

Комбинированный активный фильтр для компенсации реактивной мощности и подавления гармоник в распределительных сетях

Аннотация – В статье рассматривается проблема компенсации реактивной мощности в распределительных сетях среднего напряжения. Изменение конфигурации питающей энергосистемы приводит к появлению дополнительных требований к распределительной подстанции и необходимости улучшения компенсации реактивной мощности (КРМ). В данной статье проводится анализ альтернативного подхода, который заключается в использовании для повышения качества электроэнергии комбинированного активного фильтра на напряжение 13,8 кВ. При этом для построения фильтра предполагается использовать существующую конденсаторную батарею, компенсирующее действие которой дополняется активным фильтром. Эффективность действия комбинированного фильтра оценивается с помощью компьютерного моделирования с учетом реактивной мощности, гармоник и компенсации асимметрии (небаланса). Моделирование показало, что фильтр отличается очень хорошими показателями как в установившихся, так и переходных режимах.

Ключевые слова – Активные фильтры, гармонические искажения, распределение электроэнергии, качество электроэнергии, реактивная мощность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества нелинейных нагрузок и генерирующего гармоник оборудования, а также количества распределенных генерирующих мощностей привело к появлению потребности в компенсации обусловленных ими возмущений [1], [2]. Искажения напряжения, связанные с несинусоидальностью токов, стали наиболее серьезной проблемой для распределительных электросетей. Последние часто сталкиваются с такими последствиями наличия гармоник как увеличение потерь в трансформаторах и ЛЭП, проблемы, связанные с реактивной мощностью и резонансными явлениями, снижение номинальных параметров оборудования, взаимовлияние между источниками и нагрузками, снижение общей стабильности энергосистемы и сужение области устойчивой работы энергосистемы [3].

Использование традиционных способов компенсации, основанных на использовании конденсаторных батарей и пассивных фильтров (ПФ) приводит лишь к дальнейшему распространению гармоник, например из-за возникновения резонанса между индуктивностью линий и параллельными конденсаторами КРМ. Вот почему в последние годы большое внимание уделялось «активным» устройствам подавления гармоник [4]–[9]. Одним из наиболее популярных решений для борьбы с гармониками является шунтовый активный фильтр (SAPF) [4], [5], [9]. Его действие основано на генерации гармоник и/или реактивных токов в определенной точке системы. Для SAPF было предложено несколько алгоритмов управления [6]–[9], при этом наиболее популярным являлся алгоритм, основанный на обобщенной теории активной и реактивной мощности [10], [11].

Данная статья посвящена решению описанной выше проблемы применительно к конкретной распределительной системе. Изменение конфигурации системы приводит к новым ограничивающим факторам на распределительных подстанциях (РП). Соответственно исследование гармоник производится исходя из конфигурации системы в будущем. Искажения напряжения в различных точках системы при различных условиях работы конденсаторных батарей проверялись методом потоков мощности гармоник (harmonic flows) [12]. Первое предложение заключалось в увеличении существующей пассивной компенсации, однако такое решение привело к появлению резонансов в области пятой и седьмой гармоник и неприемлемым уровням искажений. Поэтому в [13] было впервые предложено использовать альтернативное решение с использованием активного фильтра. Более тщательное изучение системы привело к новым данным об уровнях мощностей, подлежащих компенсации, и показало, что в системе отсутствует компонент нулевой последовательности, а величина основной гармоники токов обратной последовательности незначительна. При этом в питающей подстанции системе с напряжением 132 кВ гармоники и асимметрия фаз практически отсутствовали. Как следствие, данный случай представляется идеальным с точки зрения компенсации при помощи шунтовых (включенных параллельно с сетью) активных или комбинированных фильтров. Возможный вариант комбинированного активного фильтра предложен в данной статье. Указанный фильтр тщательно исследован путем моделирования его поведения как в установившихся, так и переходных режимах.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Сложнозамкнутая сеть (meshed network) с напряжением 132 кВ, к которой подключена рассматриваемая подстанция, питается от системы с напряжением 500 кВ. Необходимость улучшения качества напряжения на уровне 13,8 кВ привела к необходимости использования новых средств компенсации [12]. Нагрузки различных подстанций представлены как промышленными, так и жилыми объектами. Как следствие, установление источников гармоник в данном случае сложнее, чем в случае только промышленных нагрузок. Поэтому в данном случае необходимо построение модели, основанной на результатах «полевых» измерений.

На рис.1 показана однолинейная схема модели системы, принятой для исследуемой подстанции. Трехфазная модель сети была реализована в среде MATLAB/Simulink Power System Blockset (PSB).

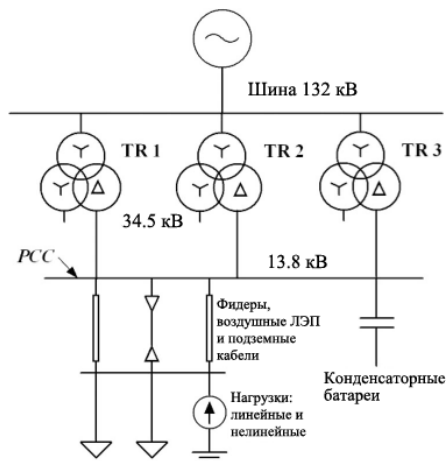


Рис. 1. Однолинейная схема модели системы

Таблица I.
ТОКИ ГАРМОНИК

i_h	$i_7(A)$	$i_{11}(A)$	$i_{11}(A)$	$i_{13}(A)$	$THD_I(\%)$
Пиковые значения	74.9	54	24.5	18.7	5.4

Система (высшего напряжения. – прим перев.) представляется идеализированным источником напряжения 132 кВ, подключенным к трем трансформаторам со сходными характеристиками - 132/34.5/13.8 кВ и 15/10/15 МВА. Моделирование системы производится с использованием эквивалентного импеданса, связанного с мощностью короткого замыкания на напряжении 13.8 кВ, которая составляет приблизительно 200 МВА. Нагрузки на уровне 34.5 кВ отсутствуют. Все трансформаторы подключены в параллель к шине 13.8 кВ, туда же подключены конденсаторные батареи и нагрузки. Поскольку обмотки трансформаторов соединены по схеме звезда/звезда/треугольник (Y/Y/D), токи нулевой последовательности на уровне 13.8 кВ отсутствуют. Кроме того, измерения, выполненные в сети, показали, что при имеющихся нагрузках отсутствуют токи обратной последовательности на частоте основной гармоники. Соответственно, для рассматриваемой подстанции была построена симметричная модель сети. Фидеры, подземные кабели и надземные ЛЭП рассматриваются со стороны подключения нагрузки.

