



Г. М. Мустафа



С. И. Гусев

Активные фильтро-компенсирующие устройства шунтирующего и серийного типа в электрических сетях

МУСТАФА Г. М., канд. техн. наук
ГУСЕВ С. И., канд. техн. наук
ООО «НПП ЛМ Инвертор»
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12
Gusev-si@lm-inverter.ru

Рассматриваются вопросы использования широтно-модулированных модульных многоуровневых преобразователей (ММС) для компенсации реактивной мощности, активной фильтрации и симметрирования напряжения в промышленных сетях. Представление ММС, 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. Рассмотрены особенности различных видов активных фильтро-компенсирующих устройств шунтирующего и серийного присоединения к электрической сети, а также результаты их практического использования для нормализации напряжения в электрических сетях промышленных предприятий.

Ключевые слова: активная фильтрация, демпфирование, селективное подавление, баланс, алгоритм управления.

Проблема фильтрации гармоник в электрических сетях стала актуальной в связи с нарастающим распространением вентильных преобразователей электрической энергии, искажающих сеть, таких как:

электроприводы грузоподъемных механизмов (шахтный подъём), прокатных станов;

тиристорные выпрямители, работающие в циклично-импульсном режиме потребления электроэнергии (на электровозах переменного тока, в мощных электрофизических установках);

электродуговые печи постоянного и переменного тока;

многочисленные выпрямители частотно-регулируемого электропривода и многие другие.

Для фильтрации высших гармоник в электрических сетях широкое применение нашли шунтирующие резонансные LC-фильтры. Однако высокодобротная LC-цепь эффективно шунтирует соответствующую сетевую гармонику в стационарных условиях. В условиях динамично меняющейся нагрузки, когда амплитуды или фазы сетевых гармоник изменяются, высокодобротные

резонансные фильтры не способствуют улучшению ситуации и могут даже её ухудшать. Развитие преобразовательной техники вместе с проблемами привело к созданию нового класса устройств на основе использования мощных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и микропроцессорной техники, с помощью которых эти проблемы возможно разрешить.

Особая роль в развитии преобразовательных устройств принадлежит появлению концепции модульных многоуровневых конверторов (ММС)¹ [1, 2], позволившей получить эффективное техническое средство для осуще-

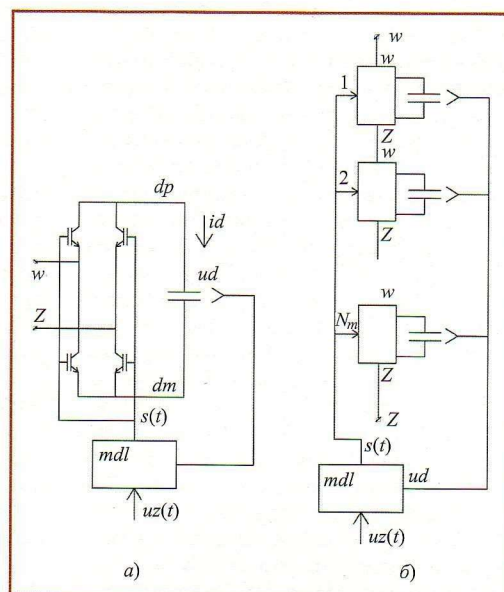
¹ ММС — modular multilevel converter.

Рис. 1. Однофазный мостовой ШИМ-преобразователь (а) и модульный многоуровневый преобразователь (ММС) (б), составленный последовательным соединением по портам переменного тока из N_m мостовых преобразователей

ствления активной фильтрации, симметрирования и компенсации реактивной мощности для электроэнергетических систем. Модульный многоуровневый конвертор составляется из однотипных модулей, каждый из которых является преобразователем напряжения, способным действовать в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 1 представлена модель одного из вариантов построения ММС, составленная из однофазных мостовых преобразователей напряжения, соединяемых последовательно по портам переменного напряжения. Такой вариант ММС оказался наиболее пригодным для создания активных фильтров для электрических сетей различных классов напряжения.

По своему интегральному действию в электрической сети ММС — широкополосный управляемый источник напряжения, усиливающий сигнал задания с высокой точностью. Сигнал задания может изменяться с высокой скоростью, в частности, он может содержать значительные по величине высшие гармоники. Выходное сопротивление ММС пренебрежимо мало в широком диапазоне частот. Даже при сильно искажённых быстроменяющихся токах исполнение задания ММС не нарушается.

Представление ММС 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 своё активное сопротивление (транзисторы, электронные лампы, СВЧ-приборы) под действием сигнала управления. Активные потери в таких элементах не позволяют создавать усилители мощности с коэффициентом полезного действия выше 50 %.

Способность осуществлять функции без активных потерь мощности (недиссипативность) усилителей на основе ММС позволяет создавать устройства большой мощности с высоким коэффициентом полезного действия, что открывает им «дорогу» в электроэнергетику. Таким образом, для создания силовых фильтров наряду с пассивными элементами (реакторами, конденсаторами, резисторами) становится возможным применение активного элемента — управляемого источника напряжения — усилителя мощности.

За последние годы в Российской Федерации разработаны теоретические и методические основы проектирования активных фильтро-компенсирующих и симметрирующих устройств (АФКУ) на основе ММС с ШИМ [2] и начато внедрение пилотных образцов АФКУ в сетях переменного тока класса 6 – 10 кВ промышленных предприятий [2, 3].

Виды активных фильтро-компенсирующих устройств

Для осуществления фильтрации напряжения сети может быть применено как шунтовое, так и серийное присоединение АФКУ, которые способны функционировать как в одном, так и другом варианте включения. Шунтирующее АФКУ связывает сторону высокого напряжения со стороной низкого напряжения или землёй и находится под полным напряжением линии переменного или постоянного тока (рис. 2, а). Серийное АФКУ подключается между потребителями и питающей сетью с искажённым напряжением и находится под действием полного тока нагрузки (рис. 2, б).

