

АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Алексеев Б.А., канд. техн. наук, ОАО «ВНИИЭ»

В число базовых устройств для «гибких» (управляемых) линий электропередач переменного тока (FACTS) входят активные и гибридные фильтры высших гармоник.

Этот сравнительно новый тип устройств наряду с пассивными фильтрами применяется для очистки напряжения и токов сети от гармоник, а также для сглаживания возмущений в системе.

Потребность в их применении возникла с увеличением в сетях нелинейных нагрузок: схем с силовыми диодами и тиристорами, циклоконвертеров, регулируемого электропривода. Требования повышения качества электроэнергии растут вместе с масштабом применения электронных и микроэлектронных устройств в схемах управления и защиты сетей. Нормы на гармоники тока и напряжения заданы стандартами IEEE 5619-1992 и МЭК 61000. Еще одна задача повышения качества электроэнергии — компенсация фликкера воздействия потребителей с резкопеременной нагрузкой.

Проблема повышения качества электроэнергии весьма актуальна и для российских электрических сетей. Разработан комплексный план внедрения устройств на основе силовой электроники, к которым относятся и активные фильтры [1, 2].

Пример типичного содержания гармоник в современной сети (одна из энергосистем Японии):

Напряжение сети:	Сети более 154 кВ	154-22 кВ	6,6 кВ _{быт.}	6,6 кВ _{комм.}
Все гармоники макс., %	2,8	3,3	3,5	4,6
Все гармоники мин., %	1,1	1,4	3,0	2,1
5-я гармоника макс., %	2,8	3,2	3,4	4,3
5-я гармоника мин., %	1,2	1,0	1,3	2,9

Допустимые величины для суммы всех гармоник, принятые в Японии, — 5 %, для пятой гармоники — 3 %. Реальные величины могут быть и выше допустимых: ночью в распределительной сети 6,6 кВ из-за резонансов компенсирующих устройств появляется до 7 % 5-ой гармоники.

Традиционные пассивные фильтры

Для защиты от гармоник, вызванных наличием в сети нелинейных нагрузок, используются пассивные фильтры, включаемые параллельно источнику гармоник, как настроенные на определенную гармонику, так и фильтры верхних частот.

Варианты схем пассивных фильтров:

– настроенные фильтры: с последовательным соединением R-L-C либо с цепочкой R-L-C, включенной последовательно с параллельной цепочкой R-C/L-R;

– фильтры верхних частот: звено R-C (первого порядка) либо звено C-RL или C-RC параллельно с L (второго порядка).

Для тиристорных выпрямителей обычно применяются фильтры, настроенные на 5-7-11-13-ю гармоники и плюс фильтр верхних частот — на 17-ю гармонику и выше. Добротность фильтров обычно составляет от 20 до 100.

Применяются пассивные фильтры дополнительно и для коррекции коэффициента мощности индуктивной нагрузки.

При расчете точки подключения фильтра учитывается возможность резонансов, которые могут вызвать перегрузки фильтров.

Недостатками пассивных фильтров являются значительные капитальные затраты на реактивные элементы, большие требуемые площади. Им свойственно снижение эффективности фильтрации при колебаниях частоты и температуры элементов схемы.

Ограничение числа звеньев фильтра вызывает ухудшение фильтрации.

Этих недостатков лишены фильтры, активно воздействующие на защищаемый от гармоник участок сети с помощью схем силовой электроники, управляемых маломощной схемой выделения гармоник в точке присоединения (активные фильтры) [3, 4].

Широкие возможности активных фильтров позволяют использовать их для решения большинства задач кондиционирования качества электроэнергии — это и фильтрация гармоник, их подавление практически вплоть до полной ликвидации, и управление реактивной мощностью для коррекции $\cos\varphi$ и регулирования напряжения, и балансирование несимметрии нагрузки, и снижение фликкера, и др.