Активная и реактивная потребляемые мощности на частоте основной гармоники представляются в виде цепи с постоянным полным сопротивлением и нелинейной нагрузки, соответствующей гармоникам, в форме синусоидальных источников тока. Амплитуда и частота каждого источника характеризуют соответствующую гармонику.

В соответствии с исследованиями потоков мощности и гармоник, выполненных в этой системе [12], полное потребление по шине 13.8 кВ составляет 29.3 МВА при $\cos \varphi = 0.8$. Пиковые токи гармоник и THD_I , определенные в [14], показаны в таблице I.

Компенсация реактивной мощности в 9.6 МВар приведет к $\cos \varphi = 0.94$ на уровне 13.8 кВ, что и является задачей предлагаемого компенсатора.

Компенсация реактивных составляющих токов с помощью конденсаторной батареи мощностью 4.8 МВар приводила к возникновению параллельных резонансов, следствием чего являлось неприемлемое повышение уровня гармоник. Результаты такой компенсации (P и Q) определены в [14]. Указанные результаты, реактивная мощность, генерируемая конденсаторной батареей, и величины искажений тока и напряжения приведены в таблице II.

В таблице III показаны напряжения гармоник и THD_V для всех случаев, а также пределы, устанавливаемые IEEE [15]. Для случаев $Q_c = 4.8$ МВар и $Q_c = 9.6$ МВар напряжения пятой и седьмой гармоник, а также уровень THD_V превышают допустимые значения, из чего следует, что необходимо использовать иной способ компенсации.

Таблица II.
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Q_c (МВар)	P (МВт)	Q (МВар)	V_1 фазн. (кВ, д.з.)	THD_V (%)	I_1 лин. (А, д.з.)	THD_I (%)	$\cos \varphi$	Q_{Ac} (МВар)
0	23.4	17.7	7696	5.66	1269	5.43	0.8	----
4.8	24.4	13.7	7865	9.65	1188	10.7	0.86	4.78
9.6	25.5	9.7	8040	9.64	1129	13.8	0.92	9.62

Таблица III.
ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ГАРМОНИК И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ТРЕБУЕМЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Напряжения гармоник	Q_c (0 MVar)	Q_c (4.8 MVar)	Q_c (9.6 MVar)	Пределы IEEE
$V_5(\%)$	<u>3.29</u>	<u>5.47</u>	<u>8.88</u>	3
$V_7(\%)$	<u>3.32</u>	<u>7.48</u>	<u>3.61</u>	3
$V_{11}(\%)$	2.37	2.30	0.86	3
$V_{13}(\%)$	2.14	1.42	0.56	3
$THD_V(\%)$	<u>5.66</u>	<u>9.65</u>	<u>9.64</u>	5

III. КОМПЕНСАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

SAPF (шунтовой активный фильтр), являющийся одним из наиболее популярных решений, используемых для подавления гармоник, в качестве возможного решения рассматриваемой задачи был впервые представлен в [13]. В данной работе производится подробный анализ комбинированного активного фильтра. Преимуществом рассматриваемого решения является использование конденсаторной батареи, уже имеющейся на подстанции. При этом батарея используется для реализации пассивного фильтра. Структурная схема шунтового комбинированного активного фильтра (SAPF) показана на рис.2 [18], [19].

Он образован путем подключения пассивного фильтра к базовой структуре SAPF, рассмотренной в [13]. Основное отличие заключается в том, что измеряемый ток содержит информацию не только о токе нагрузки, но и о токе, потребляемом пассивным фильтром (ПФ).

Общеизвестно, что SAPF лучше всего работает с нагрузками, которые можно смоделировать как источник тока. Поэтому конденсаторная батарея используется в качестве компонента ПФ, который позволяет исключить нагружение SAPF на источник напряжения. При этом настройка ПФ на частоту гармоники с наименьшим номером, присутствующей в нагрузке, гарантирует ее «токовый» характер; одновременно с этим снижается ток, протекающий через активный фильтр.

Таким образом, задача компенсации оказывается поделенной между SAPF и ПФ. Последний обеспечивает компенсацию реактивной мощности в 4.8 МВар, что обеспечивает минимизацию тока основной гармоники через SAPF. При этом SAPF обеспечивает генерацию гармоник, которые не могут быть отфильтрованы ПФ.

SAPF содержит трехфазный инвертор напряжения с обратной связью по току (CCVSI), подключенный к сети через реактор и трансформатор. Кроме того, после трансформатора установлен ФНЧ (в оригинале «сглаживающий фильтр», что не совсем верно. – прим.перев.), предназначенный для подавления высоких частот, генерируемых при коммутации ключей инвертора. Сигналы задания тока для CCVSI формируются блоком управления на основе мгновенных значений активной и реактивной мощности. Контур тока замыкается через релейные регуляторы (hysteresis controllers). Звено постоянного тока инвертора представлено одним единственным конденсатором подходящей емкости. Активный фильтр обеспечивает заряд указанного конденсатора и регулирование напряжения на нем без необходимости использования дополнительного источника питания.

