

Расчёт мощности активного фильтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сковородино

- Мустафа Г. М., канд. техн. наук, ФГУП “Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина”, Москва
- Гусев С. И.¹, канд. техн. наук, ФГУП “Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина”, Москва
- Ершов А. М., ФГУП “Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина”, Москва
- Сеннов Ю. М., ФГУП “Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина”, Москва
- Архипов И. Л., ОАО “Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы”, Москва
- Горюшин Ю. А., ОАО “Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы”, Москва
- Шамонов Р. Г., канд. техн. наук, ОАО “Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы”, Москва
- Демчук С. П., ООО “НПП ЛМ Инвертор”, Москва

Приведены результаты расчёта мощности активного фильтра, выполненного по схеме многоуровневого преобразователя напряжения, для обеспечения нормативных требований по качеству электроэнергии на подстанции 220 кВ Сковородино, напряжение на шинах которой искажено действием электровозов, потребляющих однофазный несинусоидальный ток. Показано, что для обеспечения нормативных показателей по несимметрии напряжений по обратной последовательности, искажению синусоидальности кривой напряжения и коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения возможно использование активного фильтра высших гармоник мощностью 16 Мвар, разработанного и изготовленного по заказу ОАО “ФСК ЕЭС” в 2012 г. и испытанного в 2013 г.

Ключевые слова: модульный многоуровневый преобразователь напряжения, коэффициенты искажения, симметрирование, селективная фильтрация.

Периодические измерения в электрических сетях, питающих Транссибирскую магистраль, выявляют существенные нарушения нормативных требований по качеству электроэнергии (КЭ) по двум группам показателей:

коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;

коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Средние за сутки значения K_{2U} регулярно достигают 3 – 4%, а максимальные значения – 6 – 7% при нормально допустимом и предельно допустимом значении по ГОСТ 32144-2013, равном соответственно 2 и 4% [1]. Средние за сутки значения K_U превышают нормально допустимое значение 2% почти постоянно, достигая 5 – 6%. Максимальные значения K_U достигают 8 – 9% при предельно допустимом значении по ГОСТ 3%.

Особую актуальность проблема приведения качества напряжения к нормативным требованиям приобрела в последнее время в связи с присоединением к транзиту 220 кВ промышленных потребителей с мощной двигательной нагрузкой. Произошёл ряд технологических нарушений, связан-

ных с отключением двигателей нефтеперекачивающих станций ООО “Востокнефтепровод”, питающихся от шин ПС 220 кВ Сковородино, вследствие действия защит из-за повышенной несимметрии напряжения питающей сети.

Устройство для приведения показателей качества напряжения в норму должно выполнять одновременно две функции:

симметрировать напряжение (подавлять составляющую обратной последовательности напряжения);

фильтровать высшие гармоники напряжения в динамичном режиме, когда источник гармоник быстро изменяется.

Выполнять эти функции традиционные устройства не могут. Система статических тиристорных компенсаторов (СТК) с пассивными фильтрами удовлетворительно работает только в симметричном режиме при не слишком быстро меняющихся высших гармониках. При работе в несимметричном режиме сама тиристорно-реакторная группа становится источником гармоник с номерами 3, 9, ... и быстрому демпфированию скорее препятствует. Пассивные фильтры в условиях действия частых динамических возмущений малоэффективны. Устройство СТАТКОМ по схеме SVC-Light [2] в принципе пригодно для подавле-

¹ Гусев Станислав Иванович: gusev-si@vei.ru

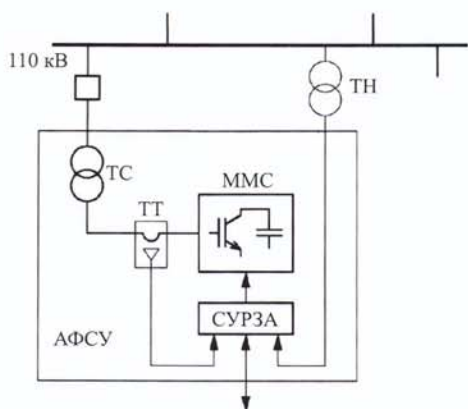


Рис. 1. Упрощённая структурная схема подключения АФСУ

ния несимметрии. Однако из-за сравнительно низкой частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ, около 600 Гц) оно не способно обеспечить решение второй части задачи – фильтрацию. По результатам выполненных измерений фильтрация нужна до частот 9 – 11-й гармоник (450 – 550 Гц), для чего частота ШИМ должна составлять 3,3 – 5,0 кГц.

Использование модульного многоуровневого ШИМ-преобразователя (Modular Multilevel Converter – ММС [3, 4]) позволяет осуществить активную фильтрацию, симметрирование и компенсацию на уровнях мощности электроэнергетических систем.

