

Г.М. МУСТАФА, к.т.н., начальник отдела ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация;
С.И. ГУСЕВ, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация;
А.А. ЕРШОВ, инженер, ООО «НПП ЛМ Инвертор», Москва, Российская Федерация;
И.Б. ЛУГАНСКАЯ, старший научный сотрудник ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация.

МОДУЛЬНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Введение. Напряжение сети, питающей тяговые подстанции железной дороги переменного тока искажено действием однофазной несинусоидальной нагрузки, создаваемой выпрямителями электровозов. Выполненные контрольные измерения вдоль Транссибирской магистрали показывают существенные отклонения качества напряжения во всех контрольных точках от нормативных значений по двум группам показателей:

- по несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- по искажению синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициенту n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Согласно [1] снижение показателей качества электроэнергии приводит к увеличению потерь напряжения и мощности, уменьшению пропускной способности сетей, нарушению нормальной работы и срока службы оборудования.

Так:

- снижение напряжения на 1% приводит к снижению производительности электрооборудования на 0,1 2%;
- при несимметрии напряжения 2% срок службы асинхронных двигателей сокращается на 10,8 %, а потери возрастают на 8%;
- при той же несимметрии срок службы синхронных двигателей сокращается на 16,2%, трансформаторов – на 4%, конденсаторов – на 20%;
- при увеличении напряжения на 10% срок службы осветительных установок сокращается в 4 раза;
- при несимметричной токовой нагрузке фаз нагрузочные потери в сетях возрастают на 7-15%.

Устройство для приведения показателей качества напряжения в норму в окрестности тяговой подстанции должно выполнять одновременно две функции

- симметрировать напряжение (подавлять обратную составляющую напряжения);
- фильтровать высшие гармоники напряжения в динамичном режиме, когда источник гармоник быстро изменяется.

Вопросам симметрирования напряжения в 3-фазной сети пассивными устройствами посвящено множество работ, начиная с классического труда Штейнмеца [2]. Большой вклад в решение проблемы симметрирования напряжения внесли известные электротехники – Милях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. [1, 3, 4]. В последние годы большое развитие получили управляемые устройства на основе силовой электроники. Однако, полноценно выполнять эти функции традиционные управляемые устройства не могут. Применявшиеся для этого до настоящего времени технические средства – системы СТК с регулируемыми тиристорными реакторными группами и пассивными настроенными фильтрами – дают лишь дорогостоящее и неполноценное решение задач обеспечения качества. Не вполне полноценное решение даёт и применение системы СТАТКОМ с трёхуровневым широтно-модулированным конвертором напряжения [5]. Частота PWM в мощных системах жёстко ограничена сверху коммутационными потерями мощности, и поэтому функция фильтрации, когда она востребована, при использовании трёхуровневого СТАТКОМ по-прежнему возлагается на пассивные цепи.

Комплексное решение задачи симметрирования и динамичной фильтрации способно дать новое техническое решение: модульный многоуровневый PWM – преобразователь (Modular Multilevel Converter - MMC) [6, 7]. В MMC эквивалентная частота PWM равна произведению числа модулей фазы на частоту PWM одного модуля. Даже при умеренном числе модулей и невысокой частоте PWM модуля без труда достигаются требуемая эквивалентная частота PWM и требуемая ширина полосы пропускания частот.

Быстрый прогресс IGBT, а также усовершенствование сигнальных процессоров (рост быстродействия, увеличение разрядности) открыл возможность для применения преобразователей этого типа в электроэнергетике, где они конкурируют с традиционными тиристорными системами и открывают новые возможности построения гибких систем регулирования мощности в системах АС (переменного тока) (Flexible Alternated Current Transmission Systems - FACTS). Решающее значение для расширения применений систем MMC в электроэнергетике имеет изобретение Р. Марквардтом современного варианта модульной многоуровневой схемы [6].

