. 20 мс), можно вычислить фазу и амплитуду сигнала основной частоты и сигналов частоты, кратной основной. Для этого используется вычисление коэффициентов по формулам для тригонометрического ряда Фурье. Этот подход описан в [9]. Входной сигнал тока представляется как сумма синусоидальных графиков кратных частот:

$$I(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad (10)$$

где

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(t) \cos(n\omega t) dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(t) \sin(n\omega t) dt.$$

Вычисляемые коэффициенты формулы a_1 и b_1 будут соответствовать амплитудам реактивной и активной частей тока при задании переменной времени согласно с фазным напряжением. На этом основан метод управления. Рассчитав амплитуду активных токов в фазах, для каждой из них вычисляется желаемый ток потребления системой как активный ток нагрузки с амплитудой, усреднённый по трем фазам. А токи компенсатора задаются как разность текущего и желаемого тока.

Поскольку в каждый момент времени происходит интегрирование за последние 20 мс, расчетный сигнал тока линии сглаживается. При этом в определенные моменты, когда активный ток нагрузки резко изменяется, для выполнения задания потребуются выдача активного тока от компенсатора. Это возможно реализовать, затратив часть энергии, сохраненной в накопителе, после чего заряд восстанавливается за счет подзарядки от системы электроснабжения в течение короткого времени.

Таким образом от сети потребляется только активный ток. Его форма искажается лишь плавными изменениями амплитуды. На рис. 4 показан результирующий ток после компенсации на одном графике с исходным током нагрузки и фазным напряжением.

В данном случае, помимо подавления колебаний напряжения за счет компенсации РМ, установка выполняет также и функцию активной фильтрации. Присутствующие в исходном токе составляющие 3, 5, 7-й гармоник фильтруются весьма эффективно, что приводит и к улучшению гармонического состава напряжения.

Кратковременная доза фликера, измеренная при тех же условиях, что и раньше, при данном подходе к управлению составила 0,627 единицы. Следовательно, коэффициент подавления фликера достиг 6 единиц.

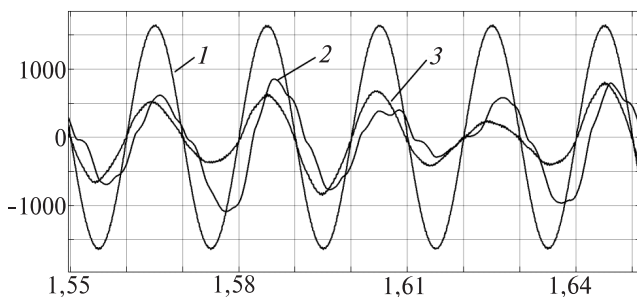


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (1), тока нагрузки (2) и тока линии (3) при компенсации по второму методу

Негативно на точность расчетов по такому методу может повлиять наличие в сигналах тока составляющих частот, не кратных основной, т.е. интергармоник. Интегрирование за период промышленной частоты полностью не устраняет их влияние на выходной сигнал. Поэтому были проведены опыты по моделированию работы с такими токами и оценка снижения показателей работы. В результате получено, что при значениях интергармоник не выше 5% и при невысокой частоте их влияние не существенно, а чем выше частота такого сигнала, тем меньшую ошибку он вносит.

Заключение. Достаточно давно для использования в СТК разрабатывались методы управления, направленные на повышение качества подавления колебаний напряжения. Эти алгоритмы широко применяются в различного типа компенсаторах. Однако для полностью управляемых устройств это не всегда позволяет использовать все их преимущества. Поэтому моделирование полной схемы компенсатора, оценка эффективности расчетов и сравнение результатов для разных способов формирования сигнала управления представляют интерес.

Метод, основанный на дифференциальных датчиках, показал в 2 раза более эффективное подавление колебаний в сравнении с СТК. Однако были выявлены факторы, снижающие точность датчиков такого типа. Помимо этого, данный подход не учитывает гармонические искажения тока, поэтому для максимального использования преимуществ полностью управляемого компенсатора необходимо было бы вводить в систему управления дополнительные вычисления.

Помимо этого, рассмотрен метод непосредственного выделения активного тока основной частоты с помощью преобразований Фурье. Выделение амплитуды и фазы тока первой гармоники позволяет понять, какие токи должны протекать в сети, и сформировать ток компенсатора, включающий все посторонние составляющие. Сглаживание, вносимое интегрированием за период, требует от компенсатора регулирования активных токов. Моделирование показало, что схема с накопителем сможет это обеспечить.

Сравнение работы различных вариантов обработки позволило оценить режимы, в которых компенсатор работает с максимальным использованием преимуществ полностью управляемых устройств. При этом выполняется сразу три функции: компенсация РМ, симметрирование нагрузки и активная фильтрация токов. Это положительно влияет на все оцениваемые параметры качества электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виджей К. Суд. HVDC and FACTS Controllers. Применение статических преобразователей в энергетических системах/Пер. с англ.: НП «НИИА», 2009, 344 с.