Действие шунтирующего АФКУ основано на том, что оно создаёт цепь с низким импедансом для фильтруемых гармоник, и тем самым напряжение гармоник в точке присоединения АФКУ также становится небольшим. При этом, если источником гармоник является питающая сеть, их компенсация происходит за счёт падения напряжения на суммарном реактансе сети L_s в точке присоединения. Если источником гармоник является нелинейный потреби-

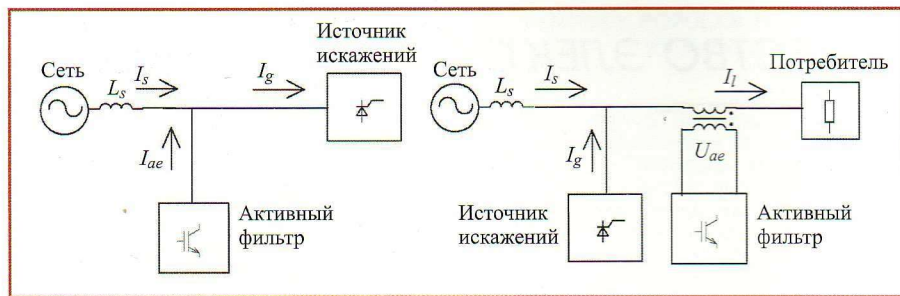


Рис. 2. Схемы шунтирующего (а) и серийного (б) присоединения активного фильтра:

L_s, I_s — реактанс и ток сети; I_g — ток источника искажений; I_{ae}, U_{ae} — ток и напряжение активного фильтра; I_l — ток фильтруемого присоединения

тель, то шунтирующее АФКУ перехватывает гармоники искажённого тока, не пропуская их в питающую сеть, и напряжение сети не искажается.

Основная часть ресурса (мощности) шунтирующего АФКУ расходуется на компенсацию обратной составляющей напряжения и на наиболее низкочастотную из высших гармоник (третью гармонику). Для высших гармоник тока ограничивающее сопротивление сети увеличивается пропорционально номеру гармоники, и вклад высших гармоник в нагрузку АФКУ получается незначительным. Из принципа действия шунтирующего АФКУ следует, чем меньше индуктивность питающей сети, тем больший ток должен создавать АФКУ для компенсации в первую очередь обратной последовательности, действующей на основной частоте сети (50 Гц), и тем больше мощность АФКУ. Напряжение на шунтирующем АФКУ при его работе практически синусоидально, а его ток состоит только из составляющих, необходимых для компенсации искажений:

- тока обратной последовательности;
- токов высших гармоник.

Шунтирующие АФКУ обеспечивают нормализацию качества напряжения для всех потребителей, присоединённых к сети в точке присоединения АФКУ. Возможно использование двух видов шунтирующих АФКУ:

- на основе СТАТКОМ, присоединяемого к шинам электрической сети непосредственно или через согласующий трансформатор;
- гибридной схемы, когда ММС присоединяется к шинам через конденсаторную батарею.

Активное фильтро-компенсирующее устройство на основе СТАТКОМ может одновременно выполнять все три функции, необходимые для нормализации качества напряжения:

- регулировать реактивную мощность;
- симметрировать напряжение (подавлять обратную составляющую напряжения);
- фильтровать высшие гармоники напряжения в динамичном режиме.

Гибридный шунтирующий активный фильтр, состоящий из последовательно

включённых конденсаторной батареи и активного элемента (ММС), позволяет обеспечить автоматически подстраиваемую фильтрацию и демпфирование гармоник в точке присоединения, как альтернативу использованию пассивных резонансных фильтров.

Серийный АФКУ также может одновременно выполнять все три функции, необходимые для нормализации качества напряжения, но исправляет форму напряжения только на отходящих линиях, противопоставляя искажающим составляющим сетевого напряжения такие же составляющие напряжения АФКУ. Использование серийного АФКУ эффективно для исправления ситуации с качеством электроэнергии для ответственных потребителей, питающихся от искажённой сети, общая нормализация качества напряжения которой с помощью шунтирующих фильтров является слишком затратной. Если нагрузка отходящих линий не имеет существенных искажающих факторов, то ток отходящих линий при нормальном питании — синусоидальный, ток серийного АФКУ совпадает с этим током. При этом напряжение серийного АФКУ складывается из одних только искажающих составляющих:

- напряжения обратной последовательности (при наличии);
- напряжений высших гармоник.

Сетевой реактанс на нормальные режимы серийной схемы не влияет. Для работы в аварийных и аномальных режимах серийный АФКУ должен быть оснащён тиристорным ключом и резервирующим контактором, шунтирующими обмотки согласующего трансформатора и обеспечивающим беспрепятственное протекание токов сети при коротком замыкании или при выводе АФКУ из работы.

Оценка мощности активных фильтро-компенсирующих устройств

Факторами, определяющими установленную мощность активного элемента АФКУ, являются две величины:

- наибольшее за период значение (амплитуда) напряжения активного элемента, U_{aem} ;

— наибольшее за период значение (амплитуда) фазного тока активного элемента, I_{aem} .

Требуемая мощность активного элемента (ММС) по этим двум величинам определяется как мощность эквивалентного синусоидального режима:

$$S_{ae} = 3 \frac{U_{aem} I_{aem}}{\sqrt{2} \sqrt{2}}. \quad (1)$$

При этом для шунтирующего варианта АФКУ U_{aem} является амплитудой синусоиды сетевого напряжения, а амплитуда фазного тока I_{aem} — арифметической суммой амплитуд токов гармоник, обеспечивающих компенсацию искажений напряжения. Для серийного АФКУ I_{aem} — амплитуда синусоиды сетевого тока, а U_{aem} — арифметическая сумма амплитуд искажающих гармоник. Такое определение мощности конвертора, работающего с несинусоидальными напряжениями и токами, является вполне пригодным для оценок, хотя оно и предполагает некоторую избыточность с учётом того, что часть гармоник может вычитаться из общей суммы.

Экономическая эффективность использования гибридного шунтирующего АФКУ по сравнению со СТАТКОМ обусловливается снижением уровня напряжения и, соответственно, мощности ММС за счёт последовательно включённой конденсаторной батареи.

Сравнительная оценка мощности ММС, необходимой для полного подавления гармоник в ситуации, имеющей место на ПС 220 кВ «Сковородино» [4], показывает, что мощность серийного АФКУ, необходимая для нормализации напряжения на линии, питающей нефтеперекачивающие станции, в 4 раза меньше мощности шунтирующего АФКУ, устраняющего искажения на общих шинах подстанции.

Алгоритм управления модульными многоуровневыми конверторами

Для управления ММС разработан так называемый DSB-алгоритм управления [1], заключающийся в последователь-

ном построении и совместном действии регуляторов трёх типов (рис. 3):

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

Основная переменная управления — задание напряжения $u_z(t)$ — образуется как трёхкомпонентная сумма:

$$u_z = u_{demp} + u_{bal} + u_{sel}. \quad (2)$$

Каждый из компонентов определяется своими обратными связями и выполняет свою функцию в комплексе задач конвертора.