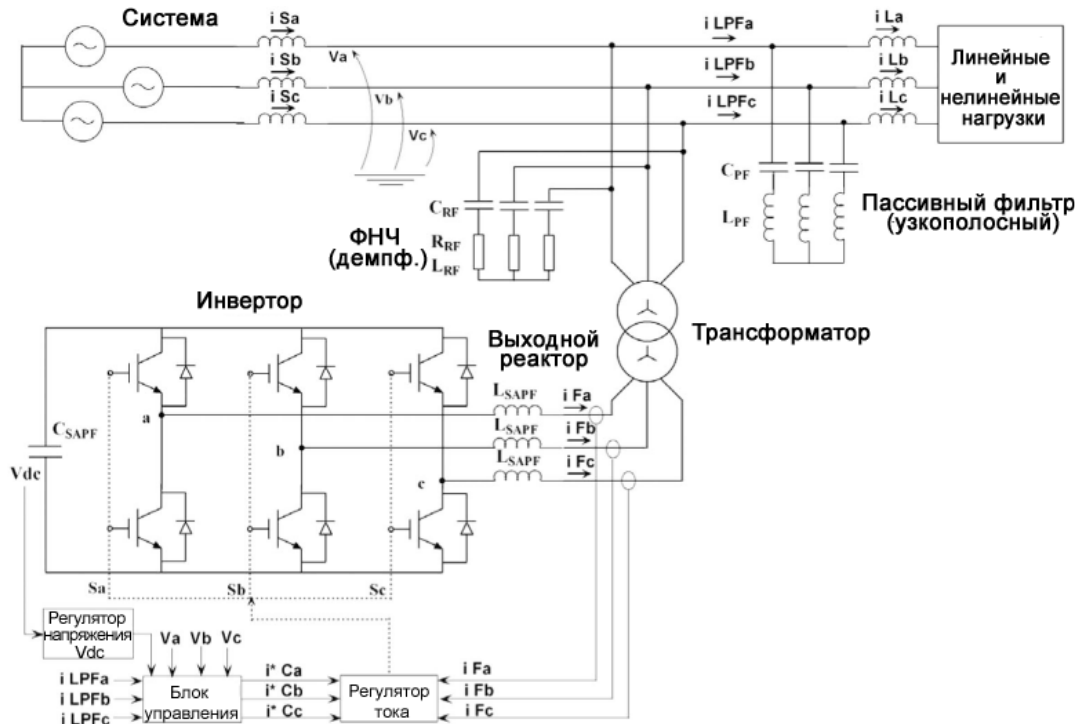


Рис. 2. Обобщенная схема реализованного SARF

Анализ SAPF разделен на две части: работа CCVSI и блока управления при поддержании требуемых токов и поддержание постоянного напряжения CCVSI. Кроме того, в этом разделе рассматривается конструкция ПФ.

В. Инвертор напряжения с обратной связью по току (CCVSI)

CCVSI представляет собой обычный двухуровневый трехфазный инвертор напряжения на IGBT [1], [16]. Контуры тока замыкаются через релейные регуляторы. Выходной ток, протекающий через реакторы, оцифровывается с фиксированной частотой. Поэтому обновление сигнала на входе преобразователя ограничено периодом квантования, а максимальная частота коммутации лежит вблизи частоты квантования. Ее среднее значение равняется приблизительно 10 кГц.

Величина индуктивности выходного реактора определяется компромиссом между подавлением высоких частот, обусловленных коммутацией ключей инвертора, и возможностью обеспечить высокие значения di/dt на реакторе, что необходимо для формирования токов на частоте гармоник, которые должны быть устранены. Дополнительная фильтрация высоких частот производится параллельным фильтром второго порядка, который шунтирует токи высоких частот, не давая им проникнуть в систему [3].

Емкость звена постоянного тока выбирается таким образом, чтобы уровень пульсаций не превышал 2%. Величина постоянного напряжения выбирается таким образом, чтобы преобразователь был в состоянии обеспечить значения di/dt , необходимые для компенсации требуемых гармоник. Уровень постоянного напряжения контролируется с помощью П-регулятора, который изменяет задание активной мощности преобразователя.

Несмотря на то, что конденсатор звена постоянного тока моделируется звеном первого порядка, его постоянная времени, как и коэффициент усиления по постоянному току, определяется величиной параллельного сопротивления, учитывающего диэлектрические потери конденсатора. Величина этого сопротивления составляет несколько килоом, поэтому напряжение звена постоянного тока можно с достаточной точностью считать интегралом от тока. Соответственно, П-регулятор оказывается пригодным для рассматриваемого случая.

Трансформатор связи обеспечивает приведение выходного напряжения CCVSI (6.5 кВ в звене постоянного тока) к уровню напряжения энергосистемы (13.8 кВ). Кроме того, трансформатор обеспечивает дополнительную фильтрацию выходного напряжения, снижая уровень коммутационных помех.

С. Блок управления силовой частью и формирователь задания тока

Основной функцией блока управления силовой частью является измерение фазных напряжений сети (V_a, V_b, V_c) и фазных токов ($i_{LPFa}, i_{LPFb}, i_{LPFc}$), а также расчет токов задания CCVSI по мгновенным значениям активной и реактивной мощности [10], [11]. Сначала производится приведение измеренных переменных к неподвижной системе координат $[\alpha - \beta - 0]$. Затем мгновенные значения мощностей рассчитываются с использованием выражения:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{DC} \\ Q_{DC} \\ P_{0DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{AC} \\ Q_{AC} \\ P_{0AC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где p – действительная (активная) составляющая мощности, q – мнимая (реактивная) составляющая мощности, а p_0 – мощность нулевой последовательности.

Рассматриваемая система является трехпроводной, в ней можно пренебречь мощностью нулевой последовательности и далее рассматривать только компоненты p и q . В случае нелинейных нагрузок p и q содержат как постоянную, так и переменную составляющие. Среднее значение мгновенной активной мощности (p_{DC}) равно утроенному значению активной мощности в каждой из фаз. Аналогично, среднее значение мгновенной реактивной мощности (q_{DC}) равно утроенному значению реактивной мощности в каждой из фаз. Переменные составляющие обеих мгновенных мощностей (p_{AC}) и (q_{AC}) соответствуют вкладу гармоник и небалансов. В рассматриваемом случае переменные составляющие обусловлены лишь гармониками, поскольку нагрузки симметричны, а составляющие нулевой последовательности отсутствуют благодаря соответствующему соединению обмоток трансформатора.

