УДК: 621.3

**АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙТВИЯ СИЛОВЫХ СХЕМ УПРАЛЯЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

**Ненахов А.И.**

*Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»*

*В докладе описаны ключевые моменты математического моделирования устройств компенсации реактивной мощности на базе IGBT-ключей с целью определения их быстродействия и возможностей использования в сетях с резкопеременными нагрузками.*

*Ключевые слова: Компенсаторы реактивной мощности, подавление фликера, СтатКом.*

*The report describes the key points of mathematical modeling reactive power compensation devices based on IGBT to determine their performance and features use in networks with rapidly changing loads.*

*Keywords: Reactive power compensators, flicker suppression, StatCom.*

Для систем электроснабжения промышленных предприятий в настоящее время широко распространенными и незаменимыми являются устройства СТК, выполняющие функции поддержания напряжения при резкопеременной нагрузке, разгрузки системы от реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии на предприятии.

Однако, в настоящее время появляются новые разработки современных силовых установок, построенные на использовании IGBT-ключей и выполняющие те же функции. В первую очередь интерес представляют несколько типов устройств СтатКом.

СтатКом отличается от СТК иным устройством, увеличенным набором функций и улучшенными характеристиками. Он предназначен для регулирования реактивной мощности в широких пределах (плюс-минус 100% номинальной мощности).

Упрощенно, СтатКом, это преобразователь напряжения на управляемых силовых транзисторах. Принцип работы СтатКом идентичен принципу работы агрегатов бесперебойного питания: из напряжения источника постоянного тока за счет широтно-импульсной модуляции и использования фильтра гармоник формируется синусоидальное напряжения. СтатКом представляет собой 3-х фазный источник напряжения с регулируемой амплитудой и фазой отделенный от сети собственным реактансом. Главное свойство СтатКом – способность генерировать ток любой фазы относительно напряжения сети, причем не зависимо от уровня и качества напряжения сети.

СтатКом обладает высоким быстродействием, малым содержанием высших гармоник, малыми габаритами, может использоваться в любых электрических сетях. Считается, что сегодня это наиболее совершенное статическое устройство FACTS. Однако в настоящее время сфера его применения значительно ограничена в связи с дороговизной и сложностью устройств в сравнении с СТК.

Как известно СТК имеет 2 основных направления использования: это работа в электрических сетях с целью поддержания и регулирования напряжения, и работа в сетях промышленных предприятий непосредственно в сети питания резко переменных нагрузок, таких как дуговые сталеплавильные печи. Именно для второго направления замена СТК на СтатКом может принести значительное увеличение эффективности компенсации, так как новые устройства имеют значительно более широкие возможности работы в динамических режимах. Но на текущем этапе особенности использования в данной сфере мало изучены. Здесь появляется много вопросов как в отношении устройства силовой схемы, так и в выборе и построении алгоритмов управления.

Существует три основные схемы СтатКом, имеющие различное строение и количество ключей: D-СтатКом (мостовая схема с 6-ю ключами и общим для трех фаз конденсатором), NPC-СтатКом (обеспечивает 3 уровня выходного напряжения в каждой фазе и 5 уровней линейного напряжения), и Н-СтатКом (многоуровневое модульное устройство, количество ступеней напряжения зависит от количества ячеек в фазе).

Последний тип устройства является наиболее сложным, но и дает наиболее близкое к синусоидальному напряжение и имеет самые высокие возможности регулирования. В силу последовательного соединения ячеек в одной фазе полная частота коммутаций в цепи значительно выше частоты переключений каждого из полупроводниковых приборов. Именно данная схема используется при математическом моделировании, задачей которого ставиться выявление особенностей работы устройства в динамических режимах, свойственных для промышленных сетей.

В ходе исследования была построена математическая модель системы компенсации в программе Simulink пакета Matlab. Модель была рассчитана с фиксированным шагом дискретизации в 20 мкс. При частоте переключений одного ключа в 500 Гц этой дискретизации достаточно для получения достаточно точных результатов, хотя и не позволяет учесть времена задержек включения и отключения в ключах, которые составляют порядка 1 мкс.

Для рассмотрения в модели была выбрана система электроснабжения с напряжением 6 кВ. При таком напряжении потребовалось 6 ячеек в каждой фазе компенсатора, включающих в себя конденсаторы на постоянное напряжение 2 кВ. Расчетная мощность компенсатора составила 12 Мвар.

В модель были включены следующие основные части: модель энергосистемы, состоящая из источника питания, сопротивления системы, модели задания переменной нагрузки, силовой схемы компенсатора и выключателя компенсатора, и модель системы управления.

 В качестве нагрузки были приняты токи, рассчитанные из мощностей двух однофазных печей в соответствии с данными одного из реальных объектов. Несимметричность нагрузки позволила также провести опыты с симметрированием активных токов.

В данной работе были показаны возможности компенсации реактивной мощности и симметрирования активной нагрузки в плавных режимах, а также проанализированы особенности формирования напряжения методом ШИМ. Выполнены опыты как отдельно с силовой схемой и идеальными сигналами управления, так и в комплексе при работе компенсатора с переменной нагрузкой.

Даже при работе с самым простым алгоритмом управления СтатКом показывает качество компенсации лучше, чем у СТК. В опытах с использованием реальных графиков токов печи ДСП было получено, что коэффициент подавления фликера превышает 2 ед.

Было показано, что силовая схема СтатКом превосходит СТК по скорости отработки сигнала управления и может отработать изменение его состояния за очень короткий промежуток времени. На рисунке 1 показан график мгновенного напряжения в фазе СтатКом при отработке идеального сигнала управления.



 Рисунок 1 – график сигнала управления (сверху); график мгновенно напряжения фазы СтатКом и график напряжения после фильтрации (снизу)

По графику можно видеть, что изменение напряжения происходит за время порядка 0.6 мc даже с учетом фильтрации сигнала. Это время меньше периода несущей частоты для одной ячейки. Этот опыт показывает быстродействие только силовой схемы формирования напряжения. И отсюда следует, что данная система должна быть дополнена более быстрыми алгоритмами управления с использованием мгновенных величин токов или напряжений для отработки быстрых процессов в сети и снижения колебаний напряжения.

Полученные результаты могут служить показателем того, что при правильно разработанном алгоритме управления, возможности устройства СтатКом превзойдут возможности СТК по ряду параметров, в том числе при использовании в промышленности и работе с резкопеременной нагрузкой. Также из вышесказанного следует вывод о необходимости дальнейшего исследования в области систем управления для данных типов устройств.

Список литературы

1. R. Mohan Mathur. [Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems](http://eknigi.org/tehnika/187941-thyristor-based-facts-controllers-for-electrical-transmission-systems.html) [Text] / R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma/ // Wiley-IEEE Press. - 2002. – P.413-431

**Ненахов Александр Игоревич,** аспирант кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО "Национального исследовательского университета "МЭИ"; 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14; navei909@gmail.com, тел.: 8(916) 055-06-58.