Основные принципы работы активных фильтров были сформулированы еще в 70-х гг. прошлого столетия, однако практическое применение они нашли значительно позже благодаря развитию силовой электроники, особенно — освоению мощных транзисторов IGBT и MOSFET. Реализация активных фильтров стала возможной после коммерческого выпуска по приемлемой цене цифровых процессоров, АЦПУ, датчиков Холла по напряжению и току, изолирующих усилителей.

Типичная схема чисто активного фильтра включает шунтирующий-управляемый выпрямитель с емкостной нагрузкой на стороне постоянного тока. Он может

быть включен через трансформатор параллельно нелинейной цепи либо через последовательно врезанный в линию питания трансформатор.

Управляющая часть схемы включает контроллер, реагирующий на мгновенные значения тока нагрузки, выделяющий ток гармоник и вырабатывающий сигнал управления силовой частью. Силовая электроника через трансформатор связи выдает компенсирующий ток в противофазе с токами гармоник, в результате чего они подавляются в степени, зависящей от коэффициента усиления управляющей схемы. На рис. 1 приведена упрощенная схема шунтирующего активного фильтра.

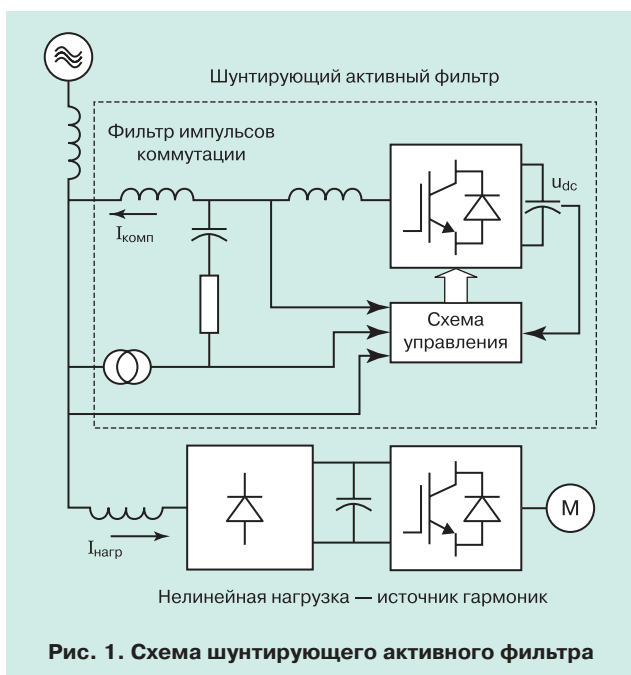


Рис. 1. Схема шунтирующего активного фильтра

В последовательной схеме активного фильтра он вырабатывает компенсирующее напряжение, подавляющее ток гармоник.

Силовая часть активного фильтра включает трансформатор связи и преобразователь на силовой электронике. Преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) может выполняться как по схеме источника напряжения, так и по схеме источника тока. Чистые активные фильтры чаще используют преобразователь по схеме источника напряжения с ШИМ и накопительным конденсатором как звеном постоянного тока. Такая схема по сравнению со схемой источника тока выигрывает по стоимости, размерам и КПД.

Активный фильтр, включаемый параллельно нагрузке, применяется, в основном, для снижения уровня гармоник тока, вызываемых наличием нелинейных устройств, входящих в состав нагрузки.

Включаемый последовательно в линию активный фильтр, кроме основной функции подавления гармоник тока, может использоваться для регулирования напряжения основной гармоники в узком диапазоне значений, а также для демпфирования нарушений качества электроэнергии — несимметрии напряжений и фликера при работе в сети таких потребителей,

как дуговые печи или мощные электродвигатели с частыми пусками.

Применение активных фильтров

Однофазные активные фильтры широко применяются, главным образом, в маломощных установках и в транспортных сетях. Для применения в мощных электрических сетях главное значение имеют трехфазные активные фильтры.

Трехфазные активные фильтры выполняются на преобразователях как по схеме источника тока (ИТ), так и источника напряжения (ИН). Модули на мощных транзисторах IGBT больше подходят для схемы ИН, в схемах ИТ применяются в основном GTO-тиристоры.