В ММС эквивалентная частота ШИМ равна произведению числа модулей фазы на частоту ШИМ одного модуля. Даже при умеренном числе модулей и невысокой частоте ШИМ одного модуля без труда достигаются требуемая эквивалентная частота ШИМ и требуемая ширина полосы пропускания частот. Именно устройство активной фильтрации и симметрирования (АФСУ) на базе модульного многоуровневого преобразователя целесообразно применить на подстанциях транзита 220 кВ в точках присоединения потребителей с мощной двигательной нагрузкой.

Схема замещения и алгоритм действия АФСУ. Шины 110 кВ ПС Сковородино питаются от двух автотрансформаторов 220/110 кВ мощностью 63 МВ·А каждый. Шунтирующее АФСУ предполагается присоединить к шинам 110 кВ через согласующий трансформатор с относительно небольшим напряжением короткого замыкания (КЗ). Упрощённая структурная схема подключения предлагаемого устройства представлена на рис. 1, где ММС – модульный многоуровневый преобразователь; ТС – согласующий трансформатор; СУРЗА – система управления, регулирования и защиты; ТТ и ТН – датчики тока и напряжения.

Схема замещения для расчёта АФСУ, приведённая к уровню 220 кВ, изображена на рис. 2. Узел F соответствует шинам 220 кВ подстанции, а

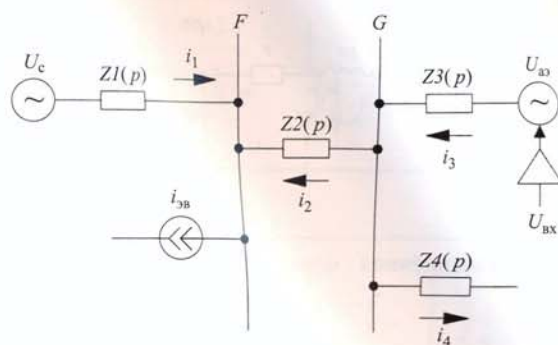


Рис. 2. Расчётная схема замещения, приведённая к уровню сетевого напряжения

узел G – шинам 110 кВ. Узлы F, G связаны через сопротивление короткого замыкания автотрансформаторов Z2 (индуктивное сопротивление короткого замыкания $x = 11\% = 84,5 \text{ Ом}$). Сопротивление Z1 и источник U_c отображают схему замещения и ЭДС сети. Действие искажающего тока электровозов отображено в схеме источником $i_{эв}$, присоединённым к узлу F. Отходящие линии 110 кВ представлены двухполюсником Z4. Активная фильтросимметрирующая установка состоит из модульного многоуровневого конвертора ММС, отображаемого управляемым источником (активным элементом) $U_{аз}$, и согласующего трансформатора, который отображён в схеме замещения своим сопротивлением короткого замыкания Z3(p) ($x_3 \approx 121 \text{ Ом}$).

Для решаемой здесь задачи достаточно представления ММС как управляемого источника напряжения $U_{аз}$, который воспроизводит на силовом выходе напряжение, равное получаемому им заданию на информационном входе:

$$U_{аз}(t) = U_{вх}(t). \quad (1)$$

Сигнал задания $U_{вх}(t)$ может изменяться с высокой скоростью, в частности, он может содержать значительные по величине высшие гармоники. При этом задание точно воспроизводится на силовом выходе ММС. Выходное сопротивление ММС ничтожно мало в широком диапазоне частот. Даже при вливании в ММС сильно искажённых быстроменяющихся токов исполнение задания (1) не нарушается. Это прямо следует из построения ММС и подтверждено выполненными испытаниями опытного образца активного фильтра высших гармоник ММАФ-16к-600 мощностью 16 Мвар, разработанного по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» в 2011 – 2012 гг., который прошёл стендовые и заводские испытания на ОАО «Электровыпрямитель» в конце 2013 г.

Используемая в расчётах Т-образная схема замещения сети представлена на рис. 3. Сопротивления x с учётом межфазных взаимоиндуктивностей определяются токами трёхфазного и однофазного замыкания. Ток трёхфазного КЗ шин 220 кВ под-

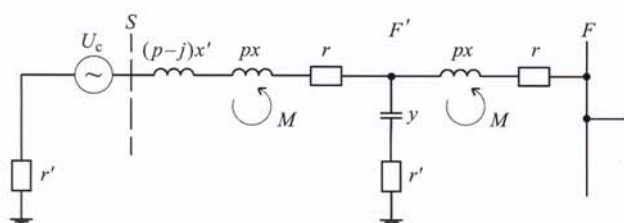


Рис. 3. Упрощённая однолинейная схема замещения сети

станции составляет в наиболее тяжёлых условиях 3,05 кА, ток однофазного КЗ несколько больше – 3,47 кА. Эти величины характеризуют поведение составляющей прямой последовательности трёхфазной системы. Индуктивное сопротивление x' отображает увеличение сопротивления для тока обратной последовательности. Сопротивления для составляющей обратной последовательности в системе, содержащей вращающиеся электрические машины, несколько выше, чем сопротивления для прямой последовательности, поскольку индуктивность рассеяния роторов для обратной последовательности действует с множителями $(2-s)$, тогда как для составляющих прямой последовательности она действует с множителем s , где s – скольжение [5].

