

Особенности использования модульных многоуровневых преобразователей для нормализации показателей качества напряжения электрической сети

УДК 621.311

Рассматриваются вопросы использования широтно-модулированных модульных многоуровневых преобразователей (ММС) для компенсации реактивной мощности, активной фильтрации и симметрирования напряжения в промышленных сетях. Приведена классификация преобразователей, предназначенных для этой цели, рассмотрены особенности работы преобразователей, не имеющих возможности межфазного обмена мощностью, в режиме симметрирования.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях наличия мощных источников динамично изменяющихся искажений в электрической сети для нормализации качества напряжения необходимо применение быстродействующих средств компенсации искажений, действующих в режиме реального времени. В общем случае устройство для приведения показателей качества напряжения в норму должно в динамичном режиме выполнять одновременно три функции:

- компенсировать реактивную мощность;
- симметрировать напряжение (подавлять обратную составляющую напряжения);
- фильтровать высшие гармоники напряжения.

Для эффективного выполнения этих функций устройство должно обеспечивать еще и демпфирование переходных процессов.

Эффективно выполнять эти функции традиционные устройства не могут. Статические тиристорные компенсаторы (СТК), управляемые шунтирующие реакторы (УШР) с подмагничиванием или трансформаторного типа совместно с пассивными фильтрами для устранения несимметрии должны работать в несимметричном режиме и сами становятся источниками гармоник с номерами, кратными трем. Высокодобротные пассивные фильтры способны действовать только в стационарных или квазистационарных режимах, в условиях действия частых динамических возмущений они малоэффективны, поскольку становятся источниками слабозатухающих колебаний, препятствующих выполнению фильтрами своего функционального назначения. Устройство типа СТАТКОМ по схеме

Мустафа Г.М.,
к.т.н., научный
руководитель ООО
«НПП ЛМ Инвертор»

Гусев С.И.,
к.т.н., генеральный
директор ООО
«НПП ЛМ Инвертор»

Ключевые слова:

активная фильтрация, демпфирование, селективное подавление, баланс, несимметрия

Keywords:

active filtration, damping, selective suppression, balance, unbalance

SVC-Light [1] в принципе пригодно и для компенсации реактивной мощности, и для подавления несимметрии, однако из-за сравнительно низкой частоты широтно-импульсной модуляции оно не способно обеспечить эффективное решение задачи фильтрации гармоник.

Особую роль решение задачи нормализации качества напряжения имеет в сетях, прилегающих к ТРАССИБ и БАМ, где происходит нарушение качества электроэнергии по ряду показателей: колебаниям напряжения, несимметрии и искажениям формы напряжения. Периодические измерения в электрических сетях, питающих Транссибирскую магистраль, выявляют особо существенные нарушения нормативных требований по качеству электроэнергии по двум группам показателей [2, 3]:

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

Средние за сутки значения K_{2U} регулярно достигают 4,3%, а максимальные значения — 7,5% при нормально допустимом и предельно допустимом значениях в соответствии с ГОСТ, равными соответственно 2 и 4%. Средние за сутки значения K_U превышают нормально допустимое значение почти постоянно, достигая 9% при норме 2%. Максимальные значения K_U достигают 12,5% при предельно допустимом значении по ГОСТ — 3%.

В последнее время в связи с присоединением к транзиту 220 кВ промышленных потребителей с мощной двигательной нагрузкой произошел ряд технологических нарушений, связанных с отключением двигателей нефтеперекачивающих станций ООО «Востокнефтепровод», питающихся от шин ПС 220 кВ «Сковородино», вследствие действия защит из-за повышенной несимметрии напряжения питающей сети. ПАО «Транснефть» было вынуждено обратиться в надзорные и судебные органы по фактам нарушения требований к качеству электроэнергии. Однако из-за отсутствия правового регулирования контроля качества электроэнергии в России эти обращения не дали результата [3].

Решение задачи нормализации качества напряжения в этом регионе возможно путем реализации крупномасштабных проектов, таких как: строительство более мощного сетевого транзита вдоль железнодорожных магистралей, совершенствование парка электровозов с размещением фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) непосредственно на локомотивах, размещение мощных ФКУ вдоль существующих транзитов 220 кВ или на тяговых подстанциях железных дорог. Очевидным образом реализация таких проектов затруднительна из-за чрезмерно больших

затрат, поэтому для повышения качества напряжения у крупных потребителей электроэнергии и в населенных пунктах может оказаться достаточно эффективным путем использование локальных мероприятий с помощью активных фильтров.

О ПРИМЕНЕНИИ ПАСИВНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Для фильтрации высших гармоник в электрических сетях, в том числе в составе СТК, широкое применение нашли резонансные LC-фильтры. Однако высокочастотная LC-цепь эффективно шунтирует соответствующую сетевую гармонику в стационарных условиях. В условиях динамично меняющейся нагрузки, когда амплитуды или фазы сетевых гармоник изменяются, высокочастотные резонансные фильтры не способствуют и могут даже ухудшать ситуацию. Проведенное исследование эффективности действия резонансных LC-фильтров показывает, что при наличии 20%-ной амплитудной и фазовой модуляции нагрузки с периодом 55 мс резонансный фильтр действует неудовлетворительно, даже если его добротность понижена путем увеличения потерь мощности (рисунок 1). Достижимые в этом случае минимальные значения искажения напряжения равны: $\min A_{uf} \cong 5,6$ и $6,0\%$ — для напряжения и $\min A_{is} \cong 10,7$ и $11,9\%$ — для тока [4], при максимально допустимом уровне искажений напряжения в сети 6–10 кВ, равном 5% [5].