С системой MMC электроэнергетика получила полноценное средство трансформации форм электрической энергии. Электротехника уровня потребителей получила такое средство чуть раньше. В течение короткого промежутка времени PWM-преобразователи не только заняли доминирующее положение в технике преобразования

© Г.М. Мустафа, С.И. Гусев, А.М. Ершов, И.Б. Луганская, 2015

форм электрической энергии, но и многократно расширили сферу применения преобразователей и соответствующий рынок. Эта сфера охватывает ныне весь диапазон от малых источников питания компьютеров и бытовых приборов до мощных электроприводов установок сжижения природного газа.

Новый системный принцип модульных многоуровневых схем снял препятствия распространению технологии транзисторных PWM-преобразователей на высокие напряжения и мощности. ММС является универсальным и совершенным средством для регулирования потоков энергии в сетях и для управления качеством энергии. Насколько ожидаемым и востребованным электроэнергетикой является такое средство можно судить по скорости, с которой ММС получила всеобщее признание. Уже в 2010 году осуществлён первый проект передачи постоянного тока с преобразовательными подстанциями по технологии HVDC PLUS (базируется на ММС) и создан комитет IEC для выработки стандартов и рекомендаций по применению ММС в передачах энергии постоянным током. Однако ММС востребованы в качестве вспомогательного технического средства и в существующих сетях переменного тока. В них задачами ММС станут:

- участие в оптимальном регулировании перетоков энергии в разветвленных сетях переменного тока;
- обеспечение показателей качества напряжения в сетях переменного тока в условиях возрастающих искажающих факторов.

Цель работы. В настоящей работе освещаются результаты разработки и испытаний опытного образца активного фильтра, выполненного по одной из ранних схем ММС (см. рис. 1), и предназначенного для применения в составе полюса вставки постоянного тока, который однако позволяет при некоторой доработке воспроизводить и более специфические условия работы, необходимые для решения задач обеспечения качества напряжения.

Постановка проблемы. Обеспечение показателей качества в условиях действия однофазной искажающей нагрузки включает в себя необходимость решения триады задач:

- a) регулирование реактивной мощности;
- b) симметрирование;
- c) фильтрацию высших гармоник и демпфирование переходных колебаний.

Проблемы применявшихся технических решений имеют фундаментальный характер. Широкополосная фильтрация в классе пассивных (линейных стационарных) цепей возможна лишь с применением резисторов, согласованных с волновым сопротивлением цепи. В электроэнергетических целях (в отличие от целей радиотехники и связи) применение согласованных резисторов, очевидным образом невозможно. Что же касается узкополосных (настроенных) фильтров, то применительно к ним действует дилемма «избирательность – затухание»: для обеспечения высокой избирательности требуется увеличение добротности, но при увеличении добротности увеличивается время затухания переходных процессов и наоборот. Вследствие этих общих закономерностей класса линейных стационарных систем, показатели качества пассивного фильтра в электроэнергетике являются неизбежно компромиссными - не слишком хорошая избирательность и не слишком долгое время затухания.

С применением активного элемента типа ММС (и соответственно с переходом от класса линейных стационарных систем к классу билинейных систем) в электроэнергетике становятся возможными как широкополосный фильтр, так и узкополосный фильтр с высокой избирательностью.

Модульный многоуровневый конвертор способен и должен осуществлять управление сразу совокупностью параметров сети переменного тока такой как:

- модуль прямой последовательности напряжения или тока (регулирование реактивной мощности);
- модуль обратной последовательности (обычно должен сводиться к нулю);
- комплексные амплитуды для некоей совокупности высших гармоник (должны сводиться к нулю);
- переходные колебания (должны демпфироваться).

К многообразию регулируемых параметров сети переменного тока при использовании ММС, которые содержат «подвешенные» конденсаторы, добавляется ещё совокупность параметров сети постоянного тока – напряжений этих подвешенных накопительных конденсаторов. Таким образом, возникает задача синтеза разветвлённой многоконтурной системы, управляющей одновременно совокупностью большого числа параметров.

Материалы исследования. Рассматривается схема ММС-пМ, представленная на рисунке 1, при работе в режиме СТАТКОМ, без применения дополнительных пассивных элементов (за исключением LC-фильтра для подавления пульсаций PWM, который энергетически незначим). Для построения такой системы при решении прикладных задач развита инженерная методика – DSB-алгоритм управления ММС. DSB-алгоритм базируется на традиционной «классической» теории управления и на теории трёхфазных (вращательных – drehnetz) цепей. Идея DSB-алгоритма заключается в последовательном построении регуляторов трёх типов:

- D – демпфирование (demp);
- S – селективное подавление (select);
- B – баланс (balance).

