

УДК 621.311

А.А.Жиленков

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАБОТАЮЩИХ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Введение. По результатам математического моделирования, экспериментальных исследований и математического анализа, направленных на изучение электромагнитной совместимости между элементами системы синхронный генератор (СГ)- управляемый выпрямитель (УВ) – нагрузка (характерной, например, для судна с электродвигательным комплексом постоянного тока), можно определить следующие задачи, реализация которых необходима для осуществления повышения электромагнитной совместимости в исследуемой системе:

а) обеспечить устойчивую работу тиристорного преобразователя (ТП) во всем диапазоне регулирования в условиях наличия гармоник тока и напряжения, значения которых существенно превышают допустимые, с учетом нестабильности уровня напряжения и частоты питающей сети, а так же неравномерной нагрузки по фазам, что, вследствие отсутствия нулевого провода, дает несимметрию токов и напряжений сети;

б) по возможности улучшить параметры питающей сети, в частности, за счет повышения устойчивости УВ.

Можно выделить следующие меры, выполнение которых необходимо для повышения устойчивости УВ:

а) снизить влияния искажений токов на систему управления (СУ) УВ через обратные связи по току на малых скоростях ГЭД, когда наблюдается повышенный уровень гармонических искажений фазных токов наряду с повышенным значением пик-фактора тока;

б) снизить влияния статических искажений линейных напряжений на СУ УВ по линии опорных напряжений на скоростях ГЭД от номинальной и выше, когда наблюдается повышенный уровень гармонических искажений линейных напряжений наряду с повышенным значением пик-фактора напряжения;

в) снизить влияния случайных искажений линейных напряжений на СУ УВ по линии опорных напряжений, когда одно возмущающее воздействие может привести к возникновению автоколебаний в системе.

При этом следует учитывать, что:

- наиболее сильное воздействие на устойчивость системы СГ-УВ-нагрузка оказывает искаженность форм линейных напряжений питающей сети;

- степень влияния гармонических искажений напряжений сети на устойчивость УВ зависит от их спектра;

- степень влияния случайных помех и существенных периодических помех на устойчивость зависит от их вольтсекундной площади.

- до определенного уровня гармоники низких порядков сами по себе не вызывают дестабилизирующих эффектов, так как присутствуют в период интегрирования СУ как в линейных напряжениях сети, так и в интегрированном сигнале таким образом, что осуществляют самовыравнивание СУ;

- дестабилизирующее воздействие оказывают гармоники более высоких порядков, однако, при их уровне, не превышающем максимальный уровень, зарегистрированный при экспериментальных исследованиях, и в отсутствие гармоник более низкого порядка система не уходит в автоколебательный режим в основном диапазоне регулирования в связи с малой ошибкой угла управления;

- при замене опорных сигналов идеальными синусоидами, синхронизированными с сетевыми напряжениями, исследуемая система дает большую ошибку и, как следствие, возникает более быстрый уход в астатический режим, чем при присутствии в опорном сигнале искажений идентичных искажениям в линейных напряжениях сети, поступающих на силовую часть УВ.

Обусловленное требованиями безопасности отсутствие в схеме судовой электростанции (СЭС) нулевого провода делает систему формирования импульсов управления силовыми ключами более критичной к наблюдаемым в сети искажениям в виду несимметрии сетевых напряжений на её входе и невозможности контроля фазных напряжений на выходе СГ. В то же время, рассматривая все сигналы математической модели СГ, можно заметить, что часть из них содержит информацию необходимую для восстановления сигналов пропорциональных фазным напряжениям СГ, частоте генерируемого

напряжения и т.п. Известно, что для восстановления недоступных для измерения параметров и сигналов состояния некоторой системы используется теория модального управления и наблюдающих устройств, относящихся к направлению робастного управления. В общем случае нам необходимо построить такое наблюдающее устройство, которое смогло бы восстанавливать форму фазных напряжений (или ЭДС) синхронного генератора вне зависимости от характера подключенной к нему нагрузки, а также его частоту. В исследуемой схеме доступными для измерения можно считать токи и напряжения в сети и в нагрузке. Составляя, таким образом, систему описывающую наблюдатель и подбирая элементы в образовавшейся матрице весов невязок, мы получаем модель наблюдателя восстанавливающего сигналы исследуемой схемы, не поддающиеся измерению.