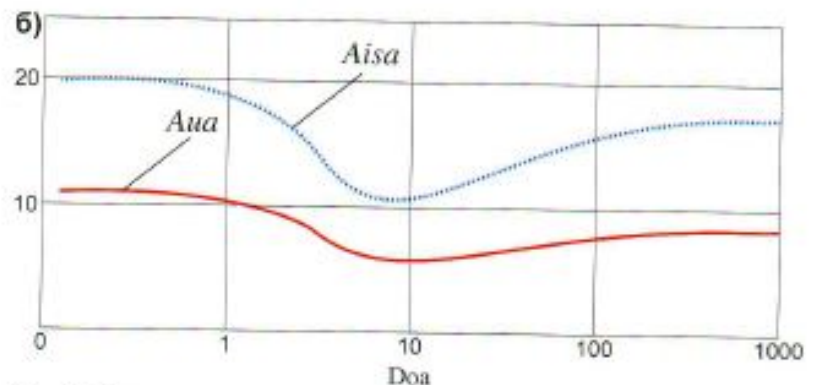
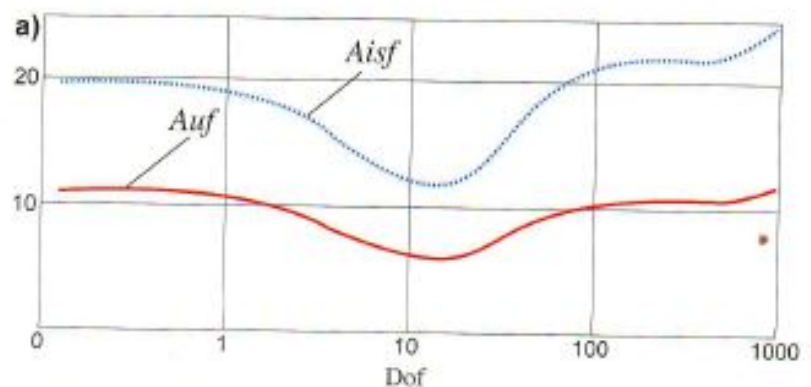


Рис. 1. Зависимость искажений напряжения $A_{u(\cdot)}$ и тока $A_{i(\cdot)}$ от добротности шунтирующей резонансной цепи $D_{o(\cdot)}$ при фазовой (а) и амплитудной (б) модуляции искажающего тока

МОДУЛЬНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И СИММЕТРИРОВАНИЯ

С развитием концепции модульных многоуровневых преобразователей (Modular Multilevel Converter — MMC) появилось адекватное техническое средство для осуществления активной фильтрации, симметрирования и компенсации на уровнях мощности электроэнергетических систем. Это определяется тем, что по своему интегральному действию в электрической сети MMC является широкополосным управляемым источником напряжения, усиливающим сигнал задания с высокой точностью. При этом сигнал задания может изменяться с высокой скоростью, в частности, он может содержать значительные по величине высшие гармоники. Выходное сопротивление MMC пренебрежимо мало в широком диапазоне частот. Даже при сильно искаженных быстроменяющихся токах исполнение задания MMC не нарушается. Представление MMC как идеального управляемого источника напряжения позволяет говорить о том, что высокочастотные следящие широтно-модулированные преобразователи, построенные на транзисторах типа IGBT, образуют новый класс широкополосных усилителей мощности, действие которых не сопровождается потерями энергии. Это отличает их от существующих типов усилителей, построенных на свойстве управляемых элементов изменять свое активное сопротивление (транзисторы, электронные лампы, СВЧ-приборы) под действием сигнала управления. Активный характер сопротивления таких элементов позволяет создавать усилители мощности с коэффициентом полезного действия не выше 50%. Способность осуществлять свои функции без активных потерь мощности (недиссипативность) усилителей на основе MMC позволяет создавать устройства большой мощности с высоким коэффициентом полезного действия, что открывает им дорогу в электроэнергетику.

Для приведения показателей качества напряжения в норму активное устройство должно выполнять три функции одновременно:

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

Для построения такой системы при решении прикладных задач развита инженерная методика — DSB-алгоритм управления MMC [6]. DSB-алгоритм базируется на традиционной «классической» теории управления и на теории трехфазных цепей. Идея DSB-алгоритма заключается в последовательном построении регуляторов трех типов: D — демпфирование (demp), S — селективное подавление (select), B — баланс (balance) и последующем совмещении их действий (рисунок 2).