и последующим совмещении их действий (рис. 2).

Основная переменная управления ММС – задание напряжения $v_z(t)$ – образуется как трёхкомпонентная сумма:

$$v_z = v_{demp} + v_{sel} + v_{bal}.$$

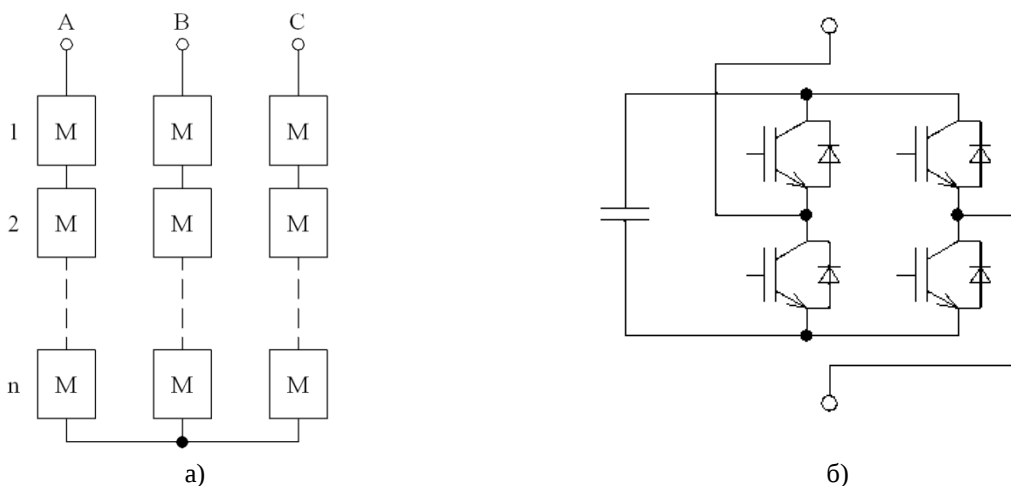


Рисунок 1 – Структура MMC-nM, не имеющая выделенных высоковольтных полюсов (а). MMC-nM составляется из мостовых PWM- модулей (б).

Каждый из компонентов образуется своими обратными связями и выполняет свою функцию в комплексе задач MMC. Компонент D (демпфирование) образуется с помощью обратной связи по выходному току активного элемента i_{ae} .

Компонент S (селективное подавление гармоник) образуется обратной связью по сетевому току i_s с участием в образовании этой связи напряжения сети v_s . Компонент B (баланс) образуется обратной связью по напряжениям накопительных конденсаторов звеньев постоянного напряжения (DC) модульного многоуровневого преобразователя с участием в этой обратной связи сетевого напряжения v_s .

Процессы и характеристики СТАТКОМ-MMC иллюстрируются результатами испытаний опытного образца активного фильтра мощностью 16 Мвар, выполненного по схеме MMC-nM (см. рис. 1), и предназначенного для применения в составе полюса передачи постоянного тока, однако который позволяет при некоторой доработке воспроизводить и более специфические условия работы.

Номинальные параметры испытательного стенда

- напряжение 15,75 кВ;
- мощность 16,6 МВА.

Упрощённая однолинейная схема стенда представлена на рис. 3. В качестве источника искажённого тока используется 6-ти-пульсный тиристорный выпрямитель мощностью 16,6 МВА, короткозамкнутый по постоянному току через сглаживающий реактор. По стороне переменного тока выпрямитель подключен к сборным шинам переменного тока напряжением 15,75 кВ, питающимся от трансформатора мощностью 3 МВА. MMC включается параллельно выпрямителю. Система управления выпрямителем оснащена регулятором тока, который осуществляет поддержание тока выпрямителя равного поступающему заданию.

При этом от шин переменного напряжения потребляется трапецевидный ток, состоящий из основной гармоники и канонических гармоник 6-пульсной схемы

$$5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$$

Назначением MMC является поддержание стабильного синусоидального напряжения на сборных шинах сети 15,75 кВ при изменениях потребляемого тока и изменениях высших гармоник тока.