Анализ при выборе управляемых вентилях для активного фильтра на напряжение 400 В и мощность 100 кВА показывает, что потери в фильтре по схеме ИН-ШИМ на транзисторах IGBT меньше, чем для схемы ИТ-ШИМ на GTO-тиристорах. В обеих схемах имеется сглаживающий фильтр коммутационных импульсов. Активный фильтр по схеме ИН эффективно гасит гармоники от 5-й до 25-й. Частоту ШИМ-преобразователя желательно выбирать выше 10 кГц. Запасающий энергию в звене постоянного тока конденсатор действует аналогично другим видам накопителей, например, сверхпроводниковым индукционным (СПИН).

Пример выпускаемых активных фильтров — продукция компании Fuji Electric. Это фильтры мощностью 10–400 кВА на транзисторах IGBT, непосредственно устанавливающиеся в сети 200–440 В. Для сети средних напряжений требуется промежуточный трансформатор. Объекты для установки фильтров — промышленные предприятия, офисы, здания, больницы, системы водоснабжения и транспорт.

Конкретный пример применения фильтра этой компании — развязка регулируемого электропривода на водонасосной станции, имеющей четыре насоса по 140 кВА, питаемые от инвертеров. Их работа существенно снижала качество электроэнергии на питающем фидере. За понизительным трансформатором 6,6 кВ/0,4 кВ 750 кВА на общие шины инвертеров и нескольких нагрузок был включен чисто активный фильтр мощностью 300 кВА, который не только снизил уровень гармоник на шинах, но и скорректировал коэффициент мощности индуктивной нагрузки.

Другой пример. Для снижения фликера в сети, связанной с двумя дуговыми печами мощностью 32 и 8,6 МВА, применен разработанный совместно компаниями Toshiba и Mitsubishi активный фильтр мощностью 21 МВА на IEGT-транзисторах (Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor) 4,5 кВ 1,5 кА. Транзисторы IEGT имеют втрое меньшие размеры, чем конкурирующие с ними GTO-тиристоры, фильтр на них имеет вдвое меньшие потери, чем на GTO-тиристорах.

Преобразователь этого активного фильтра состоит из 12 однофазных H-образных мостов (48 транзисторов IEGT) и многообмоточного трансформатора. Каждый мост имеет на стороне постоянного напряжения шунтирующий ограничитель перенапряжения.

На рис. 2 показана схема фильтра (а) и звена преобразователя с IEGT-транзисторами (б).

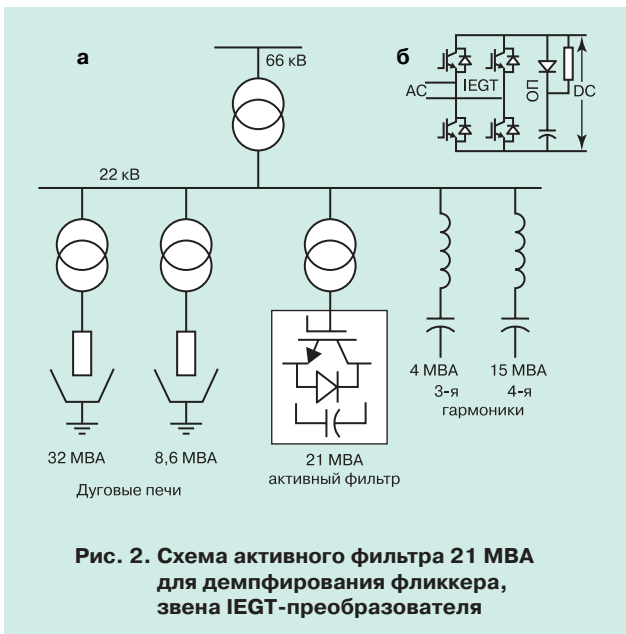


Рис. 2. Схема активного фильтра 21 МВА для демпфирования фликера, звена IEGT-преобразователя

Эффективность этого активного фильтра оценивается по индексу фликера «DV100» (колебания напряжения при частоте 10 Гц, приведенные к 100 В), который снижается при включении фильтра с 1,3 В до 0,5 В.