Этот эффект на рис. 3 отображён вынесенным эквивалентным индуктивным сопротивлением роторов x' , который действует при отображении в операторной форме как $(p-j)x'$. Вносимое увеличение сопротивления для составляющей обратной последовательности – около 30%. [Величина $(p-j)x$ отображает применённую методику анализа системы с использованием комплексной системы дифференциальных уравнений. Переход от фазных токов к сумме симметричных составляющих осуществлялся в настоящей работе в три шага. Первый шаг – переход от трёхфазной косоугольной системы координат a, b, c к ортогональным координатам d и q с помощью преобразования Парка. Второй шаг – это комплексификация, т.е. переход от пары вещественных переменных по осям d, q к одной комплексной переменной

$$x = xd + jxq. \quad (2)$$

Последний шаг – алгебраическое преобразование синусоид в сумму комплексных экспонент].

Расчётная амплитудно-частотная характеристика сопротивления сети 110 и 220 кВ $Z_{\text{сети}}(f)$ построена на рис. 4. Учитываются только существенные резонансы сети в диапазоне частот $\pm 20f_{\text{сети}}$, где $f_{\text{сети}} = 50$ Гц. Частоты симметричных составляющих принимают как положительные, так и отрицательные значения. Соответственно график $Z_{\text{сети}}(f)$ построен в диапазоне частот $\pm 20f_{\text{сети}}$. Отрицательная и положительная полови-

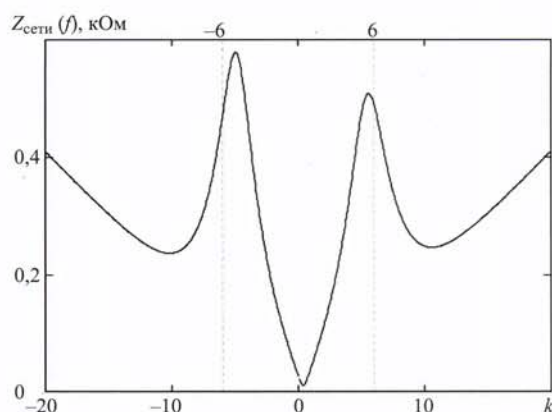


Рис. 4. Расчётная амплитудно-частотная характеристика сети при токе короткого замыкания 3,05 кА:

k – номер гармоники тока

ны графика несколько различаются согласно ранее указанному.

Под действием тока тяговой сети $i_{\text{эв}}(t)$ напряжение узла F искажается из-за составляющей обратной последовательности этого тока и его высших гармонических. Оба эти вида искажений передаются далее на узел G . Задачей активной филтросимметрирующей установки является устранение искажений напряжения узла G . Это осуществляется по разработанному и проверенному при испытаниях активного фильтра типа ММАФ-16к-600 DSB-алгоритму селективного подавления искажающих гармоник (D – демпфирование; S – селективная фильтрация; B – баланс). DSB-алгоритм обеспечивает то сочетание быстрого демпфирования и интенсивного подавления гармоник (в том числе гармоники с номером минус 1 – обратной последовательности), которое способно эффективно выполнять поставленную задачу при воздействии на сеть таких динамичных потребителей, как мощные электровозы переменного тока.

Напряжение основной гармоники активного элемента $U_{\text{ав}}(t)$ устанавливается таким, чтобы основная гармоника тока прямой последовательности $i_{\text{ав}}(t)$ была равна нулю. Далее к заданию напряжения $U_{\text{вх}}(t)$ для каждой из селективно-подавляемых гармоник примешивается соответствующая гармоника, действующая в противофазе с источником искажения и устраняющая эту гармонику в узле G . В результате на выходе активного элемента устанавливается напряжение, содержащее в дополнение к основной гармонике набор селективно-подавляемых гармоник. Комплексные амплитуды гармоник активного элемента (модули и фазы) подбираются так, чтобы напряжения искажающих гармоник в узле G становились нулевыми или ограниченными нормативными требованиями [1]. При этом из активного элемента вытекает ток, гармоники которого равны гармоникам тока, вытекающего из узла G в узел F .