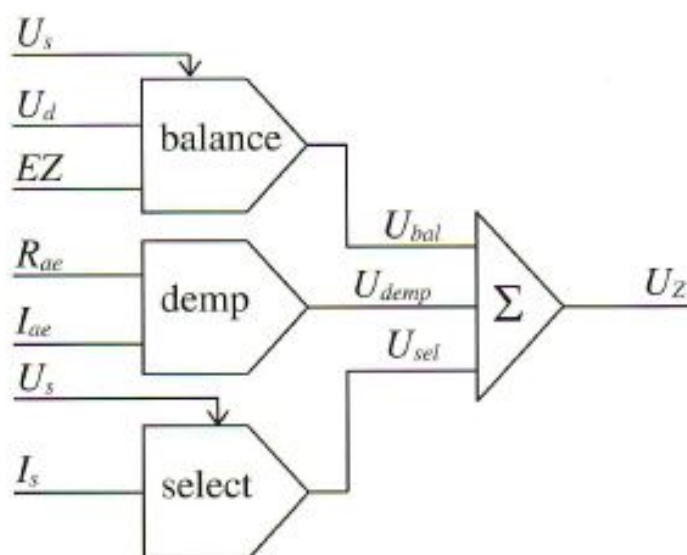


Рис. 2. Структура управления MMC по DSB-алгоритму

Задание напряжения $U_z(t)$ на входе усилителя мощности на основе MMC образуется как трехкомпонентная сумма:

$$U_z = U_{demp} + U_{sel} + U_{bal} \quad (1)$$

Каждый из компонентов образуется своими обратными связями и выполняет свою функцию в комплексе задач фильтрации.

Компонент D (демпфирование) образуется с помощью обратной связи по выходному току активного фильтра I_{ac} . Пропорциональная обратная связь по выходному току активного элемента

$$U_{demp}(t) = R_{ac} \cdot I_{ac}(t) \quad (2)$$

создает виртуальный демпфирующий резистор. Этот виртуальный резистор демпфирует переходные колебания сети не хуже, чем реальный резистор.

Компонент S (селективное подавление гармоник) образуется обратной связью по сетевому току I_s с участием в образовании этой связи напряжения сети U_s . Вычислитель селективного подавления select действует поверх компонента демпфирования demp и не нарушает демпфирования. Он осуществляет полное поглощение гармоник источника искажений компенсирующим устройством.

Компонент B (баланс) обеспечивает поддержание заданного напряжения на накопительных конденсаторах звеньев постоянного напряжения (DC) MMC и образуется обратной связью по напряжениям на конденсаторах с участием в этой обратной связи сетевого напряжения U_s . В качестве параметра регулирования используется энергия накопительных конденсаторов, которая поддерживается на заданном уровне.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ ДЕЙСТВИЯ DSB-АЛГОРИТМА

Действие DSB-алгоритма может быть продемонстрировано на примере активного фильтра типа АФС-6-2400 мощностью 2,4 МВА, на напряжение 6 кВ, внедренного ООО «НПП ЛМ Инвертор» на руднике «Октябрьский» ПАО ГМК «Норникель». На рисунке 3 показаны осциллограммы напряжения на шинах 6 кВ до включения (рисунок 3а) и после включения активного фильтра (рисунки 3б и 3в). Рисунок 3б иллюстри-

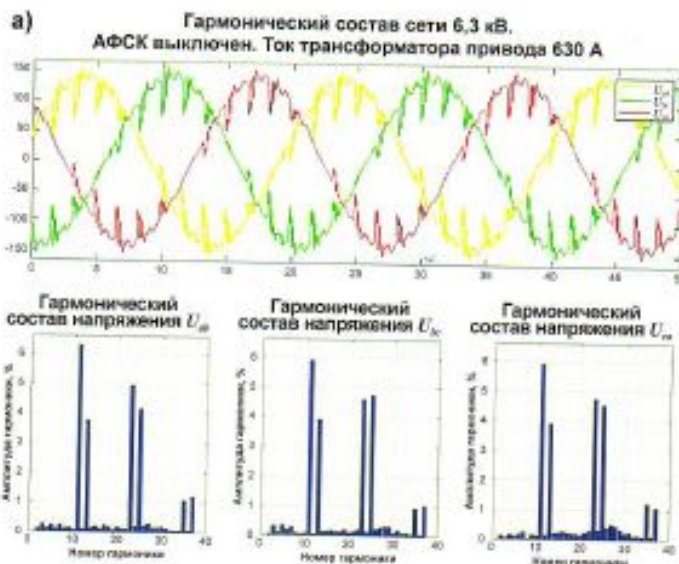


Рис. 3. Осциллограммы и спектры напряжений на шинах 6 кВ до (а) и после (б и в) включения активного фильтра

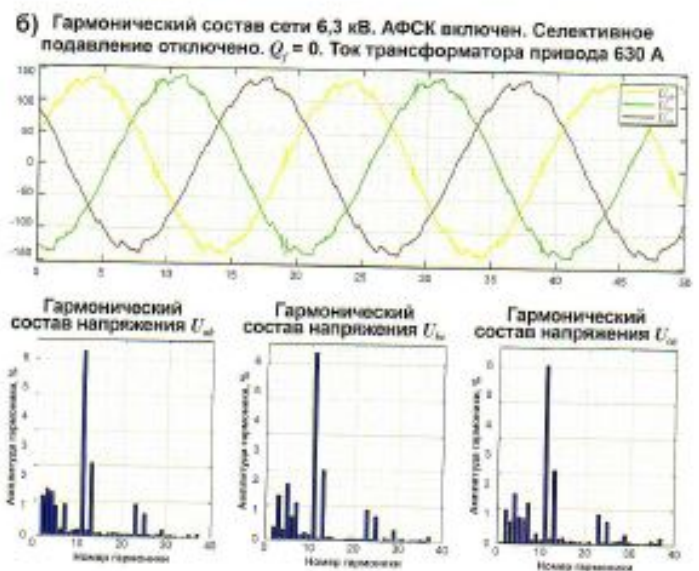
рует эффективность действия активного фильтра в режиме демпфирования при отсутствии селективного подавления гармоник. Рисунок 3в показывает действие активного фильтра в режиме демпфирования и селективной фильтрации 11-й и 13-й гармоник. До включения активного фильтра уровень 11-й гармоники превышал 6%, после включения максимальный уровень гармоник напряжения не превышает 1%.