Компания Toshiba разрабатывает следующую версию этих транзисторов (trench-gate) с еще значительнее уменьшенными потерями проводимости и коммутации.

Гибридные фильтры

Ограничивает применение чисто активных фильтров их высокая стоимость, определяемая большой мгновенной мощностью, необходимой для фильтрации. Чисто активные фильтры должны при этом выдавать полную мощность нелинейной нагрузки по максимальным величинам токов и напряжений.

Выход из положения — комбинация активных фильтров с простыми и надежными, хорошо освоенными пассивными фильтрами (гибридные фильтры). Недостаток пассивных фильтров — невозможность управления их параметрами при изменении режима работы нагрузки устраняется в гибридных за счет возможности управления реактивными параметрами с помощью активной части схемы.

Первые схемы серийного и шунтирующего гибридных фильтров были предложены в конце 80-х гг.

Мощность активной части гибридного фильтра снижается при этом более, чем на порядок по сравнению с параллельным активным фильтром. Устраняется противоречие между высокой добротностью пассивного фильтра и его неустойчивостью в динамических режимах работы. Особенно важно это при большой требуемой мощности фильтра.

Автоматическая коррекция параметров гибридных фильтров при изменениях режима в сети дает следующие преимущества:

- коррекция частотных характеристик в статических режимах работы сети;
- снижение отрицательного воздействия на фильтрацию от изменения частоты и параметров элементов фильтра во время работы;
- исключение возникновения резонансов на частотах, близких к фильтруемой гармонике;
- демпфирование резонансных явлений в пассивных элементах фильтров;
- снижение уровня гармоник тока в сети от разных источников высших гармоник.

Гибридные активные фильтры выполняются обычно по схеме источника напряжения на ШИМ-преобразователях и включают пассивные компоненты R-L-C. На рис. 3 показана схема гибридного фильтра последовательного типа.

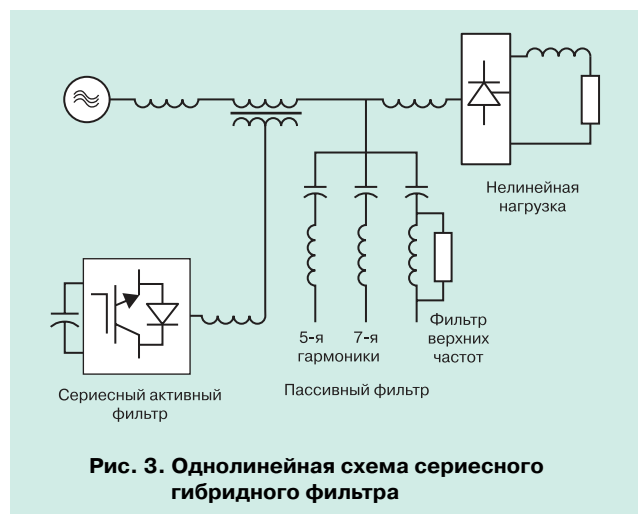


Рис. 3. Однолинейная схема серийного гибридного фильтра

Примером типичной схемы является комбинация активного фильтра, трехфазного трансформатора и пассивного фильтра из двух настроенных фильтров LC на 5-ю и 7-ю гармоники и фильтра верхних частот второго порядка на 11-ю гармонику и выше. Эта комбинация позволяет снизить мощность активного фильтра. Так, для снижения уровня гармоник от питания диодного выпрямителя 480 В мощностью 20 кВт была достаточна шунтирующая схема с пассивным фильтром на 5 кВА, включенным последовательно с активным фильтром мощностью 1,6 кВА. Полное содержание гармоник в токе не превышало 5%. Чисто активный фильтр на эти параметры имел бы мощность 12,6 кВА и его нужно было бы выполнять на IGBT-транзисторах. Гибридный фильтр был выполнен на более экономичных MOSFET-транзисторах.