Компонент D (демпфирование) образуется с помощью обратной связи по выходному току активного элемента i_{ae} в соответствии с равенством:

$$u_{demp}(t) = R_{ae} i_{ae}(t). \quad (3)$$

Она действует в точности как резистор R_{ae} , внесённый в выходную цепь активного элемента. Пропорциональная обратная связь по выходному току активного элемента создаёт виртуальный демпфирующий резистор, который без потерь активной мощности демпфирует переходные колебания сети не хуже, чем реальный резистор. Располагая активным элементом, вводить в схему фильтрации реальные демпфирующие резисторы незначем.

Компонент S (селективное подавление гармоник) образуется обратной связью по току с участием в образовании этой связи напряжения сети и обеспечивает селективное подавление для всей избранной совокупности гармоник. То, что система селективного подавления действует на фоне замкнутой широкополосной демпфирующей обратной связи, является существенным условием её реализации. Под действием демпфирования, по истечении достаточно малых промежутков времени или при достаточно медленных изменениях условий, фильтруемый ток быстро устанавливается, что позволяет выделить гармоники, требующие фильтрации.

Селективное выделение k -й высшей гармоники тока сети (i_{sk}) осуществляется путём умножения измеренного тока сети на k -й единичный орт обратной по-

следовательности $e^{-jk\theta}$. В результате выделяются комплексные амплитуды гармоник тока, а, следовательно, и токи высших гармоник

$$i_{sk}(\theta) = \vec{I}_{sk} e^{jk\theta}. \quad (4)$$

Здесь $i_{sk}(\theta)$ — k -я гармоника тока сети; \vec{I}_{sk} — комплексная амплитуда k -й гармоники тока сети; $\theta = \omega t$; ω — круговая частота; t — время.

В формировании задания комплексных амплитуд напряжений высших гармоник активного элемента \vec{U}_{selk} используется комплексная величина \vec{Y}_{k1} , равная значению стационарной передаточной характеристики системы на частоте k -й гармоники:

$$\vec{U}_{selk} = -\frac{1}{p\tau} \frac{\vec{I}_{sk}}{\vec{Y}_{k1}}, \quad (5)$$

где: p — оператор Лапласа, τ — постоянная времени интегратора.

Формирование задания на подавление всей совокупности избранных гармоник определяется выражением

$$u_{sel}(\theta) = \sum_k u_{selk}(\theta), \quad (6)$$

где k -я гармоническая составляющая напряжения конвертора определяется по полученному значению комплексной амплитуды напряжения \vec{U}_{selk} :

$$u_{selk}(\theta) = \vec{U}_{selk} e^{jk\theta}, \quad (7)$$

причём совокупность подавляемых гармоник может содержать канонические и неканонические гармоники, субгармоники и основную гармонику обратной последовательности.

В [1] было показано, что система селективного подавления гармоник с интегральной обратной связью сохраняет устойчивость в широком диапазоне

расхождений параметров сети (\vec{Y}_{k1}) от предполагаемых, т. е. является робастной (robust), что значительно упрощает требования к точности отображения этих параметров в алгоритме системы управления.

Необходимость компонента B (баланс) алгоритма управления вызвана тем, что при работе в качестве активного элемента ММС не пересылает энергию из одной сети в другую, и накопительные конденсаторы не присоединяются к источнику или стоку постоянного напряжения, т. е. являются «подвешенными», их напряжение не может поддерживаться параметрически. Задача решается путём поддержания баланса мощности, а, следовательно, напряжений накопительных конденсаторов звеньев постоянного напряжения модулей ШИМ конвертора с помощью обратной связи по их напряжениям. Для регулирования баланса используется

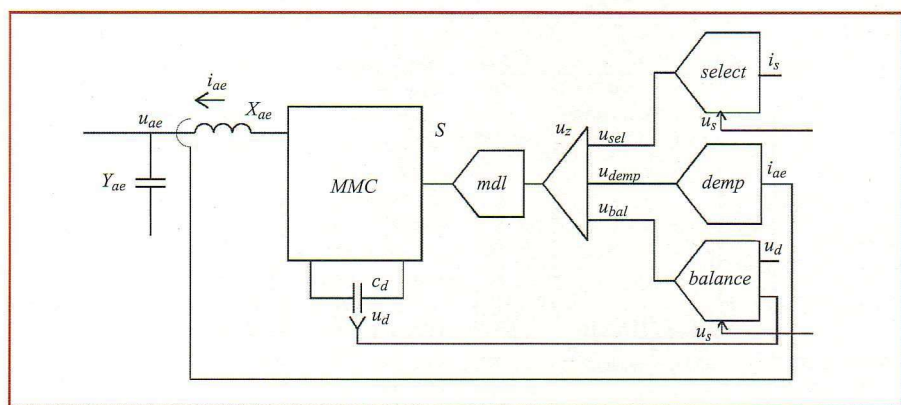


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления активным элементом на основе ММС:

mdl — ШИМ-модулятор; X_{ae} , Y_{ae} — фильтр ШИМ-пульсаций; S — переключательная функция; u_s , i_s — напряжение и ток сети

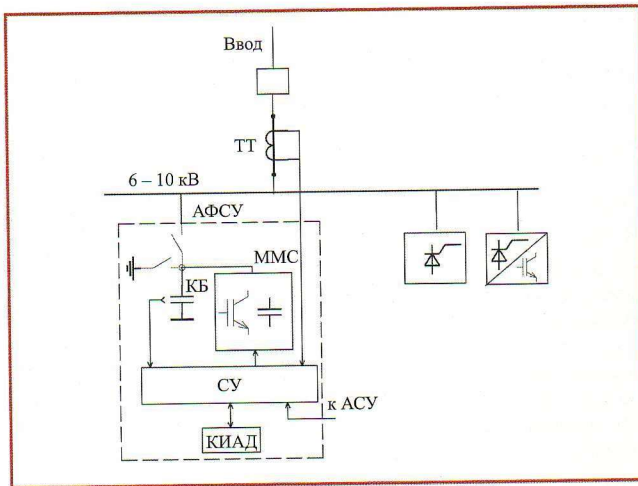


Рис. 4. Схема подключения средневольтного (6 – 10 кВ) шунтирующего АФКУ:

КБ — конденсаторная батарея; СУ — система управления; КИАД — комплекс измерения, индикации, регистрации и архивирования данных; АСУ — автоматизированная система управления верхнего уровня

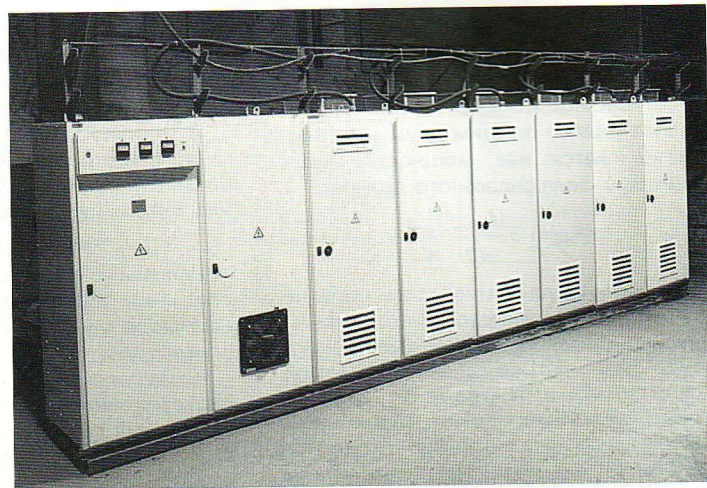


Рис. 5. Внешний вид АФСК-6-2400 на руднике ГМК «Норникель»

пропорционально-интегральный регулятор (PI-регулятор) мощности:

$$P_{bal} = \left(K_d + \frac{1}{pt_d} \right) (E_z - E_d), \quad (8)$$

где p — оператор Лапласа; E_z — заданная энергия; K_d , t_d — коэффициент усиления и постоянная времени PI-регулятора. При подходящих параметрах такой регулятор эффективно приводит энергию E_d к заданной величине E_z .

Выбор вида АФКУ определяется задачей, на решение которой оно предназначено.

РЕАЛИЗАЦИЯ ШУНТИРУЮЩЕГО АФКУ НА ОСНОВЕ СТАТКОМ

Два шунтирующих АФКУ типа АФСК-6-2400, выполненных по схеме СТАТКОМ на основе ММС вида, представленного на рис. 1, мощностью 2,4 МВА на напряжении 6 кВ были внедрены в 2017 г. ООО «НПП ЛМ Инвертор» на одном из рудников ПАО ГМК «Норникель» для снижения провалов напряжения и уменьшения напряжения гармоник питающей сети при работе скиповых подъёмников [2, 3].

Схема подключения средневольтного (6 – 10 кВ) шунтирующего АФКУ к сети приведена на рис. 4.

Учитывая, что ММС может работать как в емкостной, так и в индуктивной области, для компенсации реактивной мощности целесообразно использовать конденсаторную батарею, подключаемую параллельно ММС. В результате осуществляется возможность компенсации реактивной мощности в диапазоне от нуля до удвоенной мощности КБ. Характеристики АФСК-6-2400 приведены далее, а фотография на руднике ГМК «Норникель» — на рис. 5.

На рис. 6 показаны осциллограммы напряжения на шинах 6 кВ до и после включения активного фильтра (рис. 6, а

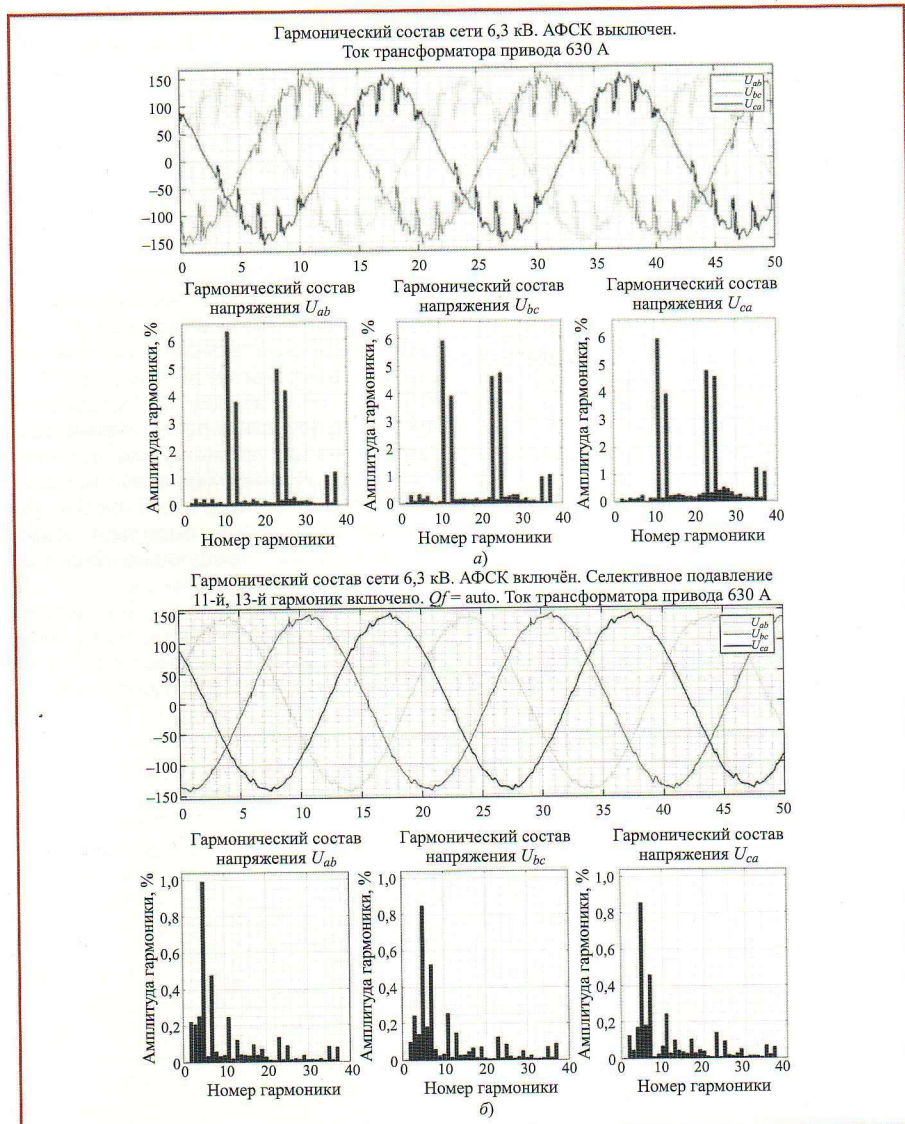


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на шинах 6 кВ до (а) и после (б) включения активного фильтра:

U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} — линейные напряжения сети

Основные технические данные преобразователя АФС-6-2400

Номинальное напряжение, кВ	6,3
Допустимое отклонение входного напряжения, %	± 10
Число фаз входного напряжения	3
Частота входного напряжения, Гц	50 ± 2
Установленная мощность КВ, квар	900
Номинальная компенсирующая способность АФС, квар	3000
Мощность потерь в АФС, не более, кВт	40
Напряжение питания собственных нужд, трёхфазное:	
номинальное действующее значение, В	380
частота, Гц	50 ± 2
допустимые отклонения напряжения от номинального, В	$\pm 10\%$
Мощность, потребляемая собственными нуждами, кВА, не более	12
Охлаждение	Воздушное, принудительное

и б, соответственно) 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 превышал 1 %.