Система управления MMC конструктивно разделяется на следующие составные части:

- ячейка управления модуля транзисторно конденсаторного (ТКМ) – 21 шт.;
- шкаф управления фазой (ШУФ) – 1 шт.;
- система управления, регулирования, защит и автоматики (СУРЗА) – 1 шт.

Ячейка управления ТКМ размещается непосредственно в силовом блоке ТКМ. Связь с блоком управления фазой осуществляется по оптоволоконному интерфейсу. Питание ячейки – через трансформатор тока от токовой петли с гальванической развязкой на полное рабочее напряжение. ШУФ размещается в отдельном шкафу (рис. 4) на потенциале «земли» с изоляцией от ячейки управления ТКМ через токовую петлю (питание) и оптоволоконные кабели (управление, диагностика) на полное рабочее напряжение.

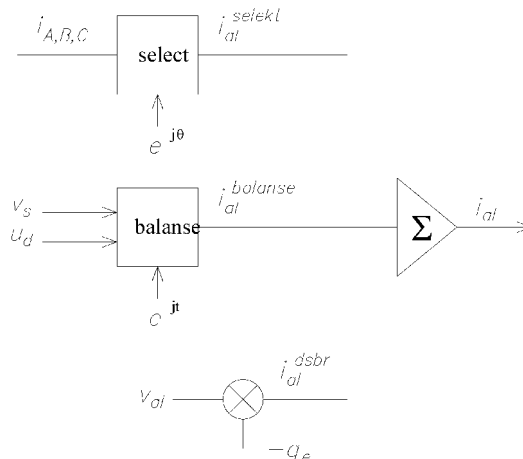


Рис. 2 - Структура управления MMC по DSB-алгоритму

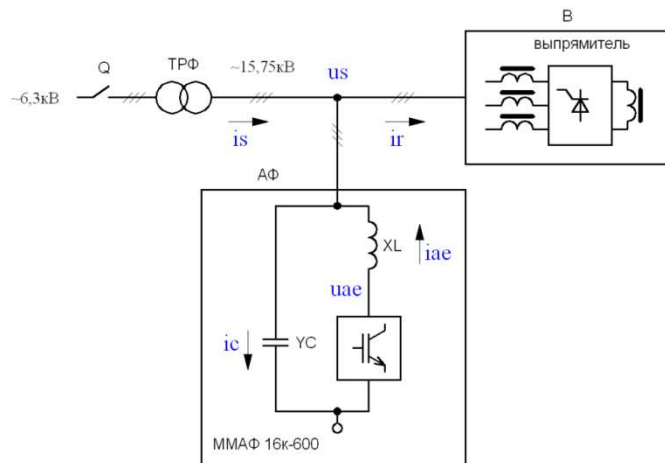


Рисунок 3 – Упрощенная однолинейная схема стенда для испытаний АФ
 АФ – активный фильтр; В – мостовой выпрямитель;
 Q – выключатель.



Рисунок 4 – Внешний вид шкафа управления фазами

В ШУФ входят три микропроцессорных блока управления фазами БУФ. Связь БУФ с СУРЗА осуществляется по быстродействующему оптоволоконному интерфейсу. СУРЗА размещается в отдельном шкафу (рис. 5), который может быть расположен удаленно от помещения с силовым оборудованием. В состав СУРЗА входит блок микропроцессорного управления, блок питания и панель реле для обмена дискретными сигналами.

Связь СУРЗА с системой верхнего уровня подстанции (АСУ ТП) осуществляется по быстродействующему цифровому интерфейсу с оптоволоконной развязкой.

Датчики тока и напряжения, входящие в состав ММС, осуществляют оцифровку измеряемых величин в непосредственной близости от соответствующих силовых элементов и передают данные в блок СУРЗА по быстродействующему оптоволоконному интерфейсу. Питание датчиков осуществляется от токовой петли с гальванической развязкой на полное рабочее напряжение.

В СУРЗА предусмотрены дополнительные оптические входы для приема оцифрованных сигналов с внешних датчиков напряжения (3 фазы) и тока (3 фазы).