Схема подключается без трансформатора, непосредственно к сети, не требуется фильтров коммутационных импульсов 10 кГц, напряжение которых на порядок ниже у гибридной схемы.

Вариант схемы для средних напряжений — на мощность выпрямительной нагрузки 1000 кВт и напряжение 4,16 кВ. Напряжение на накопительной емкости — 750 В. Активный фильтр мощностью 40 кВА имеет трехуровневый ШИМ-преобразователь 10 кГц

на IGBT-транзисторах (на 600 В или 1,2 кВ) и цепочках диодов, пассивный фильтр имеет мощность 250 кВА.

Гибридный фильтр, состоящий из серийного активного фильтра и шунтирующего пассивного фильтра, применен для подавления гармоник в сети, питающей демонстрационный высокоскоростной поезд на магнитной левитации в Yamanashi (Япония). В этой схеме активный фильтр также демпфирует гармонический резонанс между пассивным фильтром и реактивным сопротивлением сети.

Активные фильтры для линий электропередачи постоянного тока

Выпрямительно-инвертерные схемы на концах высоковольтных линий постоянного тока (ВЛПТ) при своей работе создают большое количество высших гармоник тока как в подводных линиях переменного тока, так и в самой передаче на стороне постоянного тока. Это происходит из-за выполнения особо мощных преобразователей на обычных тиристорах с управляемым включением. Управление только зажиганием тиристоров вызывает также снижение коэффициента мощности питания ВЛПТ со стороны переменного тока и потребность в компенсирующих средствах большой мощности.

Обычное решение для снижения уровня тока высших гармоник — применение пассивных фильтров в сочетании с компенсирующими устройствами или синхронными компенсаторами реактивной мощности.

С появлением активных фильтров появилась возможность значительно снизить уровень гармоник в линии либо существенно снизить стоимость устройств фильтрации. Активные фильтры ВЛПТ снижают уровень гармоник в 10 раз сильнее пассивных в диапазоне 300-3000 Гц. Этого достаточно также для компенсации влияния изменений частоты в сети и расстройки пассивных фильтров.

В настоящее время работают 14 активных фильтров на стороне постоянного тока и один — на стороне переменного тока. Главная задача фильтров на стороне постоянного тока — снизить помехи от высших гармоник, воздействующих на каналы связи, защиты и управления.

Для активного фильтра на стороне постоянного тока наиболее удачна схема с активным фильтром, включенным последовательно с пассивным (рис. 4).

Датчик гармоник тока в линии для этой схемы — катушка Роговского, с которой по световоду передается мгновенное значение тока для использования в системе управления фильтром. Питание датчика производится от тока гармоник, протекающего через фильтр, ширина полосы частот работы датчика достаточна для гармоник высоких порядков.

Цифровая система управления имеет усилитель с рабочей полосой до 3 кГц с частотой квинтирования 10 кГц на базе MOSFET- или чаще IGBT-транзисторов.

Напряжение на выходе трансформатора 300-1000 В в соответствии с рабочим напряжением активного