Если задача регулируемой компенсации реактивной мощности и симметрирования напряжения не стоит, то экономически выгоднее применить гибридный шунтирующий активный фильтр, обеспечивающий только фильтрацию гармоник и демпфирование переходных процессов.

РЕАЛИЗАЦИЯ ШУНТИРУЮЩЕГО АФКУ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРА

На рис. 7 приведена схема гибридного АФКУ типа АФД (демпфирующего активного фильтра), которое может быть использовано, как альтернатива пассивным LC-фильтрам, в том числе и в качестве составной части статических тиристорных компенсаторов (СТК). Его основная цепь состоит из батареи конденсаторов КБ1 и последовательно включённого с ней активного элемента АЭ, обеспечивающего селективную фильтрацию заданного спектра высших гармоник в точке присоединения АФД. Вспомогательная цепь, состоящая из КБ2, реактора и демпфирующего резистора устраняет мелкие коммутационные искажения напряжения.

Главные преимущества такого решения — автоматическая подстройка режима фильтрации спектра гармоник в режиме реального времени и обеспечение демпфирования переходных процессов в сети без использования мощных демпфирующих резисторов. АФКУ типа ЛМ-АФД-10-3600-УХЛ4, предназначенное для устранения искажений напряжения на шинах 10 кВ при работе тиристорных выпрямителей в циклично-импульсном режиме нагрузки, было установлено в ФГУП «Институт физики высоких энергий имени А. А. Логанова» в сентябре 2018 г.

Основные технические параметры АФКУ типа ЛМ-АФД-10-3600-УХЛ4 приведены далее.

На рис. 8 и 9 представлены осциллограммы, иллюстрирующие действие

АФД при работе в режиме компенсации искажений, возникающих при работе тиристорных выпрямителей.

Общий коэффициент гармонических искажений до фильтрации $\text{THD}_A = 4,7\%$, $\text{THD}_B = 4,7\%$, $\text{THD}_C = 4,4\%$, после — $\text{THD}_A = 1,5\%$, $\text{THD}_B = 1,2\%$, $\text{THD}_C = 1,0\%$.

Для снятия проблем, связанных с искажением напряжения на одном присоединении, имеющем повышенную чувствительность к качеству напряжения, эффективно применение серийного активного фильтра-компенсирующего устройства.

РЕАЛИЗАЦИЯ СЕРИЕСНОГО АФКУ

При реализации задачи обеспечения нормальной работы частотного электропривода типа PowerFlex 7000 номинальной мощностью 600 кВт, работающего в локальной энергосистеме на основе газопоршневой электростанции мощностью 22,5 МВт на объекте ООО

«ЛУКОЙЛ — Западная Сибирь» — СЦ «Когалымэнергонефть» было включено серийное АФКУ типа ЛМ-АФКС6-0,85-70 УХЛ4 производства ООО «НПП ЛМ Инвертор»; обобщённая структурная схема которого приведена на рис. 10, а общий вид — на рис. 11. Частотный электропривод типа PowerFlex 7000 состоит из входного фильтра, образующего колебательный LC-контур, и широтно-модулированного конвертора тока, включённого за фильтром. Сеть, питающая частотный электропривод, искажена гармониками с номерами 5 и 7. Резонансная частота входного фильтра находится в окрестности 5-й гармоники сети (229 – 283 Гц). Вследствие резонансной раскачки колебательного контура сетевой 5-й гармоникой в начале пуска в работе частотного привода возникают сбои. Серийное АФКУ типа ЛМ-АФКС6-0,85-70 УХЛ4 включено в рассечку между искажённой сетью и отходящими линиями с помощью серийного трансформатора (рис. 10) и обеспечивает демпфирование переходных процессов при пуске электропривода и фильтрацию сетевых гармоник.

Для работы в аварийных и аномальных режимах серийное АФКУ оснащено тиристорным ключом и резервирующим контактором, шунтирующими обмотки согласующего трансформатора для беспрепятственного протекания токов при коротком замыкании или выводе из работы преобразователя. Серийный вариант АФКУ обеспечивает

Основные технические параметры ЛМ-АФД-10-3600-УХЛ4

Номинальное напряжение сети, $U_{ном}$, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение сети, кВ	12
Номинальная мощность КБ, $Q_{КБ}$, квар	3000
Номинальное напряжение активного элемента, В	2000
Полоса частот активного поглощения высших гармоник, Гц	250 – 1550
Номинальный ток активного элемента, действующее значение, А	260
Охлаждение	Принудительное, воздушное
Габаритные размеры, мм	7800 × 800 × 2000

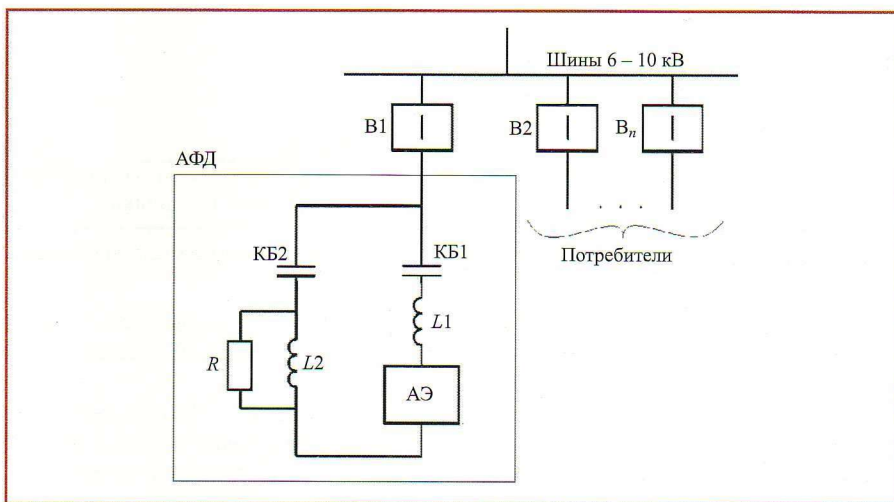


Рис. 7. Гибридный активный сетевой фильтр типа АФД:

КБ1, КБ2 — батареи конденсаторов; $L1$, $L2$ — токоограничивающие реакторы; R — резистор; $B1$, $B2$, ... B_n — выключатели; АЭ — активный элемент

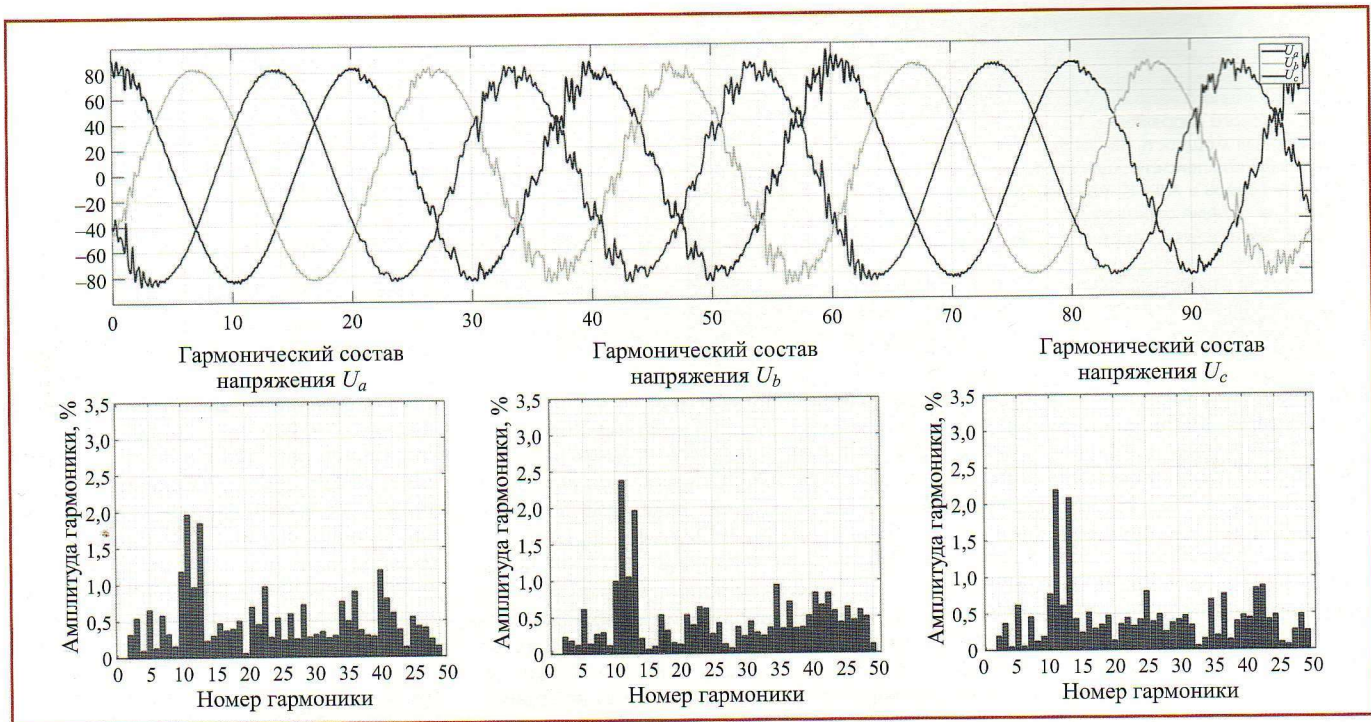


Рис. 8. Гармонический состав напряжения сети 10 кВ. Искажающие выпрямители включены, АФД отключён