На рис. 5 показан установившийся процесс системы. Трапециевидный ток выпрямителя $i_{га}$ практически полностью поглощается активным элементом, и сетевое напряжение остаётся синусоидальным. Поскольку выпрямитель замкнут на сглаживающий реактор, его активная мощность близка к нулю. Поэтому активная часть



Рисунок 5 – Внешний вид шкафа СУРЗА

сетевое тока весьма мала (около 3%). Реактивная часть сетевого тока полностью подавлена астатическим регулятором реактивной мощности.

Как было отмечено изготовленный активный фильтр был разработан для применения в составе фильтрокомпенсирующего устройства вставки постоянного тока. Однако, более востребованным оказалось его использование для симметрирования и фильтрации напряжения в окрестности подстанции 220 кВ Сковородино Забайкальской железной дороги. Для целей симметрирования очевидным образом необходимо изменить схему соединения силовой части из звезды в треугольник и провести соответствующую доработку алгоритмов управле-

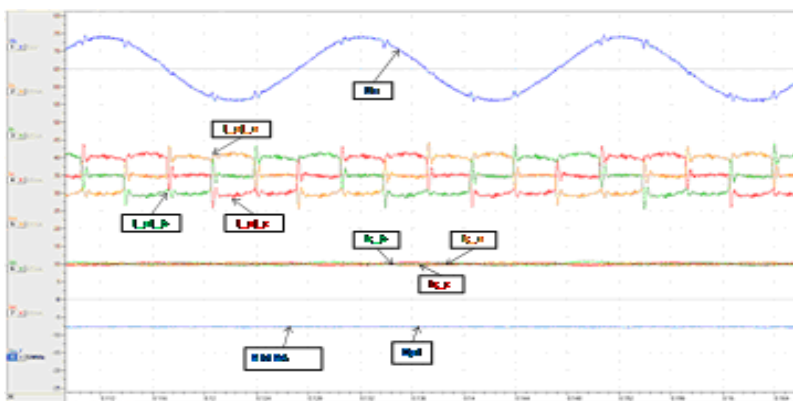


Рисунок 6 – Работа ММС совместно с выпрямителем: стационарный режим – ток выпрямителя 600А при напряжении сети 10 кВ. Сверху вниз: фазное напряжение (U_a), фазные токи активного элемента (I_{al}), фазный сетевой ток (I_{s_a}), реактивная мощность АФВГ (Q_{al}).

ния. Шунтирующее активное фильтро-симметрирующее устройство (АФСУ) на базе ММС предполагается присоединить к шинам 110 кВ ПС 220 кВ Сковородино через согласующий трансформатор с относительно небольшим напряжением короткого замыкания. Упрощённая структурная схема подключения АФСУ представлена на рисунке 7.

Была разработана следующая методика расчёта несимметрии и искажений на шинах 110 кВ ПС «Сковородино» при действии АФСУ методом частотных характеристик [8].

Расчёты выполняются по методу симметричных составляющих на основе амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) сети по расчётной схеме замещения, приведённой к уровню напряжения 110 кВ, которая учитывает схему замещения сети, параметры трансформаторов и отходящих линий электропередачи.

На первом этапе рассчитывается кривая тока однофазного выпрямителя электровоза, на основании анализа которой формируется вектор комплексных амплитуд гармоник искажающего тока нагрузки для гармоник с номерами: 1, 3, 5, 7, 9. Далее эти гармоники преобразуются в гармоники тока трёхфазной системы с номерами: $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 9$, отображая действие трансформатора тяговой подстанции с группой соединения обмоток Y/D (знак минус отображает обратную последовательность токов и напряжений).

По параметрам схемы замещения сети рассчитываются амплитудные фазочастотные характеристики входного сопротивления сети.