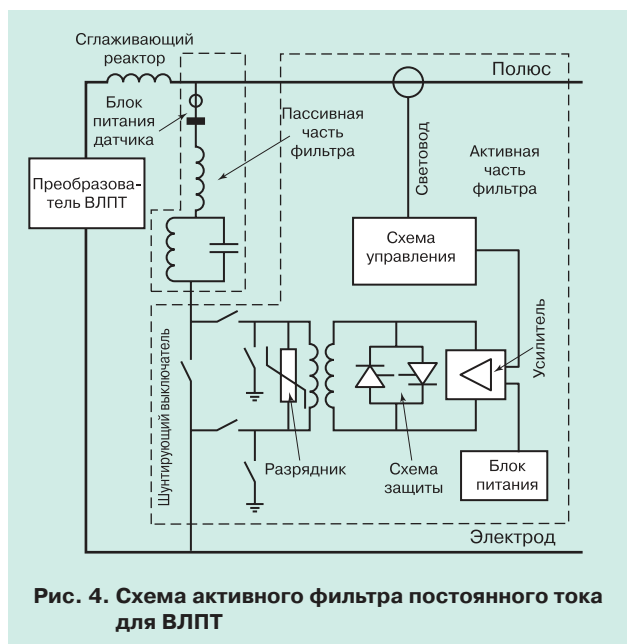


Рис. 4. Схема активного фильтра постоянного тока для ВЛПТ

фильтра 3 кВ. Имеется схема защиты усилителя и преобразователя, ограничивающая токи и напряжения, а также разрядник для защиты от перенапряжений.

Соответствующие шунтирующие схему активного фильтра выключатели и разъединители дают возможность работать пассивному фильтру самостоятельно, например, при проведении ревизии активного фильтра без отключения ВЛПТ.

Цифровое и физическое моделирование активного фильтра на стороне постоянного тока, проведенное ОАО НИИПТ, показало, что включение такого фильтра снижает переменную составляющую выпрямленного тока преобразователей в несколько десятков раз [5].

Для активного фильтра на стороне переменного тока лучшей схемой является последовательное его включение с существующим пассивным фильтром. На рис. 5 приведена реальная схема такого гибридного фильтра.

В качестве преобразователя для активного фильтра НИИПТ предложил схему СТАКМОА с трехуровневым ШИМ-преобразователем и векторным управлением. Эта схема позволяет также использовать ее в качестве компенсатора реактивной мощности. Исследования на цифровой модели показали возможность снижения уровня гармоник тока в сети в 30-80 раз при работе этого фильтра [5]. Использование схемы СТАКМОА для фильтрации высших гармоник применено, в частности, на тяговых подстанциях во Франции и на подстанции ВЛПТ Cheyu в Южной Корее.

Примеры реализации активных фильтров на стороне постоянного тока ВЛПТ

- Активный фильтр DC на преобразовательной подстанции Lindome (Швеция) подводной кабельной линии постоянного тока Konti-Scan (работает с 1991 г.).

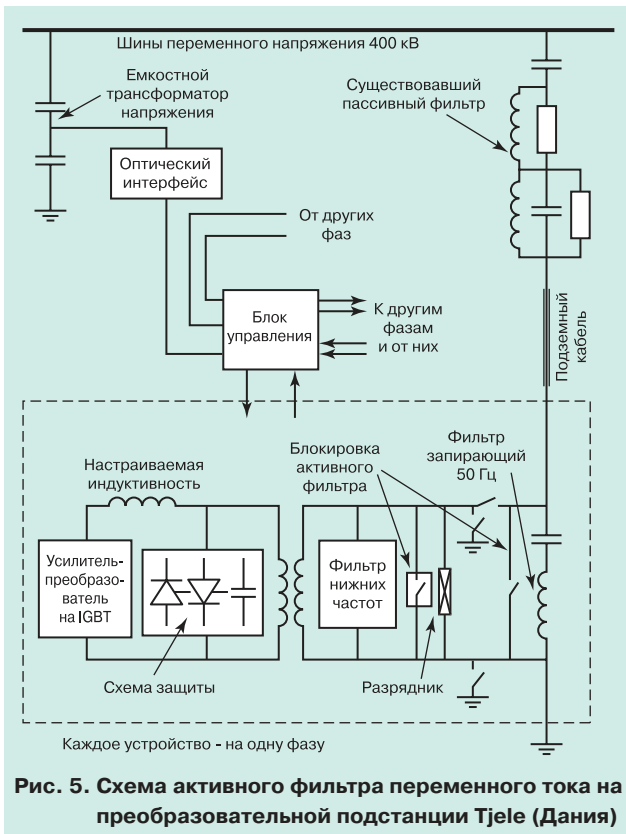


Рис. 5. Схема активного фильтра переменного тока на преобразовательной подстанции Tjele (Дания)

- Кабельная линия Baltic Cable имеет два пассивных двунастроенных на 12/24-е гармоники и активный фильтр на подстанции Kruseberg со стороны Швеции. Активный фильтр включен между полюсом и землей.