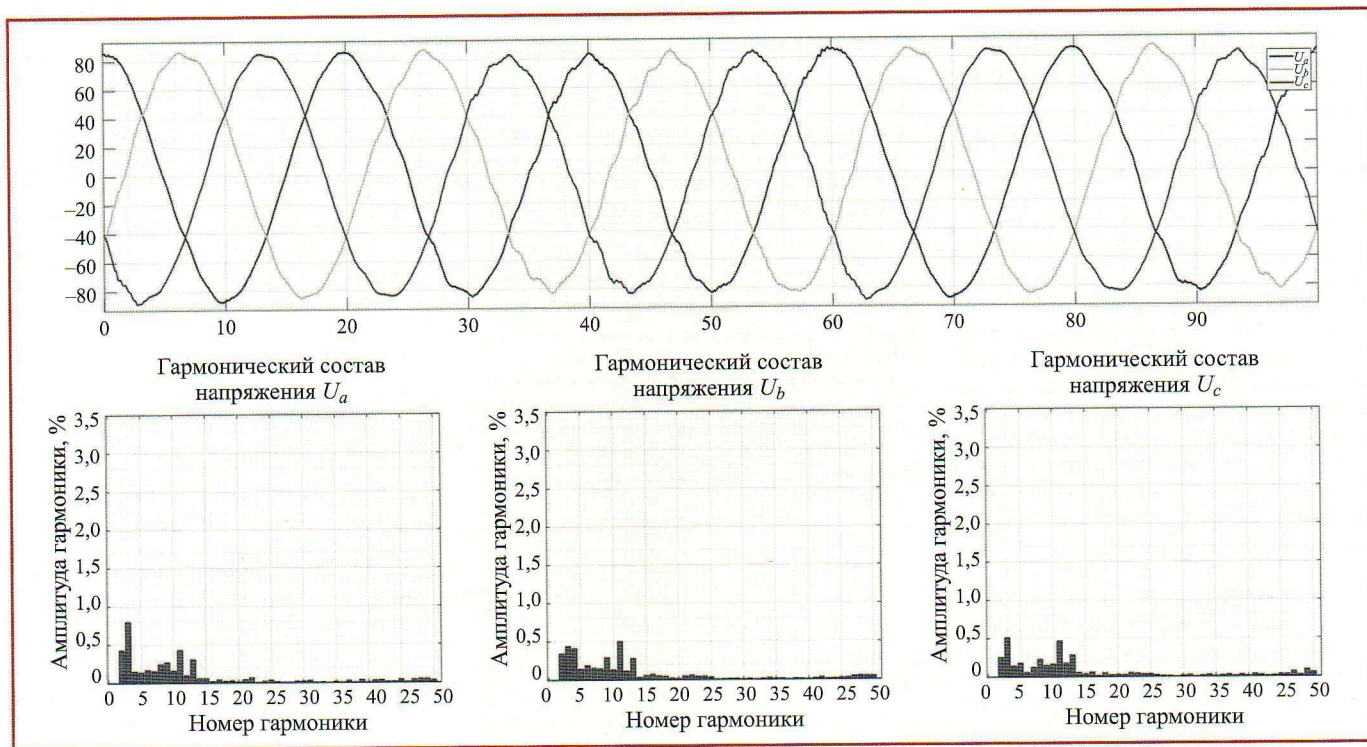


Рис. 9. Гармонический состав напряжения сети 10 кВ. Искажающие выпрямители включены, АФД работает в режиме активной фильтрации

существенную экономию мощности, необходимой для фильтрации гармоник, по сравнению с шунтовым вариантом, поскольку реактанс сети не влияет его мощность, искажающим составляющим сетевого напряжения противопоставляются такие же составляющие напряжения АФКУ. Ток АФКУ определяется током нагрузки отходящей линии.

Основные технические характеристики ЛМ-АФКС6-0,85-70 представлены далее.

АФКС устраняет резонансную раскачку колебательного контура PF7000 5-й гармоникой сетевого напряжения, действуя как широкополосный демпфер в полосе частот до 9 гармоник. При этом обеспечивается нулевое падение напряжения на сетевой частоте,

т. е. беспрепятственное протекание мощности через АФКС к приводу.

На рис. 12 приведены осциллограммы и гармонические составы напряжения и тока при включении LC-фильтра совместно с АФКС и частотным электроприводом. Действующее значение гармоник составило: первой — 51 А (100%), пятой — 0,5 А (1%), седьмой — 1 А (2%).

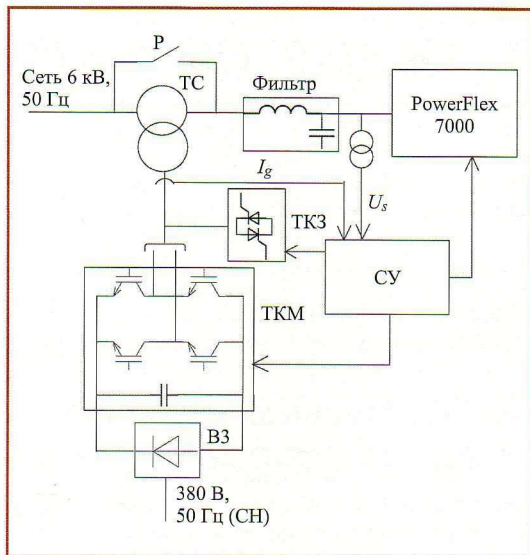


Рис. 10. Обобщённая структурная схема включения серийного АФКУ:
 U_s — напряжение сети 6 кВ; I_g — ток активного элемента



Рис. 11. Общий вид серийного АФКУ типа ЛМ-АФКС 6-0,85-70 УХЛ4

Основные технические характеристики ЛМ-АФКС6-0,85-70

Напряжение сети, кВ	6
Номинальный ток нагрузки, А	70
Номинальное напряжение активного фильтра, кВ	0,85
Компенсация реактивной мощности	нет
Фильтрация высших канонических гармоник	Да, подавление гармоник с номерами 3, 5, 7, 9
Широкополосное демпфирование	Да, в полосе частот гармоник с номерами 3, 5, 7, 9
Симметрирование потребления	нет
Охлаждение	Принудительное, воздушное
Управление	Автоматическое
Степень защиты по ГОСТ 14254 – 80	IP20
Климатическое исполнение	УХЛ 4.1
Габариты (Ш × Г × В), мм, не более	1800 × 800 × 1800

Представленные пилотные образцы активных фильтрокомпенсирующих устройств внедрены в электрических сетях промышленных предприятий. Однако имеющийся опыт создания преобразователей мощностью до 100 МВт и выше позволяет масштабировать и использовать подобные АФКУ на уровнях мощностей, необходимых и для электроэнергетических систем.

Заключение

1. В течение последних лет разработаны теоретические и методические основы проектирования активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств на основе модульных много-

График фазных тока и напряжения фазы В, масштаб по току — 101 А, масштаб по напряжению — 5143 В