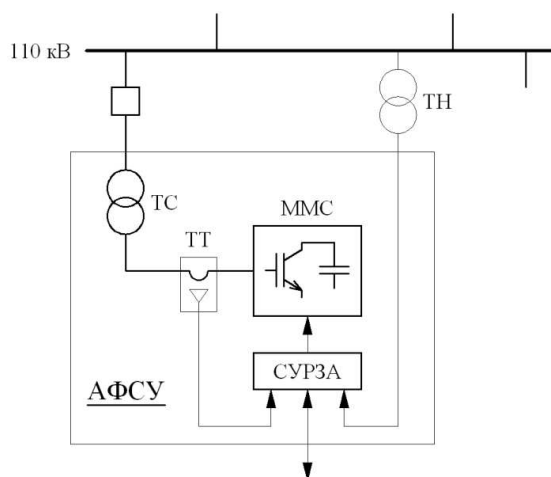
Модульный многоуровневый преобразователь (ММС) представляется как идеальный усилитель мощности, повышающий на силовом выходе сигнал задания для каждой рассматриваемой гармоники до величины, обеспечивающей либо полное подавление (обнуление) гармоник, либо их снижение до нормативного уровня.

Регуляторы искажающих гармоник АФСУ от гармоники кратности -1 (обратная последовательность - несимметрия) до гармоник кратности $\pm 3, \pm 5, \pm 7 \dots$ (искажения) отображаются косвенно, путём задания в напряжении АФСУ такой комплексной амплитуды искажающих гармоник, которая устраняет полностью или снижает до нормативного уровня соответствующей гармоники напряжения шин 110 кВ.

Проводится идентификационный расчет искажений напряжения на шинах 110 кВ при отсутствии АФСУ, на основании которого определяется величина искажающего тока электровоза по условию совпадения коэффициента несимметрии, получаемого по расчётной схеме, с измеренным при испытаниях – длительно сохраняющимися и наибольшими.

Рассчитываются комплексные амплитуды напряжений гармоник на шинах 110 кВ и на шинах 220 кВ при действии АФСУ при условии полного подавления гармоник на шинах 110 кВ. Это соответствует «заземлению» узла, соответствующего шинам 110 кВ схемы замещения, потенциал которого приравнивается нулю для каждой рассматриваемой гармоники, включая обратную последовательность. В этих условиях рассчитываются комплексные сопротивление и передаточные функции, комплексные амплитуды напряжений и токов АФСУ, на основании которых определяется предельная мощность АФСУ, необходимая для полного подавления несимметрии и гармоник с номерами 3, 5, 7, 9.

Рассчитываются комплексные амплитуды напряжений гармоник на шинах 110 кВ при условии снижения гармоник на шинах 110 кВ ниже предельно допустимых значений. Для этого задание напряжения гармоники ММС устанавливается на нулевом уровне, что соответствует закороченному выходу ММС. При этом согласующий трансформатор ММС остаётся в действии. Искажение напряжения шин 110 кВ в таком режиме снижается пропорционально соотношению сопротивлений схемы замещения. По комплексным амплитудам гармоник напряжения рассчитываются показатели качества напряжений шин 110 кВ, выраженные в % по отношению к величине основной гармоники напряжения. После расчёта комплексных амплитуд гармоник токов и напряжений по ним восстанавливаются соответствующие переменные и рассчитывается мощность АФСУ, необходимая для реализации такого режима.



ММС - модульный многоуровневый преобразователь ;
 ТС - согласующий трансформатор ;
 СУРЗА - система управления, регулирования и защиты ;
 ТТ и ТН - датчики тока и напряжения.

Рисунок 8 - Упрощённая структурная схема подключения АФСУ

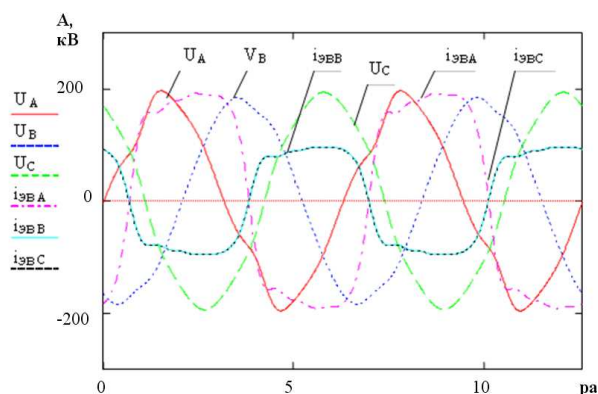


Рисунок 9 - Графики токов и напряжений для режима наибольших искажений. $U_{A, B, C}$ – фазные напряжения; $i_{эв A, B, C}$ – искажающие фазные токи.