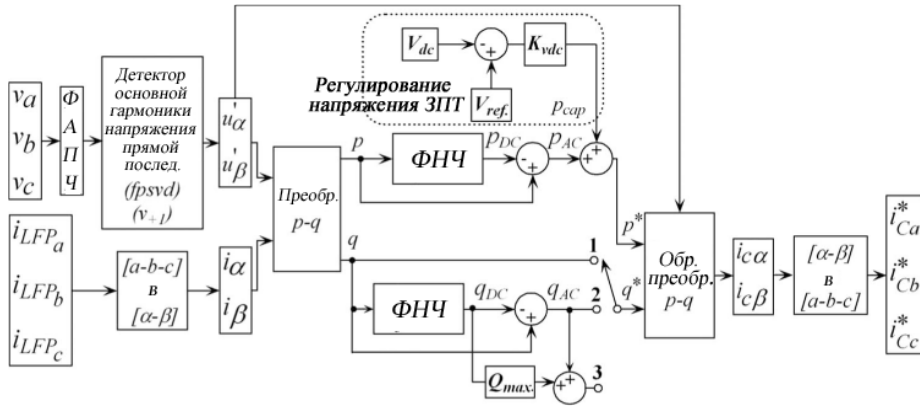


Рис. 3. Структурная схема системы управления силовой частью SAPF.

В целом, сеть «поставляет» постоянную составляющую активной (действительной) мощности, а переменная составляющая, как и вся мнимая мощность, должна генерироваться SAPF. Соответственно сигнал мгновенной активной мощности подвергается фильтрации с целью разделения ее двух компонентов и вычисления значений задания p^* и q^* . Следует заметить, что переменные составляющие вводятся в сигналы задания преобразователя непосредственно, поэтому фазовый сдвиг при этом не возникает. При малой величине переменных составляющих частота среза фильтра может влиять на переходную характеристику, но не на фазовый сдвиг переменных составляющих. Ток задания в системе координат $[\alpha - \beta]$ имеют вид:

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

а фазные токи, необходимые для CCVSI

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Напряжения сети могут искажаться из-за присутствия гармоник и помех, генерируемых самим активным фильтром. Как следствие, токи, рассчитанные по приведенному выше уравнению, могут не обеспечить полной компенсации гармоник. Поэтому желательно получить фазовый сдвиг и частоту основной гармоники напряжения прямой последовательности (V_{+1}) без использования результатов прямого измерения. Это достигается путем использования контура ФАПЧ (phase-locked loop), формирующего сигналы, синхронизированные с фазными составляющими напряжения прямой последовательности, и «детектора» основной гармоники напряжения нулевой последовательности (FPVSD), обеспечивающего определение амплитуды (V_{+1}) [17]. Выходные сигналы FPVSD - идеально синусоидальные фазные напряжения (V_a, V_b, V_c), которые используются для синхронизации токов фильтра и расчета мгновенных мощностей.

Полная структурная схема системы управления показана на рис.3. Требуемая активная мощность инвертора (p^*) получается в результате суммирования двух величин. Первая из них соответствует переменной составляющей действительной части мощности (p_{AC}), в то время как вторая представляет собой выходной сигнал регулятора напряжения звена постоянного тока ($p_{сap}$), который представляет собой мощность, которую должен потреблять инвертор для поддержания уровня напряжения на конденсаторе. Что касается задания q^* , здесь возможны три варианта. Вариант 1 – полная компенсация q , которая складывается из средних значений (q_{DC}) и (q_{AC}). Вариант 2 – компенсация только переменной составляющей $q(q_{AC})$. Вариант 3 – компенсация переменных составляющих и части среднего зна-

чения q , которое определяется пределом Q_{max} . В приведенном анализе рассматривается вариант 3 с $Q_{max}=4.8$ МВар.

Контур тока для одной из фаз показан на рис.4.

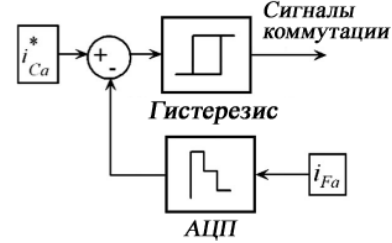


Рис. 4. Контур тока для фазы А

Измеренные (оцифрованные) значения фазных токов инвертора (i_{Fa}, i_{Fb}, i_{Fc}) по очереди сравниваются с токами задания ($i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*$) с помощью компараторов с гистерезисом. Их выходные сигналы - сигналы управления ключами инвертора. Оцифровка токов инвертора производится с фиксированной частотой. Соответственно обновление сигналов на выходах компараторов происходит только в моменты выборок, а максимальная частота коммутации ключей оказывается близкой к частоте квантования (выборок). При этом предпочтительным является использование релейного регулятора с ограничением частоты коммутации, поскольку он представляет собой простую, быстродействующую и надежную в работе схему.

D. Пассивный фильтр

Пассивный фильтр (ПФ) представляет собой три простых LC-цепи (по одной на фазу). Фильтр обеспечивает реактивную мощность в 4.8 МВар и настраивается на частоту, близкую к частоте 5-й гармоники [3]. Определим величину компенсируемой реактивной мощности (Q_{CPF}), частоту настройки (f_t) и типичное значение добротности (Q_{PF}) пассивного фильтра. Если C_{PF} выражена в микрофарадах, L_{PF} – в миллигенри, а R_{PF} в омах, получим:

$$Q_{CPF}(\text{МВар}) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V^2 \cdot C_{PF}$$

$$f_t(\text{Гц}) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{PF} \cdot C_{PF}}}$$

$$Q_{PF} = \frac{X_o}{R_{PF}} \quad (4)$$

где

- f номинальная частота системы, 50 Гц;
- V действующее значение линейного напряжения системы, 13.8 кВ;
- X_o индуктивное (или емкостное) сопротивление при резонансе (Ω).