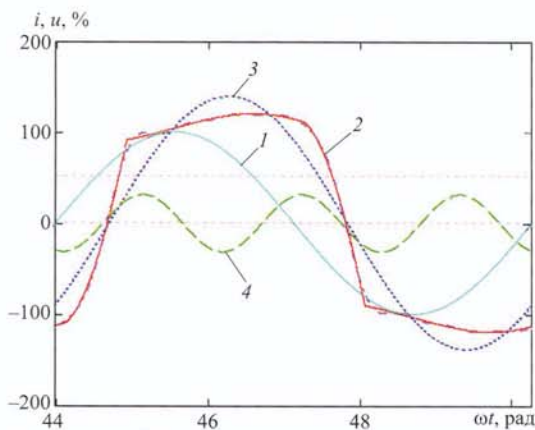


Рис. 5. Ток однофазного выпрямителя электровоза $i_{эв}$ и напряжение фазы A :

1 – напряжение фазы A ; 2 – ток электропровода $i_{эв}$; 3 – ток основной гармоники $i_{эв1}$; 4 – ток третьей гармоники $i_{эв3}$

Искажающая нагрузка. Тяговые приводы электровозов переменного тока [6] содержат на сетевом входе выпрямители и потребляют из контактной сети однофазный трапециевидный ток, содержащий кроме основной гармоники искажающие высшие гармоники:

$$i_{эв}(A) = \sqrt{2}I_{эво} [\cos(\theta - \varphi_0) + \sum_k A_k \cos(m_k \theta - \varphi_k)], \quad (3)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$; $m_k = 2k + 1$ – порядок гармоники; $I_{эво}$ – эффективное значение основной гармоники тока; φ_k – фаза гармоники; $A_k = I_k / I_{эво}$ – относительное значение тока k -й гармоники I_k ; $\theta = \omega t$.

На рис. 5 представлена форма потребляемого выпрямителем тока $i_{эв}$ при номинальной нагрузке.

Потребляемый электровозами однофазный ток поступает в сеть через трансформаторы тяговых подстанций, соединённые по схеме звезда – треугольник, и распределяется между фазами сети в пропорции $2/3, -1/3, -1/3$ (рис. 6).

Для уменьшения составляющей обратной последовательности в схеме тяговой сети предусматривается чередование фаз со сдвигом 60° напряжений соседних дистанций контактной сети [7]. На рис. 6 показано, что за дистанцией “а”, запитываемой от фазы A , следует дистанция “с”, запитываемая от фазы C . Следующая влево дистанция запитывается напряжением фазы B . В идеальном случае при равных в точности потреблении с трёх соседних дистанций составляющие обратной последовательности их взаимно компенсировались бы. В реальных условиях, при несовпадающем потреблении с разных дистанций и неидеальной связи по линии 220 кВ, при суммировании токов тяговых подстанций составляющая обратной последовательности тока хотя и не аннулируется, но её относительное значение всё же снижается. Самым

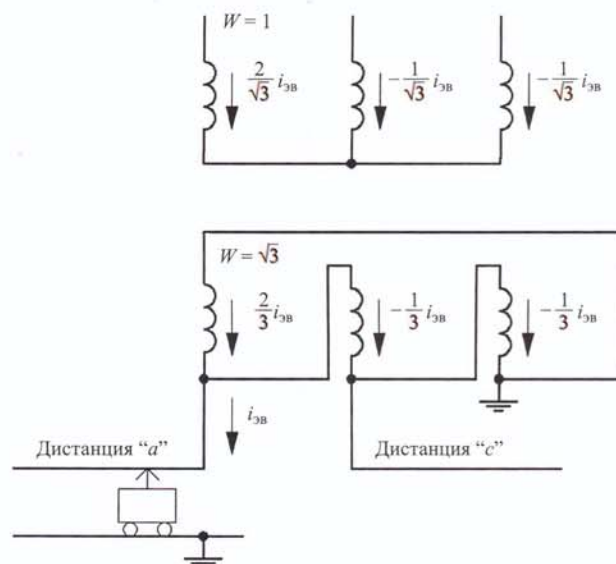


Рис. 6. Распределение тока электровоза $i_{эв}$ по фазам сети при потреблении с дистанции “а”:

коэффициент трансформации равен 1, отношение чисел витков $-1/\sqrt{3}$

тяжёлым является режим максимального потребления с одной дистанции.

Методика и результаты расчётов. По схеме замещения рассчитываются комплексные амплитуды гармоник напряжения и гармоник тока активного элемента, нужные для фильтрации напряжения узла G и определяются осциллограммы напряжений $u_{аэ}(t)$ и токов активного элемента $i_{аэ}(t)$. Далее вычисляется мощность активного элемента (ММС), требуемая для фильтрации и симметрирования искажений напряжения узла G по DSB-алгоритму селективного подавления искажающих гармоник. Расчёты ведутся для каждой гармоники в отдельности. При этом учитывается настройка системы управления АФСУ по отношению к рассматриваемой гармонике. Для селективно подавляемой гармоники процесс определяется условием зануления напряжения этой гармоники в узле G схемы замещения.

Значение и форма искажающегося тока $i_{эв}$ для схемы замещения (рис. 2) определялись исходя из совпадения коэффициента несимметрии, получаемого по расчётной схеме в тестовом режиме наибольших искажений на стороне 110 кВ без АФСУ, с измеренным при испытаниях коэффициентом несимметрии.