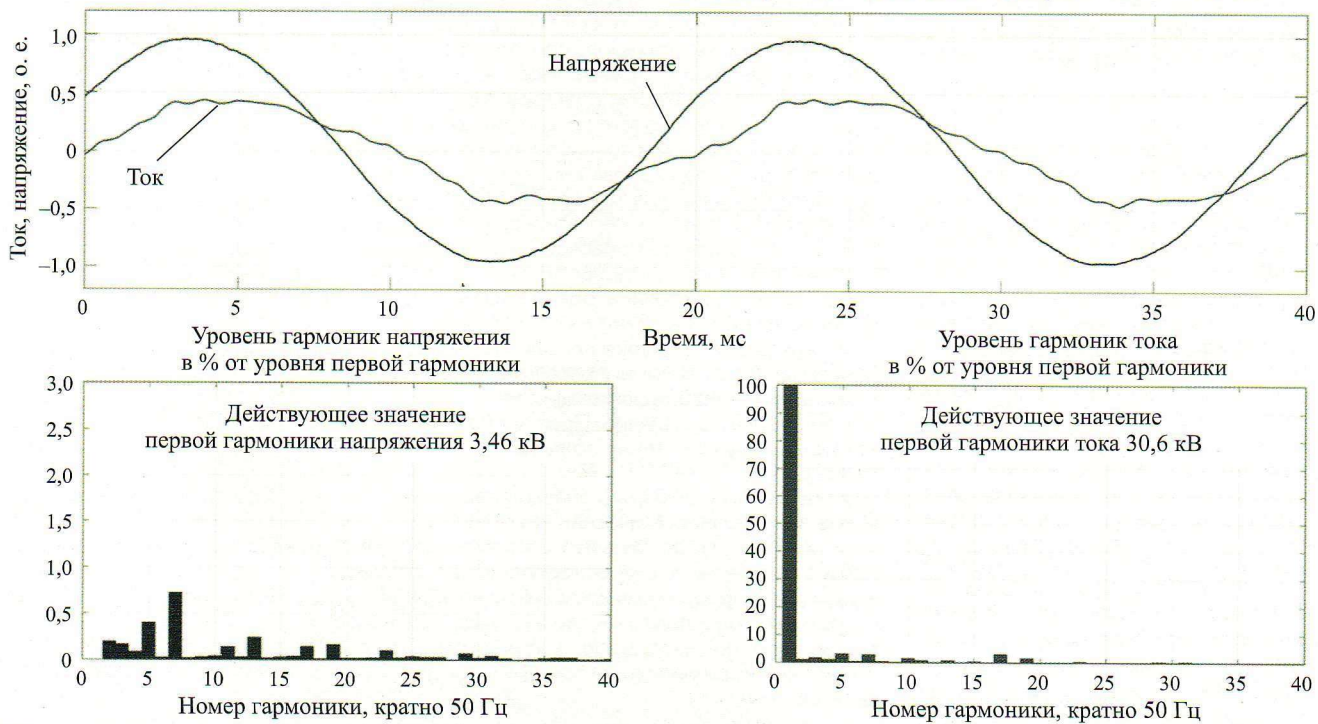


Рис. 12. Форма и гармонический состав напряжения и тока при включении LC-фильтра совместно с АФКС и частотным приводом

уровневых конверторов, что позволило осуществить внедрение пилотных образцов средневольтных (6 – 10 кВ) АФКУ для решения проблем нормализации напряжения на промышленных предприятиях в условиях действия динамических искажений.

2. Проблема фильтрации гармоник в электрических сетях в условиях действия динамически изменяющейся искажающей нагрузки с успехом может быть решена с помощью активных фильтро-компенсирующих устройств шунтирующего или серийного включения. Применение конкретного типа АФКУ зависит от задачи и условий их применения:

- шунтирующий активный фильтр на основе СТАТКОМ обеспечивает комплексное решение задачи нормализации напряжения электрической сети, включая компенсацию реактивной мощности, фильтрацию гармоник и симметрирование;

- гибридный шунтирующий активный фильтр, состоящий из последовательно включённых конденсаторной батареи и активного элемента, позволяет обеспечить фильтрацию и демпфирование гармоник, как альтернативу использованию пассивных резонансных фильтров;

- серийное АФКУ — экономически обоснованная альтернатива использования шунтирующих АФКУ для решения комплексной задачи нормализации напряжения для ответственных потребителей, питающихся от искажённой сети, общая нормализация качества напряжения которой с помощью шунтирующих фильтров является слишком затратной.

3. Проведённая апробация и опыт создания статических преобразователей мощностью до 100 МВт и выше позволяют обеспечить масштабирование АФКУ на уровень мощностей, необходимых для электроэнергетических систем, включая слабые транзиты ЕНЭС и тяговые электрические сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафа Г. М., Гусев С. И. Активные фильтро-симметрирующие устройства для электроэнергетики. Saarbrücken, Deutschland, LAP Lambert Academic Publishing, 2016. — 114 с.

2. Гусев С. И., Мустафа Г. М. Особенности использования модульных многоуровневых преобразователей для нормализации показателей качества напряжения электрической сети // Энергоэнергетика. Передача и распределение. 2018. № 4 (49). С. 58 – 65.

3. Мустафа Г. М., Гусев С. И. Опыт использования активных фильтро-компенсирующих устройств шунтирующего и серийного типа в электрических сетях. Междунар. науч.-практ. конф. «Управление качеством электрической энергии», 5 – 7 декабря 2018 года, Москва. <https://icrqm.org/qqm-2018>.

4. Расчет мощности активного фильтро-симметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ «Скородино» / Г. М. Мустафа, С. И. Гусев, А. В. Ершов и др. // Электрические станции. 2015. № 3. С. 46 – 53.

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

*Уважаемого профессора
Эльмара Мехтиевича Фархадзаде
поздравляем с 80-летием со дня рождения!*

Количественная оценка пожарной опасности объектов электроэнергетических систем

ФАРХАДЗАДЕ Э. М., доктор техн. наук, профессор

МУРАДАЛИЕВ А. З., доктор техн. наук

ИСМАИЛОВА С. М., канд. техн. наук

ЮСИФЛИ Р. Ф.

Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-испытательский институт энергетики

AZ1012, Азербайджанская Республика, г. Баку, просп. Г. Зардаби, 94
elmeht@rambler.ru



Э. М. Фархадзаде



А. З. Мурадалиев



С. М. Исмаилова



Р. Ф. Юсифли

Количественная оценка пожарной опасности объектов (электростанций и сетевых подстанций) электроэнергетических систем относится к одной из наиболее важных и трудных проблем надёжности. Её значимость обусловлена настоятельной необходимостью снижения пожарной опасности объектов, что подтверждают многочисленные случаи пожаров, приводящие к большому материальному ущербу, нарушениям экологии, травмированию и гибели персонала. Трудность заключается в том, что возникновение пожаров недопустимо, а случаи пожара не могут использоваться для количественной оценки хотя бы только по этическим соображениям. Пожароопасность маслонаполненного оборудования и устройств объектов устанавливается исходя из расчёта остаточного срока службы. Однако они не могут быть использованы для характеристики пожарной опасности объектов, предприятий и Управлений электроэнергетических систем.

Для оценки пожарной опасности необходимо принять следующее:

- уровень пожарной опасности изменяется от безопасного до недопустимого уровня;
- безопасное состояние обеспечивается при выполнении всех Правил пожарной безопасности;
- утверждение о снижении или повышении пожарной безопасности ошибочно. Пожарная безопасность постоянна, уменьшаться или увеличиваться может только степень пожарной опасности;
- чем число нарушений Правил пожарной безопасности больше, тем больше опасность возникновения пожара.

Приведены:

- характеристика традиционного качественного анализа пожарной опасности объектов электроэнергетических систем;
- метод и алгоритм анализа состояний пожарной опасности объектов, предприятий и Управлений электроэнергетических систем;
- автоматизированная система анализа нарушений Правил пожарной безопасности;
- формы с результатами автоматизированных расчётов, обеспечивающих информационную и методическую поддержку начальников объектов, руководителей предприятий и Управлений при повышении надёжности работы электроэнергетической системы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, пожарная безопасность, количественная оценка, объект, метод, алгоритм, анализ.