Далее, так как восстановленный при помощи наблюдающего устройства сигнал при отсутствии помех максимально приближен к синусоидальному, он может быть представлен гармоническим рядом состоящим из нескольких гармоник, а в идеальном случае из одной – первой. При появлении в этом сигнале помех, его гармонический состав будет включать гармоники более высокого порядка. Т.е. если разложить сигнал с помехами с помощью преобразования Фурье, исключить высшие гармонические составляющие и произвести обратное преобразование, то спектр сигнала сузится, и короткие импульсы и провалы в восстановленном сигнале будут отфильтровываться. Однако существующие фильтры, в том числе и использующие подобные алгоритмы (например, FFT – быстрое преобразование Фурье) вносят довольно большие фазовые сдвиги в отфильтрованный сигнал. При этом, чем фильтр оказывается эффективнее, тем большей получается задержка отфильтрованного сигнала от исходного. Еще одним существенным недостатком распространенных фильтров является их неспособность подстраиваться под изменения параметров самого полезного сигнала. Что хорошо видно на примере резонансных фильтров настраивающихся на определенную частоту. Так как напряжение в судовой сети может изменяться по каждому из своих параметров в недопустимых для многих фильтров (с жесткой настройкой) пределах, актуальным становится использование адаптивных фильтров.

Основная часть. Предлагаемый в настоящей работе фильтр основан на элементах теории экстремальных систем, теории вейвлетов и адаптивных систем. Задача устройства - аппроксимировать желаемый сигнал $y(t)$, генерируя линейную комбинацию из набора дочерних функций $h_{a_k, b_k}(t)$, где $h_{a_k, b_k}(t)$, которые сгенерированы из материнской функции $h(t)$ (1) с фактором $a > 0$.

$$h_{a,b}(t) = h\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

Аппроксимированный сигнал может быть представлен выражением (2):

$$\hat{y}(t) = u(t) \sum_{k=1}^K \omega_k h_{a_k, b_k}(t), \tag{2}$$

где K – число элементов сети или дочерних функций; ω_k - весовые коэффициенты.

Параметры элементов ω_k , a и b – могут быть оптимизированы посредством функции наименьшего среднеквадратичного уменьшением значения оценочной энергетической функции E во времени. Учитывая, что ошибка аппроксимации выражается функцией (3), энергетическая функция определяется выражением (4).

$$e = y(t) - \hat{y}(t) \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T e^2(t) \tag{4}$$

Для уменьшения E , можно использовать метод пошаговых уменьшений, который использует градиенты для обновления прирастающих изменений к каждому конкретному параметру. Для каждого элемента сети, градиенты E равны (5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \omega_k} &= - \sum_{t=1}^T e(t) h(\tau) u(t), \\ \frac{\partial E}{\partial b_k} &= - \sum_{t=1}^T e(t) u(t) \frac{\partial h(\tau)}{\partial b_k}, \\ \frac{\partial E}{\partial a_k} &= - \sum_{t=1}^T e(t) u(t) \omega_k \tau \frac{\partial h(\tau)}{\partial b_k}, \end{aligned} \tag{5}$$

где $\tau = -\frac{t-b_k}{a_k}$.

Приращение каждого коэффициента не что иное, как их отрицательные градиенты: $\Delta \omega_k = -\frac{\partial E}{\partial \omega}$ и

т.д., поэтому каждый коэффициент фильтра приращается согласно правилу $\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) + \mu_w \Delta \underline{w}$, где μ - параметр скорости обучения.

Так как аппроксимируемый в нашем случае сигнал приближен к синусоиде и его параметры приблизительно известны (сеть 380В, 50Гц), то в качестве материнской можно принять функцию $\sin(t)$.