Расчёты ведутся методом симметричных составляющих. В этом методе двойной набор гармоник: для каждого номера k , равного 0, 1, 2, 3, 4, фигурируют две гармоники f_k соответственно $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 9$ (прямой и обратной последовательности). Все эти гармоники – искажающие, за исключением только основной гармоники прямой последовательности единичной частоты. Искаже-

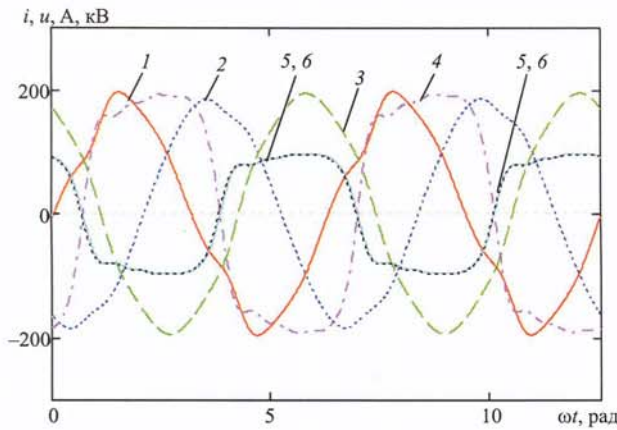


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений для режима наибольших искажений:

1, 2, 3 – напряжение соответственно фазы A, B, C; 4 – искажающий ток фазы A; 5, 6 – искажающие токи фаз B, C (совпадают)

ния величин единичной частоты порождаются одной гармоникой обратной последовательности. Для высших гармоник искажающими являются гармоники как прямой $U_{пр}$, так и обратной $U_{обр}$ последовательности, поэтому усреднённое по ортогональным осям значение искажающего напряжения $U_{искk}$ гармоники k получается сложением модулей в квадратуре:

$$U_{искk} = \sqrt{|U_{прk}|^2 + |U_{обрk}|^2} \quad (4)$$

При необходимости из комплексных амплитуд гармоник прямой и обратной последовательности могут быть вычислены комплексные амплитуды фазных или междуфазных напряжений и их вклад в искажения соответствующих напряжений. Однако для оценок достаточно усреднённых значений по выражению (4).

На рис. 7 представлены осциллограммы токов и напряжений для тестового режима наибольших искажений на стороне 110 кВ без АФСУ. Искажающая нагрузка сосредоточена на одной дистанции и составляет по фазам: $I_{эвA} = 136$ А, $I_{эвB} = 0$, $I_{эвC} = 0$. Полная мощность искажающей нагрузки (мощность электровозов на дистанции) равна 31,4 МВ·А, а её активная мощность – 23,7 МВт.

Таблица 1

Коэффициенты искажения напряжений в узлах F и G расчётной схемы

Место определения	Коэффициент искажения, %, для гармоники					
	-1	3	5	7	9	
Узел F:	расчёт	5,177	4,425	3,868	1,136	0,378
	измерение	5,170	3,770	3,020	1,540	0,740
Узел G (расчёт)	5,082	4,192	3,629	1,062	0,353	

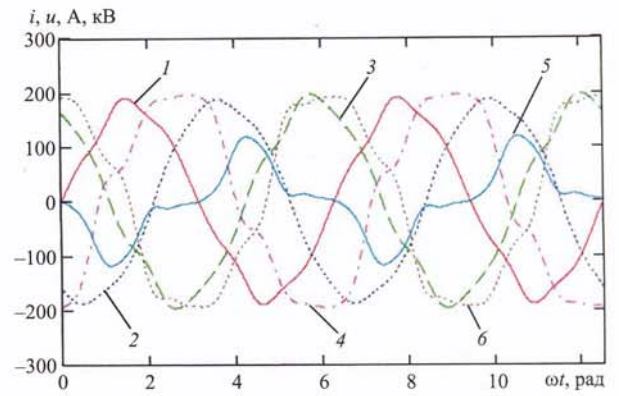


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений при нагрузке с двух смежных дистанций "a", "c":

1, 2, 3 – напряжение соответственно фазы A, B, C; 4, 5, 6 – искажающий фазный ток $i_{эв}$ соответственно фазы A, B, C

Параметры сети соответствуют ситуации с током короткого замыкания, равным 3,05 кА.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов искажения напряжения, полученные в результате расчёта и при измерении.

Расчётный коэффициент для гармоники -1 (обратной последовательности) совпадает с измеренным. Для 3-й и 5-й гармоник расчётные искажения несколько завышены, а для 7-й и 9-й занижены. Однако для рассматриваемой здесь задачи – фильтрации напряжения узла G – эти отклонения незначительны.