- ВЛПТ Chandrapur-Padghe (Индия) имеет четыре активных фильтра, состоящих из пассивных двунастроенных фильтров 2/6-й гармоник и широкополосного на 12/24-е гармоники с активной частью. Активный фильтр заменяет одну дополнительную ветвь с пассивным фильтром в каждом полюсе.

- Подстанции ВЛПТ Tian-Guang (КНР) имеют фильтр, состоящий из пассивной части (двунастроенный фильтр на 12/24-гармоники с демпфирующим сопротивлением) и активной части. На каждой подстанции имеется резервный фильтр на стороне постоянного тока, подключаемый разъединителем вместо фильтра на любом полюсе. Для обеспечения непрерывной работы установлено всего шесть активных фильтров и четыре пассивных.

- Первая очередь ВЛПТ EGAT-TNB Interconnection (Тайланд-Малайзия) работает как монополюс с металлическим обратным проводом. Каждая подстанция ВЛПТ имеет фильтр из пассивной двунастроенной части на 12/24-гармоники и активной части.

На стороне переменного тока успешно работает активный фильтр на подстанции Tjele (Дания), установленный в 1988 г. фирмой Siemens и эксплуатируемый энергокомпанией Eltra. Активный фильтр соединен со схемой через один из пассивных фильтров. Его функции — снижение гармоник на шинах

400 кВ. Режимы выбраны для ликвидации 23-25-35-37-47 и 49-й гармоник и снижения 5-й гармоники, идущей в основном из сети [6]. На рис. 5 показана схема этого фильтра.

Линейный усилитель работает на IGBT-транзисторах по схеме источника напряжения с емкостным накопителем. Управляющее фильтром коммутирующее устройство выполнено также на IGBT-транзисторах.

Входная величина напряжения на шинах 400 кВ передается с трансформатора напряжения по оптоволоконному кабелю на активный фильтр. Выделенные гармоники преобразуются по фазе и подаются на усилитель-преобразователь с ШИМ на IGBT-транзисторах. Выход активного фильтра через последовательно включенный пассивный фильтр подается на шины переменного напряжения 400 кВ.

ВЫВОДЫ

Прогресс в области силовой электроники дал возможность создать эффективное средство кондиционирования качества электроэнергии — активные фильтры.

Кроме фильтрации гармоник, активные фильтры способны демпфировать фликкер, выравнять напряжения при асимметрии, корректировать коэффициент мощности нагрузки.

На практике мощные активные фильтры выполняются гибридными — сочетанием активного и пассивного фильтров.

Силовая часть активных фильтров выполняется чаще всего по схеме источника напряжения с преобразователем на IGBT-транзисторах.

Наиболее мощные активные фильтры применяются на ВЛПТ как на стороне постоянного тока (защита от помех каналов связи и управления), так и на стороне переменного тока (защита прилегающей сети от гармоник).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Перспективы применения в ЭЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока. — Электротехника, 2004, № 8.
2. Розанов Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники. — Электричество, 2005, № 7.
3. Rudnick H., Dixon J., Moran L. Поставка чистой электроэнергии. IEEE Power & Energy Magazine, 2003, 1, No 5, 32-40.
4. Hirofumi Akagi. Активные фильтры гармоник. Proc.of the IEEE, 2005, 93, No 12, 2128-2141.
5. Лозина Н.Г., Мазуров М.И., Николаев А.В. Подавление высших гармоник в схемах передач постоянного тока с применением активных фильтров. — Электрические станции, 2005, № 12.
6. РГ 14.28 СИГРЭ Активные фильтры для ВЛПТ. Electra 2005, April, No 207, 45-49.