Схемы ММС имеют высокую частоту модуляции выходного напряжения, кратную произведению частоты коммутации транзисторов на число модулей, что позволяет осуществить создание активных фильтров, обеспечивающих селективное подавление практически любых гармоник — от 3 до 49, мощностью в несколько десятков мегаватт.

ШУНТОВОЕ ИЛИ СЕРИЕСНОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРОСИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА (АФСУ)

Для осуществления симметрирования и фильтрации напряжения отходящих линий может быть применено либо шунтовое (рисунок 4), либо серийное (рисунок 5) присоединение АФСУ к электрической сети.

Модульный многоуровневый конвертор может в принципе функционировать как в одном, так и другом варианте присоединения. При шунтовом присоединении АФСУ работает при приложенном к нему синусоидальном напряжении прямой последовательности; искажающие составляющие, то есть обратная составляющая напряжения и напряжения высших гармоник устраняются действием АФСУ. Ток АФСУ при этом состоит из искажающих составляющих, то есть обратной составляющей тока и высших гармоник тока. Действует шунтирующий АФСУ посредством создания соответствующего падения напряжения на суммарном реактансе сети в точке присоединения, который складывается из реактанса короткого замыкания сети, реактанса понижающего автотрансформатора 220/110 кВ и реактанса дополнительного токоограничивающего реактора, который может быть



в) Гармонический состав сети 6,3 кВ, АФСУ включен. Селективное подавление 11-й и 13-й гармоник включено. $Q_f = \text{auto}$. Ток трансформатора привода 600 А

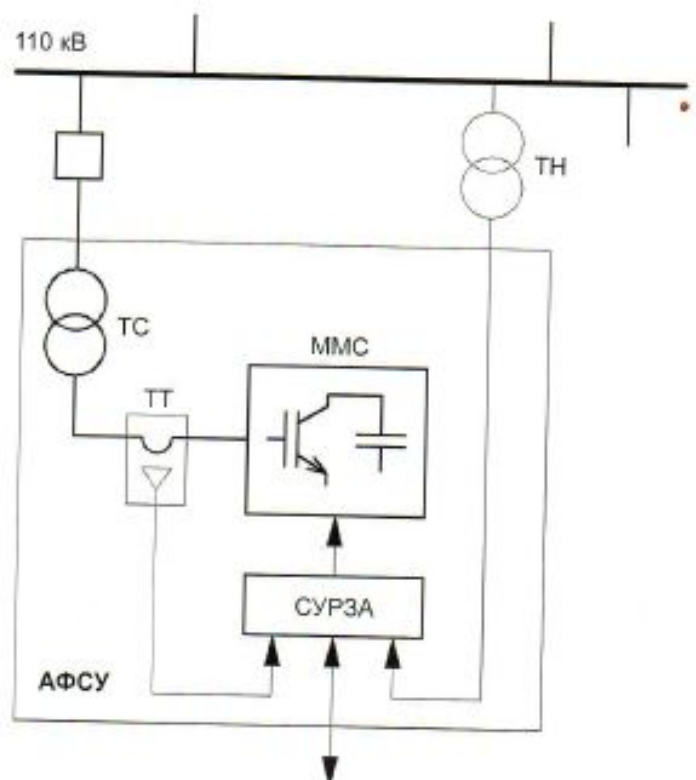
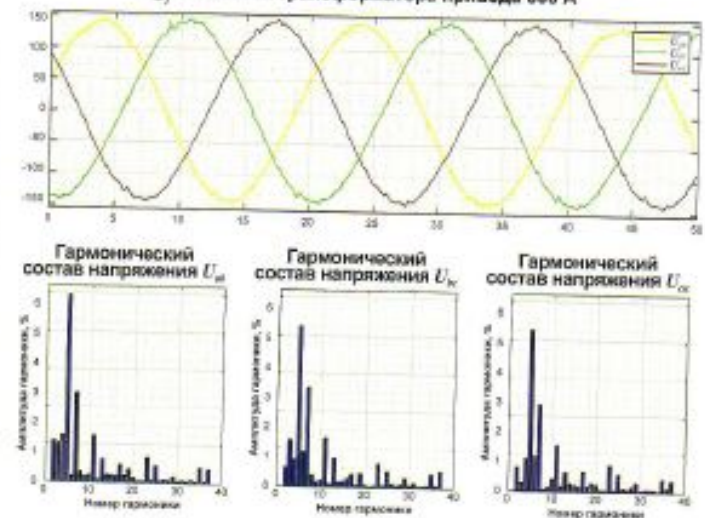