Действия взаимокомпенсации при нагрузке одновременно двух дистанций, питаемых со сдвигом 60° , иллюстрируют рис. 8 и данные табл. 2. Суммарная нагрузка вдвое больше, чем в предыдущем режиме (полная мощность искажающей нагрузки 44,283 МВ·А, а её активная мощность – 33,531 МВт; токи нагрузки: $I_{эвA} = 95,85$ А, $I_{эвB} = 95,85$, $I_{эвC} = 0$). Однако несимметрия напряжений благодаря взаимокомпенсации не выросла. Гармоники 5, 7 не компенсируются, и их уровень вырос соответственно увеличению нагрузки. Это очевидно объясняет, почему при испытаниях зафиксировано гораздо более длительное время допустимых искажений высшими гармониками (80 – 95%), чем время превышения допустимой несимметрии (30%). Действие компенсации в идеальном случае, когда связь между дистанциями

тяги по линии 220 кВ не имеет фазовых задержек, сказывалось бы и на высших гармониках порядков 3, 9, При реальных фазовых задержках компенсация для высших гармоник проявляется слабо либо не действует вовсе.

Напряжения и токи модульного многоуровневого преобразователя, выполняющего функцию активного элемента, – несинусоидальные несимметричные переменные. Для работающего в таких условиях преобразователя определяющими его установленную мощность факторами являются две величины:

наибольшее за период значение (амплитуда) линейного напряжения $U_{\text{эл}}$;

наибольшее за период значение (амплитуда) фазного тока $I_{\text{эф}}$.

Требуемая мощность активного элемента по этим двум величинам определяется как мощность эквивалентного синусоидального режима

$$S_{\text{ав}} = \sqrt{3} \frac{U_{\text{эл}}}{\sqrt{2}} \frac{I_{\text{эф}}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Такое определение мощности преобразователя, работающего с несинусоидальными напряжениями и токами, вполне адекватно, хотя и даёт некоторую избыточность по второстепенным параметрам.

На рис. 9 изображены осциллограммы линейных напряжений активного элемента $u_{\text{эл}} AB, BC, CA$ и его фазных токов $i_{\text{эл}} A, B, C$ в кратковременном режиме максимальных искажений. Для наглядности приведены суммарные линейные напряжения высших гармоник активного элемента $u_{\text{аэг}} AB, BC, CA$. Полная и активная мощность искажающей нагрузки (суммарная мощность электровозов на дистанции) $S_{\text{эв}} = 31,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $P_{\text{эв}} = 23,9 \text{ МВт}$; сетевое напряжение $U = 231 \text{ кВ}$. Параметры схемы замещения соответствуют ситуации с малым током короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 3,05 \text{ кА}$.

Таким образом, режим по всем показателям совпадает с тестовым режимом по рис. 7. Отличие лишь в том, что здесь подключено и действует АФСУ, полностью устраняющее искажения в узле G .

Относительные значения искажающих гармоник приведены в табл. 3 для узлов F, G и активного элемента схемы замещения.

Из осциллограмм $i_{\text{эл}}$ (рис. 9, б) видно, что токи активного элемента искажены очень сильно. В них доминирует составляющая обратной последовательности (порядок следования токов $A-C-B$, вместо прямого $A-B-C$). Активный элемент втягивает в себя искажающий ток, освобождая по возможности сеть от его действия. Потребовавшееся для действия АФСУ напряжение и ток активного элемента $U_{\text{ав}} \approx 255 \text{ кВ}$, $I_{\text{ав}} \approx 55 \text{ А}$. (Эти величины приведены к сетевому напряжению 220 кВ и нормированы множителем $1/\sqrt{2}$). Таким образом, для

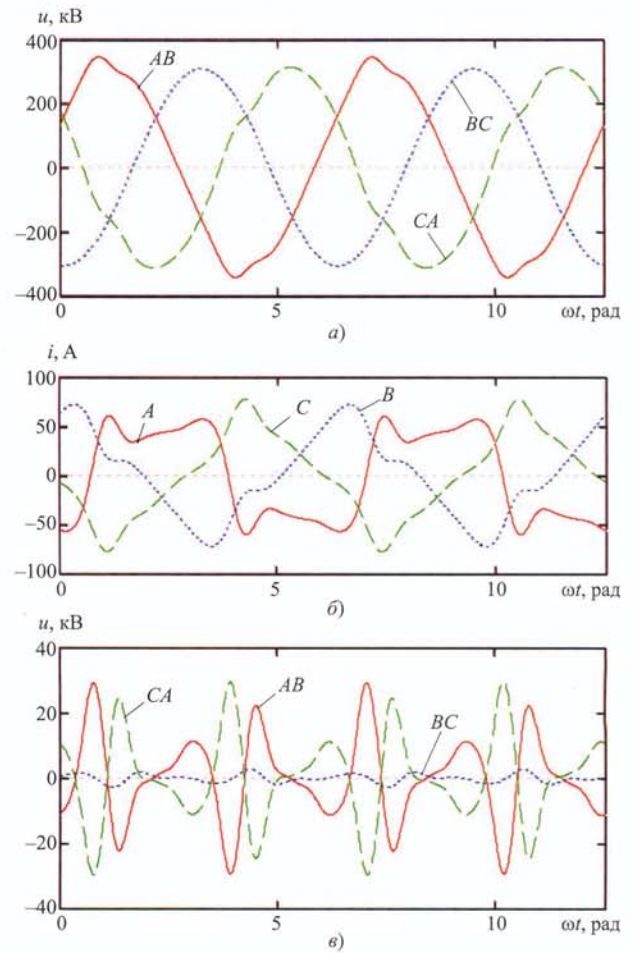


Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений при работе активного элемента в режиме наибольшей загрузки:

a – линейные напряжения активного элемента $u_{\text{эл}}$; b – фазные токи активного элемента $i_{\text{эл}}$; $в$ – суммарные линейные напряжения высших гармоник активного элемента $u_{\text{аэг}}$

полной компенсации искажений мощность активного элемента (ММС) должна составить 24,3 МВ·А.

При выполненном ранее расчёте перед АФСУ ставилось максималистское требование: полностью поглотить искажения, проникающие на узел G . Селективно подавлялись все искажающие гармоники порядка $-1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 9$. Их остаточные уровни для узла G задавались нулевыми. Ожидаемым образом требуемая мощность АФСУ

Таблица 2

Коэффициенты искажения напряжений в узлах F и G расчётной схемы при нагрузке с двух смежных дистанций тяги “ a ”, “ c ”

Место определения	Коэффициент искажения, %, для гармоники				
	-1	3	5	7	9
Узел F	3,649	3,119	4,543	1,298	0,266
Узел G	3,581	2,955	4,263	1,214	0,249

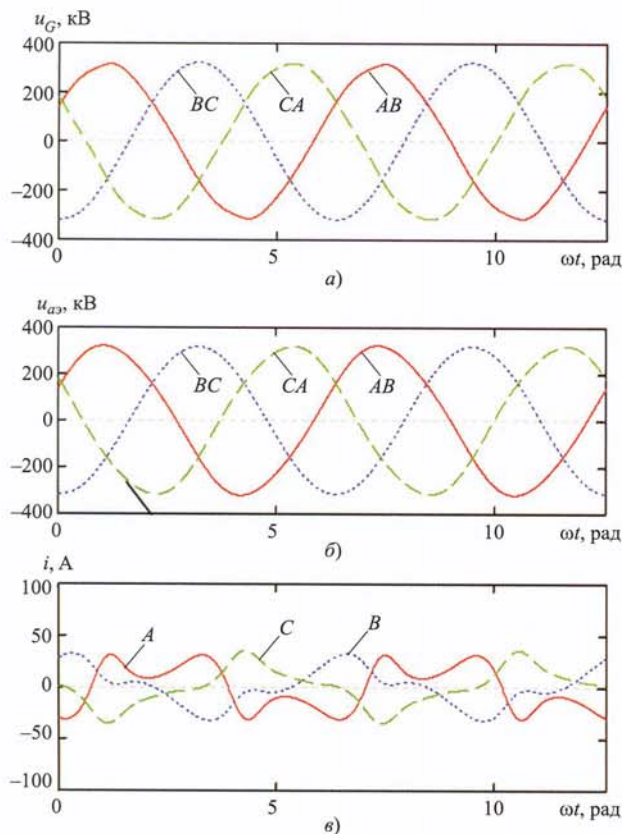


Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений при работе активного элемента в режиме наибольшей загрузки и подавлении гармоник до нормативных значений:

а – линейные напряжения узла G расчётной схемы u_G ; б – линейные напряжения активного элемента $u_{акт}$; в – фазные токи активного элемента $i_{фз}$

при этом получается значительной, соизмеримой с мощностью искажающей нагрузки. Стандарт на качество электрической энергии [1] допускает ненулевые остаточные искажения. Требуется лишь, чтобы они не превышали нормированных значений. В частности, допускается длительно сохраняющаяся несимметрия до 2% и кратковременные увеличения несимметрии до 4%. Аналогичную структуру имеют требования по высшим гармоникам.

Таблица 3

Коэффициенты искажения напряжений в узлах F и G расчётной схемы в кратковременном режиме максимальных искажений при действии АСФУ

Место определения	Коэффициент искажения, %, для гармоники				
	-1	3	5	7	9
Узел F	3,673	3,267	2,879	1,056	0,359
На выходе активного элемента	3,682	3,352	2,841	1,287	0,468
Узел G	0	0	0	0	0

На рис. 10 приведены осциллограммы, а в табл. 4 – количественные данные режима при подавлении гармоник до нормативных значений.

