

УДК 621.316.722.076.12

Э. Р. Маннанов, А. Н. Рукавицын

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Повышение качества электрической энергии при резкопеременной нагрузке

Рассматриваются проблемы качества электрической энергии при подключении резкопеременной нагрузки, пути их решения с помощью пошагового рассмотрения поиска оптимума.

Качество электрической энергии, FACTS, Smart Grid

Важными векторами развития промышленности России являются модернизация энергетических и промышленных объектов (до уровня шестого техноуклада). В настоящее время в России создается интеллектуальная энергосистема с активно-адаптивной сетью – ИЭС ААС (за рубежом – Smart Grid) [1].

В научно-технической литературе встречается очень мало работ, освещающих вопросы комплексного подхода при внедрении энергосберегающих технологий в рамках построения архитектуры Smart Grid. В этом плане интересен опыт специалистов-практиков компании ООО «Международная энергосберегающая корпорация» (сокращенно ООО «МЭК», www.iescorporation.org) [2]–[5]. Инженерно-технические работники «МЭК» в ходе освещения результатов, реализованных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) акцентируют внимание на следующих решаемых задачах:

- анализ требований стандартов качества электроэнергии в различных странах [6];
- анализ функционала программных комплексов при проектировании FACTS-устройств [5]–[7];
- анализ технических характеристик FACTS-устройств выпускаемых мировой промышленностью [6], [8], [9];
- анализ характеристик основных комплексуемых FACTS-устройств [10];
- анализ причин погрешностей, вносимых в ходе моделирования электрических сетей [11].

Несмотря на то что в распоряжении Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715_р «Об энергетической стратегии РФ на период до 2030 г.» закреплено в качестве приоритетных задач внедрение FACTS-устройств на промышленных и сетевых объектах, а также построение архитектуры Smart Grid в масштабах страны, ее реализация сдерживаются отсутствием специальной совре-

менной литературы, описывающей методику определения оптимальной точки подключения FACTS-устройств, выбора конкретного типа оборудования и их характеристик. Авторы считают, что наиболее подробно методология выбора FACTS-устройств из всего спектра оборудования по состоянию на 2015 г. изложена в [6] М. С. Балабановым и Р. Н. Хамитовым (рассмотрены 24 основных типа и подтипы).

Междисциплинарный подход, описанный в работах инженеров-практиков [1]–[14] по внедрению энергосберегающих технологий, задает правильный вектор в реализации НИОКР. С учетом данных работ рассмотрим возникающие проблемы качества электроэнергии (КЭ) при подключении в сеть резкопеременной нагрузки. Характер нагрузки может оставаться постоянным или изменяться в отдельных или во всех фазах и сопровождаться появлением высших гармоник. Очевидно, что КЭ напрямую зависит от характера электрической нагрузки. Нагрузка в сети может быть симметричной, резкопеременной, несимметричной и нелинейной. Особое влияние на электрическую сеть оказывает резкопеременная нагрузка – дуговые и индукционные печи, электродвигательная нагрузка, электросварочное оборудование. Данная нагрузка характеризуется резкими провалами мощности или тока. Она способна перегрузить электрическую сеть и стать причиной возникновения высших гармоник, которые могут проявляться в соседних связанных электросетях и приводить к нежелательным последствиям:

- увеличение общего действующего значения тока;
- снижение коэффициента мощности;
- ошибка срабатывания автоматических выключателей;
- перегрузка током конденсаторов и шум;
- сбои в работе.

Сегодня существует множество готовых решений, направленных на повышение значений показателей КЭ с целью удовлетворения норм и требований, предъявляемых к КЭ. Здесь возникает ряд вопросов, касающихся способа достижения цели.

В данной работе предлагается схема, способствующая принятию оптимального решения на рис. 1.

Для простоты восприятия последовательности действий при оценке КЭ составлена схема (рис. 2).