Рис. 4. Шунтовое присоединение АФСУ к сети

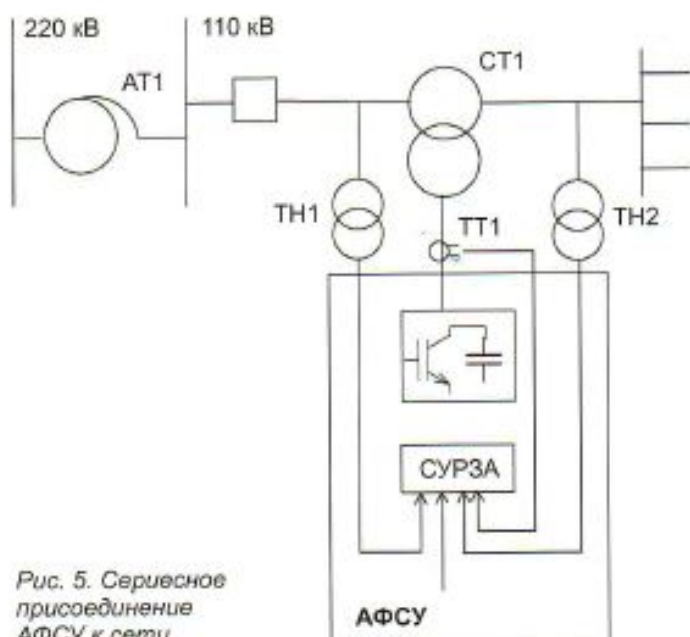


Рис. 5. Серийное присоединение АФСУ к сети

применен для повышения эффективности шунтирующего АФСУ при действии искажений, поступающих из сети. Основная часть ресурса шунтирующего АФСУ расходуется на поглощение обратной составляющей тока и на наиболее низкочастотную из высших гармоник (третью гармонику); для высших гармоник тока ограничивающее сопротивление увеличивается пропорционально номеру гармоники, и вклад высших гармоник в нагрузку АФСУ получается незначительным. Таким образом, при шунтирующем присоединении АФСУ работает при синусоидальном прямо вращающемся трехфазном напряжении и при незначительно искаженном обратно вращающемся токе.

При серийном присоединении АФСУ включается через согласующий трансформатор в рассечку между искаженной сетью и отходящими линиями. Для работы в аварийных и аномальных режимах при серийном присоединении АФСУ должен быть оснащен тиристорным ключом, шунтирующим обмотки согласующего трансформатора и обеспечивающим беспрепятственное протекание токов при коротком замыкании. Действие серийного АФСУ заключается в том, что искажающим составляющим сетевого напряжения противопоставляются такие же составляющие напряжения АФСУ. Искажения напряжения на отходящих линиях при этом снижаются. Нагрузки отходящих линий существенных искажающих факторов не имеют, поэтому ток

отходящих линий при нормальном питании синусоидальный, прямо вращающийся. Ток серийного АФСУ совпадает с этим током и является синусоидальным прямо вращающимся. Напряжение серийного АФСУ складывается из одних только искажающих составляющих:

- напряжения обратной последовательности;
- напряжений высших гармоник.

Сетевой реактанс на нормальные режимы серийной схемы не влияет. В серийной схеме основная часть ресурса мощности АФСУ тратится на подавление высших гармоник; на симметрирование тратится лишь небольшая часть ресурса. Здесь еще раз проявляется разница между шунтирующей и серийной схемой. В шунтирующей схеме, напротив, — из-за большой проводимости сети для гармоник сетевой частоты приходится создавать большой ресурс на ток обратной последовательности, поглощаемый АФСУ.

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА СИММЕТРИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИСОЕДИНЕНИЙ И СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Активные ветви ММС, которые состояются из транзисторно-конденсаторных модулей, могут действовать как управляемые реактивные цепи, которые по задаваемому сигналу могут изменять свою проводимость от номинальной индуктивной до номинальной емкостной проводимости с промежуточной точкой нулевой проводимости. Это позволяет использовать непрерывно регулируемые реактивные ветви как для компенсации реактивной мощности, так и для симметрирования трехфазных сетей. В 1905 году Стайнметц показал [7], что при использовании должным образом подобранных реактивных ветвей междуфазная (однофазная) нагрузка может быть симметрирована так, чтобы из сети с трехфазным симметричным напряжением потреблялся симметричный трехфазный ток. Из теории Стайнметца очевидным образом следует, что с помощью тройки управляемых реактивных ветвей может быть устранена любая несимметрия трехфазной сети.

Существует ряд схем преобразователей, на основе которых возможно создание активных фильтро-симметрирующих устройств: двух- и трехуровневая мостовые схемы, модульные многоуровневые — схема цепочечного СТАТКОМ [8] на рисунке 6, полу-

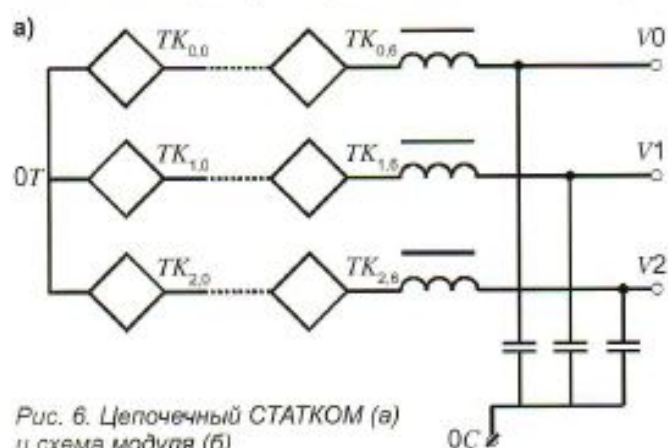


Рис. 6. Цепочечный СТАТКОМ (а) и схема модуля (б)

чаемая соединением трех активных фазных ветвей, каждая из которых составлена из нескольких последовательно соединенных транзисторно-конденсаторных модулей, соединяемых в схему звезды (Y-схема) или треугольника (D-схема), и схема Марквардта (рисунок 7, [9]).