Таблица IV.
КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ SAPF И ФНЧ

Инвертор	Трансформатор		ФНЧ (демпф.)		
V _{dc} (В)	6500	S(MVA)	10	R _{RF} (Ом)	30
C _{SHAPF} (мкФ)	3000	V _i /V ₂ (кВ)	2.3/13.8	C _{RF} (мкФ)	3.53
L _{SHAPF} (мГн)	0.5	X(%)	10	L _{RF} (мГн)	3.18
		L _{2,3кВ} (мГн)	0.168	f _c (Гц)	1500

Таблица V.
ПАРАМЕТРЫ ПФ

Пассивный фильтр (настроенный)			
Q _{RF} (МВар)	4.8	C _{RF} (мкФ)	80.2
f _i (Гц)	≈250	L _{RF} (мГн)	5.05
R _{RF} (Ом)	0.17	Q _{PF}	45

Таблица VI.
ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ

Компоненты			SAPF	SHAPF
Инвертор	IGBT	$S = \sqrt{3} / 2 \cdot V_{DC} \cdot I_{\text{пик}}$ (MVA)	26	15
		Ток (А, пиковый)	4600	2600
	Конденсатор ЗПТ	Напряжение (В)	6500	6500
		C(мкФ)	7500	3000
Выходной реактор			да	да
Согласующий трансформатор			1 x 15	1 x 10
Пассивный фильтр (МВар)			нет	1 x 4.8
ФНЧ			Да	Да

Е. Конструктивные параметры

Параметры компонентов SAPF и ФНЧ сведены в таблицу IV, а параметры ПФ - в таблицу V.

В таблице VI показано сопоставление предлагаемого SAPF и SHAPF, рассмотренного в [13].

Оба фильтра разработаны для решения задач компенсации на подстанции, описанной в данной статье. Из таблицы можно видеть, что комбинированное решение позволяет снизить требования к выходному току инвертора, а также к мощности согласующего трансформатора. Как следствие, конденсатор звена постоянного тока (ЗПТ) может иметь меньшую емкость. Комбинированная схема оказывается более экономичным решением, чем чисто активный фильтр, тем более что конденсаторы для построения ПФ уже присутствуют в системе.

IV. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ

В данном разделе приведены результаты моделирования SAPF с использованием MATLAB/Simulink PSB. Для оценки эффективности предлагаемого фильтра работа подстанции была смоделирована при различных условиях нагрузки.

А. Максимальная нагрузка

Сначала рассмотрим случай максимального потребления. В этом случае имеем нагрузку в 29.3 МВар при $\cos \varphi = 0.8$ ($P = 23.4$ МВт, $Q = 17.7$ МВар). Напряжение и ток для одной фазы на уровне 13.8 кВ (выше¹ ПФ и SAPF) показаны на рис.5.

При этом ПФ всегда подключен. SAPF включается в момент $t=0.2$ с. На рис.5 можно видеть, как искаженные токи (пунктирная линия) становятся синусоидальными и практически синфазными с напряжением (сплошная линия) после подключения SAPF. Также можно заметить появление высокочастотного «шума» в фазных напряжениях.

На рис.6 показаны спектры фазных напряжений и токов. Приведенные результаты соответствуют установившемуся режиму при полной нагрузке и мощности компенсации реактивной мощности в 9.6 МВар. THD_v оказался снижен от началь-

ного значения 9.64% до 0.99% при действующем значении основной гармоники $V_{\text{rms}} = 8037$ В.

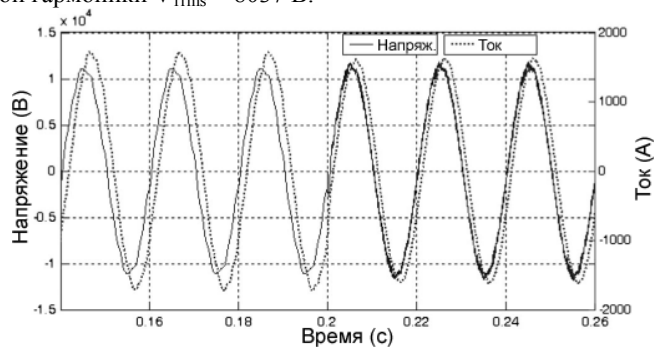


Рис. 5. Максимальная нагрузка. Напряжение и ток на шине 13.8 кВ при подключении SAPF.

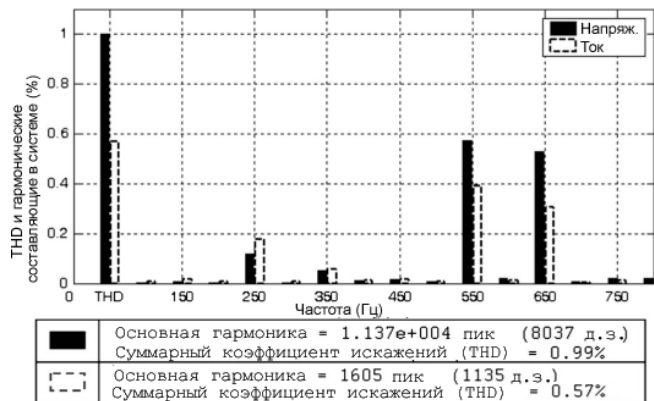


Рис. 6. Максимальная нагрузка. THD (суммарный коэффициент искажения) и спектры тока и напряжения на шине 13.8 кВ в установившемся режиме.

Что касается тока, THD_i снизился от исходной величины 13.8% до 0.57% при действующем значении основной гармоники $I_{\text{rms}} = 1135$ А. Как THD_v так и THD_i были рассчитаны с учетом гармоник вплоть до 50-й. Если в целях учета коммутационных процессов в инверторе рассматривать частоты гармоник до 12 кГц, THD_v возрастет до 1.34%, в то время как уровень искажений тока практически не изменится.

В. Несимметричная нагрузка

В этом параграфе рассматривается возможное влияние асимметрии тока нагрузки. Несмотря на то, что во время измерений в системе не было выявлено проблем, связанных с асимметрией нагрузок, был проведен ряд расчетов для оценки поведения фильтра при наличии токов обратной последовательности на частоте основной гармоники. В приведенном далее примере ток обратной последовательности на уровне 7% (отношение тока обратной последовательности к току прямой последовательности) приводит к повышению как реактивной мощности, так и гармонических искажений по сравнению с предыдущим параграфом.