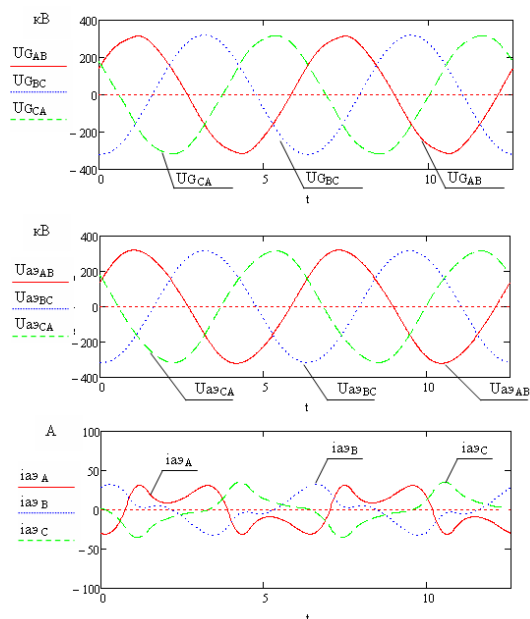


Рисунок 10 - Работа активного элемента в режиме наибольшей загрузки при подавлении гармоник ниже нормативных значений

$U_{эвAB, BC, CA}$ - линейные напряжения активного элемента;
 $i_{эв A, B, C}$ - фазные токи активного элемента;
 $U_{G AB, BC, CA}$ - линейные напряжения узла G расчетной схемы.

На рисунке 9 представлены расчётные количественные данные и графики для режима наибольших искажений при отключенном АФСК. Искажающая нагрузка сосредоточена на одной дистанции, и имеет величину: $I_{эвA} = 136$ А, $I_{эвB} = 0$, $I_{эвC} = 0$. Здесь A, B и C – индексы векторов 3-фазной системы координат.

Полная мощность искажающей нагрузки (мощность электровозов на дистанции) равна 31,4 МВА, а её активная мощность - 23,7 МВт.

На рисунке 10 приведены результаты действия АФСУ при подавлении гармоник ниже нормативных требований.

Величина искажений радикально снижается по сравнению с режимом работы без АФСУ. Мощность АФСУ при этом составляет 14,6 Мвар.

Список литературы: 1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 268 с. 2. С.Р. Steinmetz. Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 с. 3. Миллях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. – Киев: Наукова Думка, 1973. – 219 с. 4. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Т. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 174 с. 5. Rolf Grunbaum, Tomas Johansson. SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6/98. 6. Marquardt Rainer (DE) – Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors. Publication number DE10103031, 2002-07-25. 7. A. Lesnicar, and R. Marquardt, “An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range”, IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003. 8. Мустафа Г.М., Гусев С.И., Еришов А.М. и Луганская И.Б. Расчет мощности активного филтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сквородино. – Электрические станции. – 2005. - №3. - С. 46-53.

Bibliography (transliterated): 1. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyah. – Kiev: Naukova Dumka, 1985. – 268 s. 2. С.Р. Steinmetz. Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 с. 3. Miljah A.N., Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Shemy simmetrirovaniya odnofaznykh nagruzok v trehfaznykh tsepjakh. – Kiev: Naukova Dumka, 1973. – 219 s. 4. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.T. Optimizatsiya nesimmetrichnykh regimov system elektrosnabzheniya. - Kiev: Naukova Dumka, 1987. – 174 s. 5. Rolf Grunbaum, Tomas Johansson. SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6/98. 6. Marquardt Rainer (DE) – Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors. Publication number DE10103031, 2002-07-25. 7. A. Lesnicar, and R. Marquardt, “An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range”, IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003. 8. Mustafa G.M., Gusev S.I., Ershov A.M. and Luganskaja I.B. Raschet moschnosti aktivnogo filtrosimmetriuyushego ustroystva dlja normalizatsii naprjagenija na shinah PS 220 kV Skovorodino. – Elektricheskie stantsii. – 2005. - №3. –S. 46-53.

Поступила (received) 04.09.2015