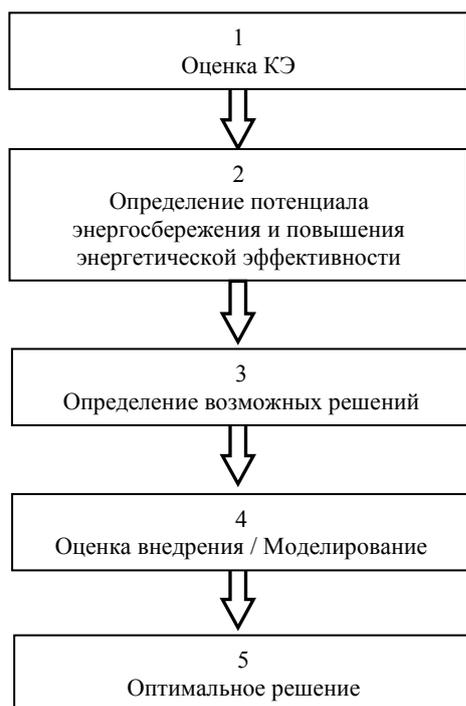


Рис. 1

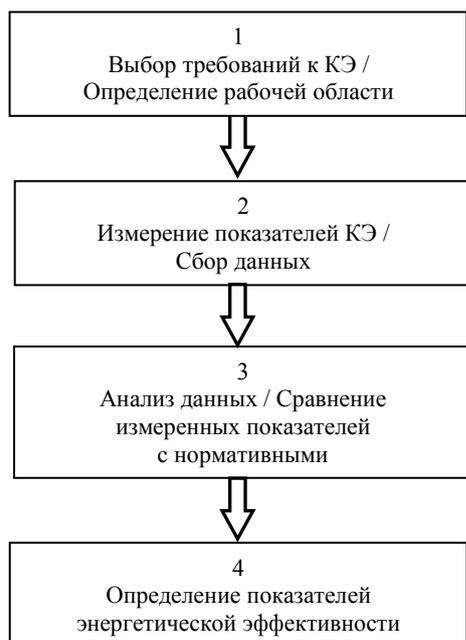


Рис. 2

Первым шагом служит выбор требований к КЭ (рис. 2). В зависимости от объекта электроснабжения требования могут значительно различаться.

На базе справочных данных, зависимостей параметров и предъявляемых требований КЭ необходимо определить рабочую область, которая содержит характерные величины показателей КЭ. Этот этап важен тем, что после выполнения сбора исходных данных необходимо сравнить измеренные показатели с нормами по КЭ. На этом заканчивается анализ состояния исследуемого объекта.

Нормы КЭ, устанавливаемые в России ГОСТ 32144–2013, служат уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения. При соблюдении указанных норм обеспечивается электромагнитная совместимость электрических сетей систем электроснабжения общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии.

Показатели КЭ, на которые устанавливаются требования:

- установившееся отклонение напряжения дельта;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение.

При определении значений некоторых показателей КЭ используют вспомогательные параметры электрической энергии:

- частота повторения изменений напряжения;
- интервал между изменениями напряжения;
- глубину провала напряжения дельта;
- интервал появления провалов напряжения;
- длительность импульса по уровню 0.5 его амплитуды;
- длительность временного перенапряжения.

Далее необходимо определить источник нерациональных энергозатрат и неоправданных потерь энергии для возможности определения потенциала энергосбережения и повышения энерге-

тической эффективности. Это, в свою очередь, позволит разработать целевую программу энергосбережения. Большинство задач имеют множество возможных альтернативных решений. Критериями выбора оптимального решения (ввод в эксплуатацию энергосберегающего оборудования FACTS и/или замена оборудования на более эффективное) безусловно будут служить показатели КЭ и другие дополнительные параметры. В качестве основных показателей КЭ необходимо выбирать те, которые потенциально способны оказывать наибольшее влияние на сеть.

Для выбора оптимального решения среди множества возможных воспользуемся запатентованной методологией, разработанной М. С. Балабановым и Р. Н. Хамитовым [6], [12], [13]. Следует отметить тот факт, что используемые авторами статьи работы ООО «МЭК» и М. С. Балабанова отличает приоритет, научная новизна и высокая практическая значимость. Научные труды [1]–[14] послужили отправной точкой для разработки авторами «Программы для предварительного анализа и выбора типа гибких систем электропередачи переменного тока» [16], а также стали основанием для проведения исследований по тематике: «Анализ и оптимальный выбор типа гибкой системы электропередачи переменного тока» [15]–[18].

Для оценки технического решения оптимально использовать математическое моделирование. Расчетный комплекс PowerFactory, разработанный компанией DIgSILENT (www.digsilent.de), по мнению специалистов [6], [7], [11], представляют наиболее удачный функционал: для моделирования различных режимов работы, анализа правильности выбранных параметров и определения оптимальной точки подключения FACTS, что позволяет оценить технико-экономический эффект от внедрения технологий FACTS.

Оптимальным средством борьбы с нежелательным влиянием резкопеременных нагрузок на КЭ может стать фильтр гармоник и активный фильтр. Существуют и другие решения.

Также не стоит забывать, что каждый тип оборудования имеет ряд модификаций и проектируется индивидуально под каждую конкретную задачу.