Напряжения и токи фаз на уровне 13.8 кВ (выше ПФ и SAPF) показаны на рис.7 и 8. При этом ПФ всегда подключен. SAPF включается в момент $t=0.2$ с. На рис.7 можно видеть, как искаженные напряжения становятся синусоидальными после подключения SAPF. Также можно заметить появление незначительного высокочастотного «шума» в фазных напряжениях. Изначальный небаланс по напряжению в 1% благодаря действию активного фильтра снижается до 0.26%. На рис.8 можно видеть, как искаженные и несимметричные токи фаз становятся симметричными и синусоидальными после подключения SAPF. При этом уровень токов обратной последовательности снижается с изначальных 7% до 2%.

¹ Т.е. со стороны подключения источника. – прим. перев.

Комбинированный активный фильтр для компенсации реактивной мощности и подавления гармоник в распределительных сетях

Аннотация – В статье рассматривается проблема компенсации реактивной мощности в распределительных сетях среднего напряжения. Изменение конфигурации питающей энергосистемы приводит к появлению дополнительных требований к распределительной подстанции и необходимости улучшения компенсации реактивной мощности (КРМ). В данной статье проводится анализ альтернативного подхода, который заключается в использовании для повышения качества электроэнергии комбинированного активного фильтра на напряжение 13,8 кВ. При этом для построения фильтра предполагается использовать существующую конденсаторную батарею, компенсирующее действие которой дополняется активным фильтром. Эффективность действия комбинированного фильтра оценивается с помощью компьютерного моделирования с учетом реактивной мощности, гармоник и компенсации асимметрии (небаланса). Моделирование показало, что фильтр отличается очень хорошими показателями как в установившихся, так и переходных режимах.

Ключевые слова – Активные фильтры, гармонические искажения, распределение электроэнергии, качество электроэнергии, реактивная мощность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества нелинейных нагрузок и генерирующего гармоника оборудования, а также количества распределенных генерирующих мощностей привело к появлению потребности в компенсации обусловленных ими возмущений [1], [2]. Искажения напряжения, связанные с несинусоидальностью токов, стали наиболее серьезной проблемой для распределительных электросетей. Последние часто сталкиваются с такими последствиями наличия гармоник как увеличение потерь в трансформаторах и ЛЭП, проблемы, связанные с реактивной мощностью и резонансными явлениями, снижение номинальных параметров оборудования, взаимовлияние между источниками и нагрузками, снижение общей стабильности энергосистемы и сужение области устойчивой работы энергосистемы [3].

Использование традиционных способов компенсации, основанных на использовании конденсаторных батарей и пассивных фильтров (ПФ) приводит лишь к дальнейшему распространению гармоник, например из-за возникновения резонанса

между индуктивностью линий и параллельными конденсаторами КРМ. Вот почему в последние годы большое внимание уделялось «активным» устройствам подавления гармоник [4]–[9].

Одним из наиболее популярных решений для борьбы с гармониками является шунтовой активный фильтр (SAF) [4], [5], [9]. Его действие основано на генерации гармоник и/или реактивных токов в определенной точке системы. Для SAF было предложено несколько алгоритмов управления [6]–[9], при этом наиболее популярным являлся алгоритм, основанный на обобщенной теории активной и реактивной мощности [10], [11].

Данная статья посвящена решению описанной выше проблемы применительно к конкретной распределительной системе. Изменение конфигурации системы приводит к новым ограничивающим факторам на распределительных подстанциях (РП). Соответственно исследование гармоник производилось исходя из конфигурации системы в будущем. Искажения напряжения в различных точках системы при различных условиях работы конденсаторных батарей проверялись методом потоков мощности гармоник (harmonic flows) [12]. Первое предложение заключалось в увеличении существующей пассивной компенсации, однако такое решение приводило к появлению резонансов в области пятой и седьмой гармоник и неприемлемым уровням искажений. Поэтому в [13] было впервые предложено использовать альтернативное решение с использованием активного фильтра. Более тщательное изучение системы привело к новым данным об уровнях мощностей, подлежащих компенсации, и показало, что в системе отсутствует компонент нулевой последовательности, а величина основной гармоники токов обратной последовательности незначительна. При этом в питающую подстанцию системе с напряжением 132 кВ гармоники и асимметрия фаз практически отсутствовали. Как следствие, данный случай представляется идеальным с точки зрения компенсации при помощи шунтовых (включенных параллельно с сетью) активных или комбинированных фильтров. Возможный вариант комбинированного активного фильтра предложен в данной статье. Указанный фильтр тщательно исследован путем моделирования его поведения как в установившихся, так и переходных режимах.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Сложнозамкнутая сеть (meshed network) с напряжением 132 кВ, к которой подключена рассматриваемая подстанция, питается от системы с напряжением 500 кВ. Необходимость улучшения качества напряжения на уровне 13,8 кВ привела к необходимости использования новых средств компенсации [12]. Нагрузки различных подстанций представлены как промышленными, так и жилыми объектами. Как следствие, установление источников гармоник в данном случае сложнее, чем в случае только промышленных нагрузок. Поэтому в данном случае необходимо построение модели, основанной на результатах «полевых» измерений.

На рис.1 показана однолинейная схема модели системы, принятой для исследуемой подстанции. Трехфазная модель сети была реализована в среде MATLAB/Simulink Power System Blockset (PSB).

Рукопись была получена 14 февраля 2008; пересмотрена 24 сентября 2008. Первоначальная публикация состоялась 31 октября 2008; данная версия опубликована 27 февраля 2009. Поддержка данной работы обеспечивалась Технологическим институтом электрооборудования (инженерный факультет) Национального университета Ла-Плата (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)), FONCyT-ANPCyT, а также Национальным Советом по исследованиям в технике (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)).