Структурная схема, соответствующая каналу фильтрации одного напряжения, показана на рис.1. Физически работу фильтра для канала фильтрации напряжения UAB можно описать следующим образом: с выхода наблюдателя сигналов снимается сигнал EA ЭДС фазы A и сигнал частоты ω ЭЛ. Проходя через сумматоры приращений, эти сигналы поступают на соответствующие генераторы функций $\omega h(t)$ вида (1), выполняя приращения соответствующих коэффициентов. В нашем случае показано формирование трех гармонических составляющих – основной и двух дополнительных. Так как в качестве материнской выбрана синусоидальная функция, у которой возможно изменение таких параметров, как частота, угол сдвига фазы и амплитуда, то и система должна формировать приращения для этих параметров. Сгенерированные от материнской функции и сигналов приращений непрерывные функции вида $A \sin(\omega t + \phi)$ суммируются и результат этой суммы является восстановленным адаптивным фильтром сигналом фазного напряжения фазы A \hat{u}_A . Разность \hat{u}_A и сигнала \hat{u}_B , полученного на выходе соответствующего канала адаптивного фильтра даст восстановленный сигнал линейного напряжения \hat{u}_{AB} . Разность реального и восстановленного сигналов даст ошибку фильтра $\hat{u}_{AB} - u_{AB} = e$, соответствующую выражению (3). Из энергетической функции (4), при помощи соответствующих блоков, выполняется нахождение сигналов приращений (5), которые поступают на соответствующие сумматоры приращений.

Представленную структуру адаптивного фильтра можно существенно упростить, приняв генерируемые дополнительные гармонические составляющие как функции с частотами кратными основной частоте ω ЭЛ и неизменными. Это позволит отказаться от подстройки параметров a и приведет нас к варианту формирования искомой функции путем гармонического синтеза при ограниченном числе гармонических составляющих, для каждой из которых возможно изменение её фазы и амплитуды. При конечном количестве составляющих в каждом канале фильтра и присутствии гармоник высших порядков (которые не генерируются фильтром) в оригинальном сигнале, мы всегда будем иметь некоторую ошибку, определяемую спектральным составом высших гармоник и наличием случайных импульсных помех. Таким образом, фильтру не удастся реагировать на высокочастотные составляющие в линейных напряжениях сети. Дополнительно возможно вводить ограничения на скорость обучения по определенным составляющим, что позволяет более чувствительно реагировать на изменения в одном диапазоне спектре гармоник и менее в другом.

Восстановленные сигналы, пропорциональные линейным напряжениям в сети поступают на вход СУ УВ. Таким образом, данная система способна может быть использована с различного рода СУ преобразователей без необходимости их модернизации. Очевидно, что, если при формировании приращений параметров адаптивного фильтра наряду с критериями устойчивости УВ учитывать критерии качества параметров энергии питающей сети, то возможно добиться улучшения последних не только из-за непосредственного обеспечения устойчивости УВ, а и корректировкой опорных сигналов СУ. На рис. 2 представлен результат работы фильтра в случае, когда в оригинальном сигнале присутствуют помехи в виде импульсов и провалов. Как видно из представленных рисунков, разработанный фильтр не вносит фазового сдвига в установившемся режиме.

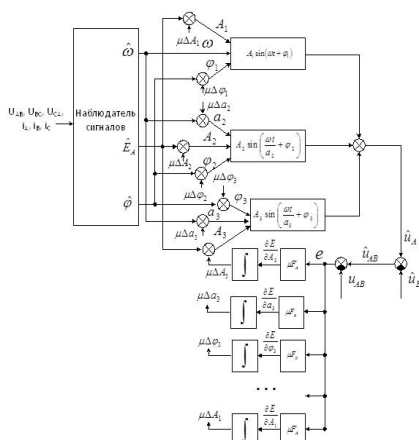


Рис. 1. Структурная схема одного канала адаптивного фильтра

Мы не можем аппроксимировать исходный сигнал синусоидой, так как это приведет к недопустимым ошибкам в СУ УВ. Такого рода искажения необходимо подавлять непосредственно в сети,

чтобы информационная составляющая о них присутствовала как в линейных напряжениях сети, так и в опорных напряжениях СУ УВ. Теоретически, сделать это возможно при помощи активного фильтро-компенсирующего устройства (АФКУ) инверторного типа.