Во всех преобразователях, присоединяемых к сети для компенсации реактивной мощности, локально-усредненная мощность конденсаторов DC, а с ней локально-усредненная мощность AC являются нулевыми. Это не мешает осуществлению функций фильтрации высших гармоник и компенсации реактивной мощности. Не мешает оно и осуществлению функции симметрирования, но последняя вносит свои особенности. При работе АФСУ в режиме симметризатора имеет место основная альтернатива:

- для серийного варианта присоединения АФСУ ток является прямо вращающимся, а напряжение — обратно вращающимся;
- для шунтового варианта присоединения АФСУ напряжение является прямо вращающимся, а ток — обратно вращающимся.

В обоих случаях суммарная по фазам мощность является нулевой. Однако нулевой является сумма фазных мощностей обратной последовательности, но не мощность каждой из фаз. Поэтому в схемах АФСУ, в которых отсутствует межфазный обмен энергией, при соединении фазных ветвей и в треугольник (схема D), и в звезду (схема Y) баланс мощностей звена постоянного тока (DC) должен быть обеспечен дополнительными мерами.

В D-схеме таких АФСУ для обеспечения баланса мощности в каждой из фаз при подавлении несимметрии необходимо создать в треугольнике фазных ветвей циркулирующий ток, обеспечивающий сдвиг между током и напряжением каждой фазы, равный 90° . Фазные токи первой гармоники АЭ получают дополнением к прямо или обратно вращающейся составляющей тока АЭ $i_{ar1m}(t)$ еще и тока циркуляции $i_{ar3v}(t)$:

$$i_{ar1}(t) = i_{ar1m}(t) + i_{ar3v}(t). \quad (3)$$

Активная мощность фаз при этом будет равна нулю. Принципиально важно, что наибольшая амплитуда фазного тока в одной из фаз активного элемента I_{ar} в режиме подавления обратной последовательности из-за действия циркулирующего тока может достигать двукратной величины по сравнению с амплитудой протекающего по фазам сетевого тока I_{gr} :

$$\max |I_{ar}| = 2 \cdot I_{gr} \quad (4)$$

Остальные две фазы АФСУ в точках максимума загружены только наполовину. Однако в силу случайного характера изменения напряжения обратной последовательности все три фазы АФСУ при работе в качестве симметризатора должны быть рассчитаны на двойной сетевой ток. Это неустранимый органический дефект D-схем АФСУ как серийной, так и шунтирующей. Он органически присущ также и Y-схемам, только в них вместо двойного тока фазные ветви должны быть рассчитаны на двойное напряжение, возникающее за счет смещения нейтрали, также необходимого для обеспечения баланса

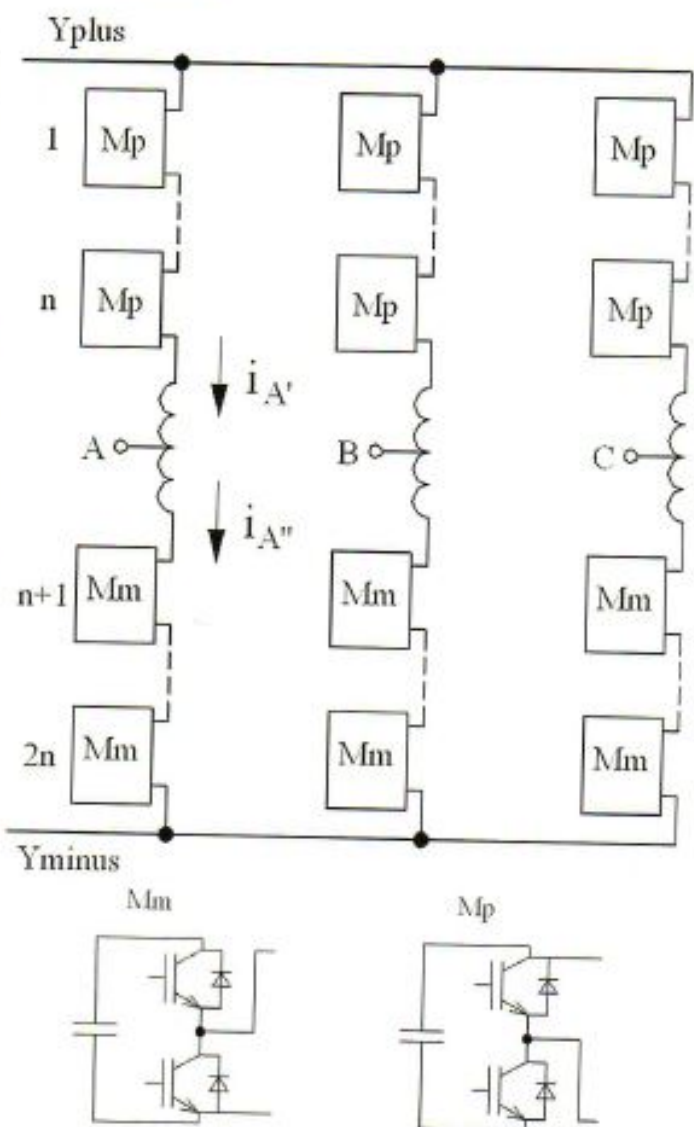


Рис. 7. Модульная многоуровневая схема Марквардта [9]

мощности. Обобщая, можно отметить: всем схемам АФСУ, не имеющим прямого обмена энергией фазных конденсаторов постоянного тока, при работе в режиме симметризатора присущ органический дефект — для обеспечения баланса энергий конденсаторов фаз в них должен быть предусмотрен двойной запас по установленной мощности; в случае D-схем — по току, а в случае Y-схем — по напряжению.