V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri и P. L. Arnera работают в Технологическом институте электрооборудования (лаборатории высокого напряжения (инженерный факультет)) при Национальном университете Ла-Плата, 1900 La Plata, Argentina (e-mail: iitree@iitree-unlp.org.ar)

M. I. Valla работает в Национальном Совете по исследованиям в технике, 1033 Buenos Aires, Argentina, а также в Лаборатории промышленной электроники (управление и измерения) Департамента электротехники инженерного факультета Национального университета Ла-Плата, 1900 La Plata, Argentina (e-mail: m.i.valla@ieee.org).

Цифровой идентификатор объекта: 10.1109/TIE.2008.2007997

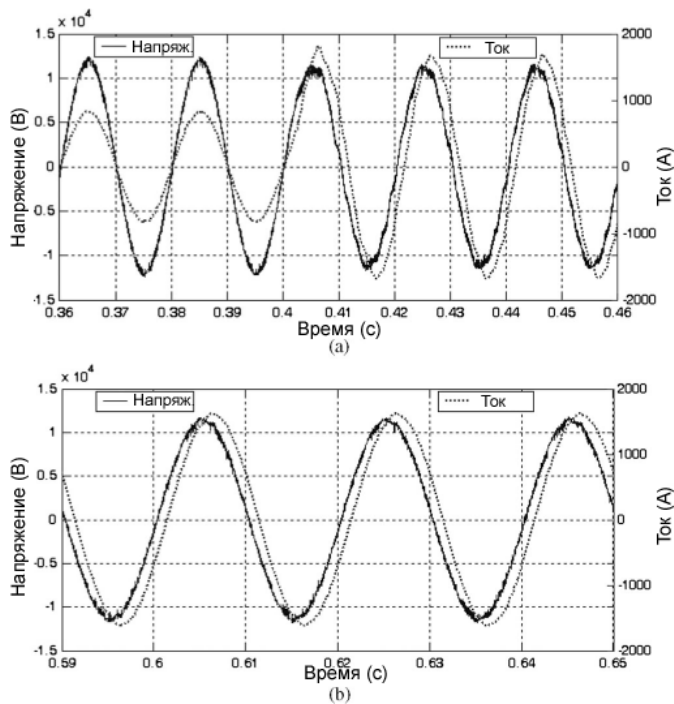


Рис. 12. Напряжение и ток на шине 13.8 кВ при набросе нагрузки от 50% до 100%. (а) Переходный процесс. (б) Установившийся режим.

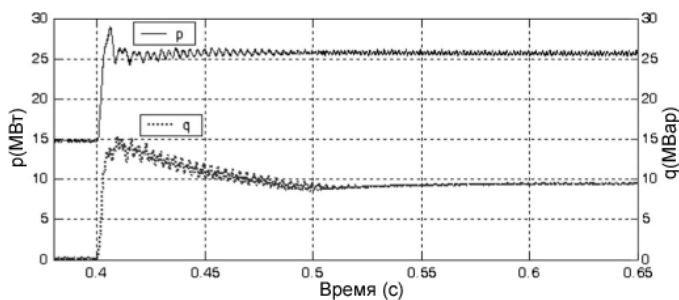


Рис. 13. Действительная и мнимая мощности на шине 13.8 кВ при набросе нагрузки от 50% до 100%.

На рис.12(а) показаны переходные осциллограммы напряжения и тока после наброса нагрузки. Амплитуда тока в системе возрастает из-за возрастания нагрузки. Амплитуда напряжения снижается, поскольку мощность КРМ, генерируемая SAPF, остается постоянной ($Q_C=9.6$ МВар). Во время переходного процесса искажения тока и напряжения увеличиваются. На рис.12(б) можно видеть, что по завершении переходного процесса SAPF обеспечивает полную компенсацию нежелательных гармоник.

На рис.13 показаны переходные процессы для мощностей на шине 13.8 кВ. Компенсация реактивной мощности показана на нижнем графике (мнимая часть мощности). В момент $t=0.4$ с нагрузка возрастает с 50% до 100% максимального значения. После переходного процесса длительностью 100 мс постоянная составляющая мнимой мощности соответствует полной нагрузке за вычетом 9.6 МВар (генерируемая SAPF мощность компенсации). При этом переменная составляющая практически полностью подавляется SAPF.

Действие CCSI показано на рис.14. Здесь показан ток, формируемый преобразователем, и напряжение в ЗПТ при набросе нагрузки от 50 до 100%. Верхний график соответствует току одной из фаз на входе РСС². Величина его основной гармоники соответствует КРМ в 4.8 МВар, а прочие гармоники представляют собой гармоники, генерируемые нагрузкой, частично скомпенсированные настроенным ПФ. На нижнем гра-

фике можно видеть просадку напряжения (порядка 5%) при набросе нагрузки от 50 до 100% ($t=0.4$ с).

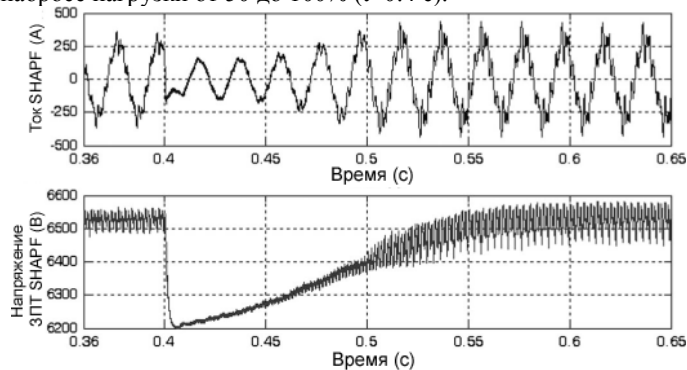


Рис. 14. Изменение нагрузки. Ток, втекающий в РСС, и напряжение звена постоянного тока CCSI.