В настоящее время АФКУ находят все более широкое применение. Однако их стоимость, по большей части диктуемая высокой стоимостью сложнейшей системы управления, пока делает их применение в большинстве случаев экономически не выгодным. Тем более что, как показывают экспериментальные исследования, АФКУ обладают низкой эффективностью в условиях характерных для СЭС. Характер проблем схож с проблемами, наблюдаемыми в преобразователях, с той лишь разницей, что в СУ АФКУ нас интересуют мгновенные значения помех в фильтруемом сигнале, которые необходимо подавить.

Очевидно, что сигнал $e = \hat{u}_{AB} - u_{AB}$ (рис. 1) – не что иное, как выделенная из фильтруемого оригинала помеха. Подавая этот сигнал в СУ АФКУ можно достаточно эффективно подавлять высшие гармоники и случайные сигналы в сети, т.к. сигнал e имеет минимальную и постоянную по времени задержку относительно фильтруемого оригинала.

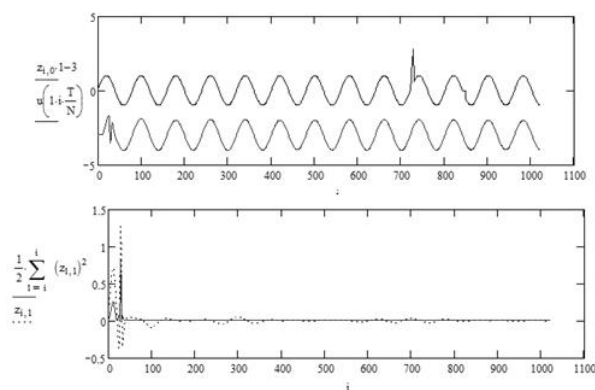


Рис.2. Фильтрация различного рода помех разработанным фильтром

Выводы. Обеспечение устойчивости систем управления силовыми преобразователями в автономных ЭС является одним из главных путей решения вопроса повышения надежности как непосредственно преобразователей при работе в различных режимах работы ЭС, так и этой системы в целом. Оно возможно за счет применения адаптивных методов управления. Разработанный метод формирования управляющих сигналов СУ преобразователя позволяет повысить его устойчивость, а также, в общем повысить электромагнитную совместимость оборудования в автономной ЭС. Разработанные методы формирования опорных сигналов для систем управления полупроводниковыми преобразователями, могут быть использованы и в АФКУ, где необходимо знать мгновенное значение помехи содержащейся в фильтруемом сигнале. Кроме того, разработанный метод формирования опорных сигналов в СУ тиристорного УВ обеспечивает исключение пропусков коммутации его ключей вследствие существенных искажений форм токов и напряжений питающей сети и, как следствие, обеспечивает снижение искажений форм токов и напряжений питающей сети, являющихся результатом таких пропусков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жиленков А.А. Влияния мощных тиристорных выпрямителей на питающую их автономную электростанцию /А.А.Жиленков// Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2012. – № 5/8 (59). – С. 14-19.
2. Шейнихович В.В., Климанов О.Н., Пайкин Ю.И., Зубарев Ю.Я. Качество электрической энергии на судах: Справочник/ КЗО-Л.: Судостроение, 1988.-160 с.
3. Плахтина О.Г., Мазепа С.С., Куцик А.С. Частотно-управляемые асинхронные и синхронные электроприводы Львов: Издательство Национального Университета «Львовская политехника», 2002.- 227 с.

ЖИЛЕНКОВ Антон Александрович – аспирант, Керченский государственный морской технологический университет «КГМТУ»

Научное направление: повышение электромагнитной совместимости в автономных электроэнергетических системах с изолированной нейтралью, включающих в свой состав мощные полупроводниковые преобразователи