2. **Narain G. Hingoranl, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press Marketing, 2000, 440 p.

3. **Otto R.A.** Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators. — Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, No. 5, vol. PAS-97, 11 p.

4. **Патент РФ № 2012100347.** Датчик реактивной мощности резкопеременной нагрузки для управления статическим компенсатором реактивной мощности / В.В. Тропин, В.А. Кузьменко, Д.С. Мологин, О.С. Панова. — БИ, 2013, № 20.

5. **Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.** Основы теории цепей: Учебник для вузов. — М: Энергоатомиздат, 1989, 528 с.

6. **Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. — Н.Новгород: НГТУ, 2004, 214 с

7. **Ненахов А.И., Гамазин С.И.** Совершенствование подходов к моделированию токов дуговой сталеплавильной печи при разработке компенсаторов реактивной мощности. — Промышленная энергетика, 2015, № 9, с. 25–31.

8. **ГОСТ Р 51317.4.15-2012.** Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и

конструктивные требования. — М.: Стандартинформ, 2012, 75 с.

9. **Аргунов А.В.** Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. — СПб.: СПбГМТУ, 2009, 134 с.

[03.12.2015]

А в т о р ы: Ненахов Александр Игоревич окончил Институт электротехники Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ») в 2013 г. Аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП) НИУ «МЭИ». Инженер отдела систем управления АО «Нидек АСИ ВЭИ».

Гамазин Станислав Иванович окончил МЭИ в 1962 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию «Автоматизация расчетно-экспериментальных исследований переходных процессов, обусловленных следящей нагрузкой переменной частоты систем промышленного электроснабжения». Профессор кафедры ЭПП НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 8, pp. 46–52.

Combining the Functions of Reactive Power Compensation, Balancing, and Active Filtration of Currents in Constructing a StatCon Device Control Algorithm

NENAKHOV Aleksandr Igorevich (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU«MPEI»), Moscow, Russia) — Ph.D. Student, Engineer (Public Company «Nidec ASI VEI»)

GAMAZIN Stanislav Ivanovich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor, Dr.Sci. (Eng.)

A full model of load (in the form of an arc furnace) operating jointly with a power source model and a compensating device is developed and adjusted. The load model is identified to obtain performance characteristics close to those of a real furnace. With such a model, it becomes possible to fully describe the installation's operating features and to reveal the most acceptable approach to its control. The possibilities for compensating the reactive power of this installation using a static thyristor var compensator are preliminary considered. The simulation results were found to be close to realistic flicker suppression assessments. Various schematic solutions for constructing a controlled inverter are considered. The list of advantages of a such compensator over a static thyristor var compensator includes, apart from a high current setpoint adjustment rate, the presence of an energy storage. The arrangement with one energy storage for three phases opens the possibility to manipulate also with active power within short intervals of time. Owing to this feature, control approaches differing from the classic ones can be used for such a device. One of three possible types of a controlled inverter arrangement was selected for simulation, and the installation system parameters were calculated taking into account the capacitances of a constant-voltage energy storage. The most efficient control alternatives are considered for this circuit arrangement.

Key words: reactive power, compensator, FACTS, voltage inverter

REFERENCES

1. **Vidzhei K. Sud.** *Primeneniye staticheskikh preobrazovatelei v energeticheskikh sistemakh* (NVDC and FACTS Controllers)/Transl. from Engl. Publ. NP «NIIA», 2009, 344 p.

2. **Narain G. Hingoranl, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press Marketing, 2000, 440 p.

3. **Otto R.A.** Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators. — Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, No. 5, vol. PAS-97, 11 p.

4. **Patent RF № 2012100347.** *Datchik reaktivnoi moshchnosti rezkoperemennoi nagruzki dlya upravleniya staticheskim kompensatorom reaktivnoi moshchnosti* (The sensor of reactive power of load variable for controlling static reactive power compensator)/V.V. Tropin, V.A. Kusmenko, D.S. Molugin, O.S. Panova. Bulletin of inventions, 2013, № 20.

5. **Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V.** *Osnovy teorii tsepei: Uchebnik dlya vuzov* (Principles of circuits theory.

Textbook for Higher education institutions). Moscow. Publ. Energoatomizdat, 1989, 528 p.

6. **Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Sevost'yanov A.A.** *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike* (Electromagnetic compatibility in Electric Power Engineering). Publ. N. Novgorod State Technical University, 2004, 214 p.

7. **Nenakhov A.I., Gamazin S.I.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2015, No. 9, pp. 25–31.

8. **ГОСТ R 51317.4.15–2012.** *Sovместimost' technicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Flikermetr. Funktsional'nye i konstruktivnye trebovaniya* (Electromagnetic compatibility of technical components. Flickermeter. Functional and design demands). Moscow. Publ. Standartinform, 2012, 75 p.

9. **Argunov A.V.** *Upravleniye kachestvom elektroyenergii pri nesinusoidal'nykh rezhimakh* (Quality control of electric power under nonsinusoidal mode). St. Petersburg State Sea Technical University, 2009, 134 p.