Таблица VII.
МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Случай	Q_C (МВар)	P (МВт)	Q (МВар)	V_1 фазн. (кВ, д.з.)	THD _V (%)	I_1 лин. (А, д.з.)	THD _I (%)	$\cos \varphi$
Симметр.	9.6	25.7	9.45	8037	0.99	1135	0.57	0.94
Несимметр.	9.6	25.65	9.16	8029	1.23	1143	1.71	0.94

Таблица VIII. ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ГАРМОНИК И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ТРЕБУЕМЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Напряжения гармоник	Q_C (9.6 МВар)		Пределы IEEE
	Симметр.	Несимметр.	
V_3 (%)	0	0.63	3
V_5 (%)	0.12	0.11	3
V_7 (%)	0.05	0.12	3
V_9 (%)	0	0.23	3
V_{11} (%)	0.58	0.59	3
V_{13} (%)	0.53	0.57	3
THD _V (%)	0.99	1.23	5

В течение 150 мс происходит восстановление уровня напряжения. На графике видны колебания с частотой 12-й гармоники, обусловленные переменной составляющей мгновенной активной мощности. В рассматриваемом случае подавление 5-й и 7-й гармоник обеспечивается преимущественно ПФ, поэтому колебания напряжения в основном связаны с наличием 11-й и 13-й гармоник.

Результаты компенсации с помощью SAPF на шине 13.8 кВ сведены в таблицу VII.

В таблице VIII приведены напряжения гармоник и THD_V при компенсации с помощью SAPF, а также пределы, установленные IEEE [15]. Напряжения индивидуальных гармоник оказываются значительно ниже допустимых значений.

V. ВЫВОДЫ

В данной работе предложена схема комбинированного активного фильтра, предназначенного для компенсации реактивной мощности, небалансов нагрузки и высших гармоник в распределительных системах среднего напряжения. В предложенном решении используется существующая конденсаторная батарея; для дополнительной компенсации использован активный фильтр. Конденсаторная батарея доработана до узкополосного фильтра с частотой настройки, лежащей вблизи частоты 5-й гармоники. Предложенная система имеет очень высокую эффективность и может оказаться дешевле использования шунтового активного фильтра за счет использования уже имеющихся в системе конденсаторов, благодаря чему снижается требуемая мощность инвертора.

Предлагаемый SAPF является отличным решением для систем электроснабжения с близкими к идеальным генерирующими мощностями и нагрузками с малой асимметрией. Решение

² По всей видимости, речь идет о регуляторе тока (power current controller), в оригинале расшифровок аббревиатур РСС и SHAPF не дается. – прим.перев.

задач компенсации в системах с большими искажениями формы и небалансами требует применения более сложных устройств компенсации, например, универсального контроллера качества энергии (universal power quality controller).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara и Т. J. E. Millerin, Управление энергосистемами с помощью силовой электроники (Newnes Power Engineering Series). Shropshire, U.K.: Newnes, 2002.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserge и A. V. Timbus, “Обзор способов управления и синхронизации с сетью в распределенных системах генерации энергии,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 53, № 5, с. 1398–1409, Окт. 2006.
- [3] J. Arrillaga и N. R. Watson, *Гармоники в энергосистемах*, второе издание, Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [4] H. Akagi, “Активные фильтры гармоник,” *Prm* 93, № 12, с. 2128–2141, Дек. 2005.
- [5] B. Singh, K. Al-Haddad и A. Chandra, “Обзор активных фильтров для повышения качества электроэнергии” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 46, № 5, с. 960–971, Окт. 1999.
- [6] B. Singh, V. Verma и J. Solanki, “Селективная компенсация на основе нейронных сетей для повышения качества электроэнергии в распределительной системе,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 54, № 1, с. 53–60, Фев. 2007.
- [7] D. O. Abdeslam, P. Wira, J. Merckle, D. Flieller и Y. Chapuis, “Унифицированная архитектура нейронной сети для активных фильтров,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 54, № 1, с. 61–76, Фев. 2007.
- [8] B. R. Lin и С. H. Huang, “Реализация трехфазного активного фильтра с фиксирующим конденсатором при наличии асимметрии,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 53, № 5, с. 1621–1630, Окт. 2006.
- [9] K. K. Shyu, M. Yang, Y. M. Chen и Y. F. Lin, “Адаптивная система управления с эталонной моделью для шунтовых активных фильтров,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 55, № 1, с. 97–106, Янв. 2008.
- [10] H. Akagi, E. Watanabe и M. Aredes, *Теория мгновенной мощности и ее применение для повышения качества электроэнергии* (IEEE Press Series on Power Engineering), New York: Wiley, 2007.
- [11] R. S. Herrera, P. Salmerón и H. Kim, “Использование теории мгновенной мощности в задачах компенсации с помощью активных фильтров: различные подходы, расчеты и экспериментальные результаты,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, том 55, № 1, с. 184–196, Янв. 2008.
- [12] V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera и M. I. Valla, “Характеристики нагрузок в сетях среднего напряжения с точки зрения использования активных фильтров,” в *Proc. IEEE PES Transmiss. Distrib. Conf.—Exposition Latin America*, Caracas, Venezuela, Авг. 2006, с. 1–7.
- [13] V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera и M. I. Valla, “Компенсация реактивной мощности и гармоник в сетях среднего напряжения с помощью активных фильтров,” в *Proc. IEEE ISIE*, Vigo, Spain, Июнь 2007, с. 2510–2515.
- [14] “Специальная публикация IEEE (IEEE PES special publication) ‘Учебное пособие по моделированию и расчетам гармоник’,” 1998. Номер по каталогу IEEE: 98TP125-0.
- [15] *Рекомендуемые процедуры и требования при контроле уровня гармоник в энергосистемах*, IEEE Std. 519-1992.
- [16] N. G. Hingorani и L. Gyugyi, *Введение в FACTS: принцип действия и технологии гибких систем передачи переменного тока*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999.
- [17] M. Aredes, L. F. C. Monteiro и J. M. Miguel, “Алгоритмы управления для последовательных и параллельных активных фильтров,” в *Proc. IEEE PowerTech Conf.*, Bologna, Italy, Июнь 2003, том 2.
- [18] H. Akagi, “Новые тенденции в использовании активных фильтров для повышения качества электроэнергии,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, том 32, № 6, с. 1312–1322, Ноябрь/Дек. 1996.
- [19] S. Bhattacharya и D. Divan, “Активные фильтры между подстанциями и промышленными нагрузками,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron., Drives Energy Syst. Ind. Growth*, Янв. 1996, том 2, с. 1078–1084.