Таким образом, для создания симметрирующих устройств наиболее эффективны схемы, в которых имеет место межфазный обмен энергией — трехфазные схемы с общим конденсаторным накопителем постоянного тока, объединяющим трехфазные вентильные группы, то есть по существу — трехфазные мостовые схемы.

На рисунке 8 приведена классификация конверторов, предназначенных для фильтрации, компенсации, симметрирования. Конверторы разделены на консолидированные и неконсолидированные схемы. Консолидированные схемы — суть те, в которых конденсаторы постоянного напряжения трех фаз объединены и обмениваются мощностями, поступающими из фаз сети. К ним относятся трехфазная мостовая схема, трехфазная трехуровневая мостовая схема. В неконсолидированных схемах

подвешенные конденсаторы DC разных фаз не имеют прямых связей и обмениваться мощностями напрямую не могут. К неконсолидированным схемам относятся модульные многоуровневые — схема цепочечного СТАКОМ и схема Марквардта.

Несмотря на имеющееся фундаментальное преимущество консолидированных схем для решения проблемы симметрирования, вопрос выбора схемы однозначно не решается. Необходим учет совокупности факторов. Модульные многоуровневые схемы с неконсолидированными конденсаторами DC имеют свои преимущества:

- позволяют получать требуемые в электроэнергетике высокие уровни напряжений;
- позволяют получить умножение частоты модуляции и деление скачка модуляции, обеспечивая тем самым широкую полосу частот регулирования и облегчение силового фильтра ШИМ-пульсаций.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АФСУ В СМЕШАННОМ РЕЖИМЕ СИММЕТРИРОВАНИЯ/ФИЛЬТРАЦИИ

Для неконсолидированных схем режим симметрирования является особым в сравнении его с двумя другими элементами триады подавления сетевых искажений: «компенсация — фильтрация — симметрирование». Для симметрирования требуется удвоение установленной мощности активных фазных ветвей, которое порождается необходимостью обеспечения баланса энергии конденсаторов постоянного напряжения фаз, не связанных друг с другом. Ни для компенсации реактивной мощности, ни для фильтрации такое удвоение не требуется.

Для D-схемы шунтового варианта АФСУ требуемые максимальные значения напряжений и токов активных фазных ветвей $U_{oc, max}$, $I_{oc, max}$ определяются равенствами:

$$\begin{cases} U_{oc, max} = U_1, \\ I_{oc, max} = 2 \cdot I_{1, max} + I_{h, max}, \end{cases} \quad (5)$$

где U_1 — напряжение сети; $I_{1, max}$ — наибольший ток обратной последовательности; $I_{h, max}$ — наибольший ток гармоник, которые должен создать АФСУ.

Здесь удваивается только одна составляющая тока $I_{1, max}$. Это дает D-схеме преимущество перед Y-схемой в смешанном применении симметрирования/фильтрации, где требуемые напряжения и токи активных фазных ветвей $U_{oc, max}$, $I_{oc, max}$ определяются равенствами:

$$\begin{cases} U_{oc, max} = 2 \cdot U_1, \\ I_{oc, max} = I_{1p} + I_{h, max}, \end{cases} \quad (6)$$



Рис. 8. Классификация конверторов, предназначенных для фильтрации, компенсации, симметрирования

Чем больше гармоническая составляющая напряжения должна быть скомпенсирована, тем больше преимущество D-схемы перед Y-схемой соединения фазных ветвей активного элемента.

Именно такая ситуация имеет место в проекте создания АФСУ для ПС «Сковородино». Требуемая сумма, определяемая данными измерениями,

$$I_{1n, max} + I_{h, max}$$

должна составлять в относительных единицах не менее чем 0,18 для осуществления требуемого подавления искажений. На долю составляющей $I_{1n, max}$ при этом приходится около 0,04. Таким образом в условиях проекта АФСУ для ПС «Сковородино» затраты на активные фазные ветви характеризуются такими показателями:

$$\begin{aligned} \frac{U_{oc, max} \cdot I_{oc, max}}{U_{oc, max} \cdot I_{oc, max}} &\approx 0,18 \times 2 = 0,36 \text{ — для Y-схемы АФСУ,} \\ \frac{U_{oc, max} \cdot I_{oc, max}}{U_{oc, max} \cdot I_{oc, max}} &= (2 \times 0,04 + 0,14) \cdot 1 = 0,22 \text{ — для D-схемы АФСУ.} \end{aligned}$$

Использование D-схемы в проекте АФСУ для ПС «Сковородино» имеет явные преимущества. Однако при этом удвоение тока обратной последовательности в активных ветвях приводит к существенному увеличению пульсаций напряжения на конденсаторах DC, что требует существенного увеличения их емкости по отношению к требуемой только для компенсации высших гармоник.