Напряжения $u_{акт\ AB, BC, CA}$ незначительно искажены третьей гармоникой (3,35%). Соответственно в напряжении узла G третья гармоника равна нулю. Напряжения $u_{G\ AB, BC, CA}$ сохраняют некоторую несимметрию и искажения. Однако величина искажений радикально снижается по сравнению с режимом работы без АФСУ, как показывает сравнение строк табл. 1 и 4. Коэффициент искажения составляющей обратной последовательности снижается с 5,082 до 2,139%, а для пятой гармоники – с 3,63 до 1,632%. Предельно допустимые уровни не превышаются для всех гармоник. В то же время нагрузка активного элемента АФСУ заметно снижается по сравнению с той, которая нужна при максимальной фильтрации. Мощность активного элемента составляет 14,6 вместо 24,3 МВ·А, необходимых для полного подавления гармоник.

Выводы

1. Для нормализации напряжения сети питающей тяговые подстанции требуется выполнить одновременно две функции: симметрирование напряжения и фильтрацию высших гармоник. С развитием концепции модульных многоуровневых преобразователей появилось адекватное техническое средство, позволяющее осуществить активную фильтрацию, симметрирование и компенсацию реактивной мощности на проблемных участках сети, где напряжение подвергается сильным искажениям.

2. Проведённые расчёты показывают, что для обеспечения нормативных требований по качеству напряжения на ПС 220 кВ Сковородино достаточно использования многоуровневого преобразователя напряжения ММАФ-16к-600 мощностью 16 МВ·А, изготовленного и испытанного в 2012 – 2013 гг.

3. Поскольку первоначально планировалось применить ММАФ-16к-600 на другом объекте и в нескольких иных условиях, перед его установкой и

Таблица 4

Коэффициенты искажения напряжений в узлах F и G расчётной схемы в режиме наибольшей загрузки при подавлении гармоник до нормативных значений

Место определения	Коэффициент искажения, %, для гармоники				
	-1	3	5	7	9
Узел F	3,673	3,267	2,879	1,056	0,359
На выходе активного элемента	0	3,352	0	0	0
Узел G	2,139	0	1,632	0,598	0,203

вводом в работу на ПС 220 кВ Сковородино требуется некоторая доработка оборудования и программ управления, а также проведение испытаний, дополняющих выполненные ранее.

4. При дальнейшем развитии и совершенствовании энергосистемы можно ожидать широкого распространения активных фильтросимметрирующих и компенсирующих установок, устанавливаемых непосредственно на объектах потребителей – источниках искажений: тяговых подстанциях железных дорог переменного тока напряжением 27 кВ, а также на подстанциях питания насосных станций магистральных нефтепроводов. При этом положительный эффект достигается при меньшей установленной мощности установок, обеспечивается симметричный режим работы тяговых трансформаторов, что не только снимает проблему качества энергии, но и позволяет существенно снизить потери и обеспечить повышение пропускной способности Транссибирской магистрали, возможность подключения дополнительных промышленных и бытовых потребителей, расположенных вдоль неё. Использование накопителя

энергии в звене постоянного тока активных фильтросимметрирующих и компенсирующих установок позволяет предотвратить потерю устойчивости и опрокидывание двигателей при кратковременных перерывах питания.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Стандартинформ, 2014.
2. Grunbaum R., Johansson T. SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6 / 98.
3. Lesnicar A. and Marquardt R. An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range. – IEEE PowerTech Conference, Italy, Bologna, 2003, June 23 – 26.
4. Marquardt R. and Lesnicar A. New Concept for High Voltage – Modular Multilevel Converter. – IEEE PESC 2004, Germany, Aachen, 2004, June.
5. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970.
6. Дубровский З. М., Попов В. И., Тушканов Б. А. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. М.: Транспорт, 1998.
7. Тяговые подстанции / Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. М.: Транспорт, 1986.

Уважаемые читатели журнала «Электрические станции»!

Редакция журнала приступила к выпуску годовых сборников журнала на CD!

На экране своего компьютера Вы увидите электронную версию журнала, в точности соответствующую печатному оригиналу. Удобная система закладок, тематический указатель и рубрикатор позволят Вам быстро найти нужную информацию.

Годовой сборник журнала на CD – это САМЫЙ УДОБНЫЙ способ хранения информации!



Требования к операционной системе:
 16 Мб свободного места на жестком диске;
 16 Мб RAM (рекомендуется 32 Мб);
 процессора Pentium;
 IBM-совместимый компьютер на базе Windows 98 и выше.

Заплатив 472 руб. (в том числе НДС и почтовые расходы), Вы уже сейчас можете приобрести годовые сборники журнала на CD, начиная с 2001 г.

Направьте в редакцию (по почте, факсу или E-mail) гарантийное письмо-заявку с указанием платежных реквизитов и точного почтового адреса. Вам будет выставлен счет, после оплаты которого мы вышлем в Ваш адрес CD.

Адрес редакции: 115280, Москва, 3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1
Тел/факс: (495) 234-74-17
E-mail: el-stantsii@rambler.ru