ВЫВОДЫ

1. Эффективным путем решения задачи нормализации качества напряжения у крупных потребителей электроэнергии и в населенных пунктах в районах, прилегающих к ТРАНССИБ и БАМ, где происходит нарушение качества электроэнергии по ряду показателей (колебаниям напряжения, несимметрии и искажениям формы напряжения) является использование активных фильтро-симметрирующих устройств на основе модульных многоуровневых преобразователей напряжения.

2. Высокочастотные следящие широтно-модулированные преобразователи, построенные на транзисторах типа IGBT, образуют новый класс широкополосных усилителей мощности, действие которых не сопровождается потерями энергии. Способность осуществлять свои функции без активных потерь мощности (недиссипативность) усилителей на основе MMC позволяет создавать энергетические устройства большой мощности с высоким коэффициентом полезного действия, обеспечивающие нормализацию показателей качества напряжения сетей (в динамичном режиме, когда уровень искажений быстро изменяется):
 - уровня напряжения;
 - симметрии напряжения (подавление обратной составляющей напряжения);
 - уровня высших гармоник напряжения.
3. По условию использования активных фильтрокомпенсирующих устройств для симметрирования напряжения трехфазной электрической сети

высокочастотные следящие широтно-модулированные преобразователи подразделяются на два класса: преобразователи, имеющие межфазный обмен мощностью (консолидированные схемы) и преобразователи, в которых межфазный обмен мощностью отсутствует (неконсолидированные схемы). Установленная мощность активных симметрирующих устройств, построенных на основе неконсолидированных схем, вдвое превышает мощность, необходимую для симметрирования с использованием консолидированных схем. При этом модульные многоуровневые схемы с неконсолидированными конденсаторами DC имеют свои преимущества:

- позволяют получать требуемые в электроэнергетике высокие уровни напряжений;
- позволяют получить умножение частоты модуляции и деление скачка модуляции, обеспечивая тем самым широкую полосу частот регулирования и облегчение силового фильтра ШИМ-пульсаций. *

ЛИТЕРАТУРА

1. Bijlenga B., Grünbaum R., Johanson T. SVC Light — a powerful tool for power quality improvement // ABB Review, 1998, № 6, pp. 21–30.
2. О результатах исследований качества электроэнергии на подстанции «Сковородино» (МЭС Востока, Амурское ПМЭС) / Отчет компании RTSOFT, М., 2011. 124 с.
3. Павленко С.В. Проблемы качества электроэнергии при эксплуатации объектов ПАО «Транснефть» / Доклад на Научно-практической конференции «Современные средства обеспечения качества электроэнергии (КЭ) в электрических сетях и у потребителя», 7 декабря 2017 г., Москва. URL: <http://cis-ees.ru/RUM/eMagazine/Articles/Details/1040>.
4. Мустафа Г.М., Гусев С.И. Фильтрация высших гармоник в электрических сетях при динамично меняющихся условиях // Энергия единой сети, 2017, №4. С. 44–52.
5. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 стр.
6. Мустафа Г.М., Гусев С.И. Активные фильтро-симметрирующие устройства для электроэнергетики. Теоретические и прикладные аспекты использования. LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 114 с.
7. Steinmetz C.P. Теоретические основания электротехники сильных токов. Перевод с немецкого издания, просмотренного автором, инж. Н.А. Жданова. С.-Петербург, 1905.
8. Schauder C., Gernhardt M., Stacey E., Lemak T., Gyugyi L., Cease W.T., Edris, A. Development of a ± 100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, vol. 10, no. 3, pp.1486–1496.
9. Marquardt R., Lesnicar A. New Concept for High Voltage - Modular Multilevel Converter, IEEE PESC 2004, Aachen, Germany, June 2004.

REFERENCES

1. Bijlenga B., Grünbaum R., Johanson T. SVC Light — a powerful tool for power quality improvement // ABB Review, 1998, № 6, pp. 21–30.
2. On the results of power quality research at "Skovorodino" substation (MES East, Amur PMES). RTSOFT company report. Moscow, 2011. 124 p. (in Russian)
3. Pavlenko S.V. *Problemy kachestva elektroenergii pri ekspluatatsii obyektov PAO "Transneft"* (Pavlenko S.V. Power quality problems when operating PJSC "Transneft" facilities). Available at: <http://cis-ees.ru/RUM/eMagazine/Articles/Details/1040> (accessed August 10, 2018).
4. Mustafa G.M., Gusev S.I. Higher harmonics filtration under dynamically changing conditions in electrical networks. *Energiya edinoj seti* [Energy of unified grid], 2017, no. 4, pp. 44–52. (in Russian)
5. State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p. (in Russian)
6. Mustafa G.M., Gusev S.I. *Aktivnyye filtro-simmetrirovuyushchiye ustroystva dlya elektroenergetiki. Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty ispolzovaniya* [Active filter-balancing devices for electric power industry. Theoretical and practical aspects of application]. LAP Publ., 2016. 114 p.
7. Steinmetz C.P. *Teoreticheskiye osnovaniya elektrotekhniki silnykh tokov. Perevod s nemetskogo izdaniya* [Theoretical bases of high current electrical engineering. Translation from German by Zhdanov N.A.]. St. Petersburg., 1905.
8. Schauder C., Gernhardt M., Stacey E., Lemak T., Gyugyi L., Cease W.T., Edris, A. Development of a ± 100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 1486–1496.
9. Marquardt R., Lesnicar A. New Concept for High Voltage - Modular Multilevel Converter, IEEE PESC 2004, Aachen, Germany, June 2004.