Фильтр гармоник – устройство, которое подавляет и потребляет гармоники, генерируемые различным оборудованием. Он состоит из резистора R , катушки индуктивности (реактора) L и конденсатора C (обычно фильтр представляет собой симметричную трехфазную RLC -цепь).

Типовой фильтр гармоник состоит из одиночных шунтирующих фильтров для гармоник низкого порядка. Эти фильтры настроены на частоту гармоники, которую они подавляют. Для гармоник более высокой частоты, устанавливаются дополнительные фильтры. В качестве примера на рис. 3 представлена однолинейная управляемая автоматически схема фильтра высших гармоник. Такой фильтр предназначен для снижения искажения кривой питающего напряжения и тока частотой 50...60 Гц с одновременным повышением коэффициента мощности, а также для компенсации реактивной мощности в сети преобразователя. Основная цель данного типа FACTS – уменьшение реактивного сопротивления LC -цепочек до значений, близких к нулю, и шунтирование на частоте заданной гармоники главной электрической сети.

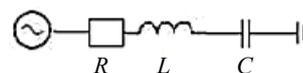


Рис. 3

На рис. 4 изображена однолинейная схема активного фильтра (АФ), параллельно подключенного к нагрузке. АФ помимо указанных RLC -элементов входят в такие активные изделия, как транзисторы или интегральные микросхемы. Также АФ может стать частью другого фильтра, который будет представлять собой гибридный фильтр (ГФ) (рис. 5).

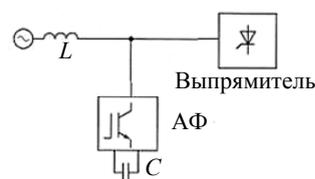


Рис. 4

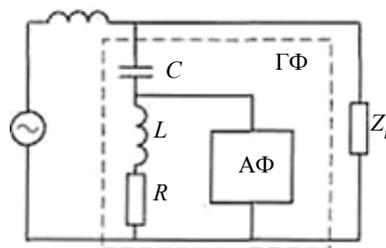


Рис. 5

При подключении резкопеременной, нелинейной и любой другой нагрузки ее гармонические токи компенсируются и сеть становится загруженной только отфильтрованным основным током. Система контроля следит за нужными параметрами сети и способна определять в режиме

реального времени (мгновенно реагировать) – исправляя любые отклонения в токе нагрузки. Время реакции активных фильтров гораздо быстрее, чем у традиционных фильтров гармоник, а также у других подобных устройств с пассивными элементами.

Основное достоинство применения оборудования данного типа проявляется при необходимости адаптации системы к изменениям характера потребления электроэнергии, совмещения в едином устройстве системы управления активным фильтром и комплекса измерения, индикации, регистрации и архивирования данных о КЭ. Данный тип оборудования является универсальным и способен вычислить:

- общий уровень гармоник по напряжению;
- общий уровень гармоник по току;
- спектр гармоник до 37-й гармоники;
- фазные напряжения;
- фазные токи;
- реактивную мощность;
- активную мощность;
- полную мощность;
- коэффициент мощности;

- реактивную мощность, требуемую для достижения необходимого коэффициента мощности;
- частоту.

На базе изделий лидера отечественного конденсаторостроения – предприятия ОАО «КВАР» (www.kvar.su), можно заключить, что АФ не ограничен по возможности фильтрации высших гармоник, имеет возможность симметризовать в определенном диапазоне потребление электроэнергии.

Задача технологии FACTS заключается в повышении эффективности управления потоками мощности, регулирования напряжения, обеспечения статической или динамической устойчивости. Внедрение FACTS способно обеспечить частичное или полное исключение негативного влияния, вызываемого превышением нормативных значений показателей КЭ. Недостатком АФ является достаточно дорогостоящее оборудование и необходимость его обслуживания высококвалифицированными специалистами, поэтому при создании автоматических систем стабилизации напряжения, автономных энергетических установок малой мощности необходимо ориентироваться на классические системы управляемых автоматически фильтров гармоник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабанов М. С., Бабошкина С. В., Хамитов Р. Н. Экологические аспекты в энергосберегающей политике на этапе создания в России интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью / Изв. Томского политехн. ун-та. 2015. Т. 326, № 11 (157). С. 141–152.

2. Балабанов М. С. Реализация кластеров архитектуры Smart Grid на примере проектов ООО «МЭК» для нужд ОАО АК «Якутскэнерго» // Эффективная энергетика–2014: сб. тр. Всерос. науч. конф. 17–19 апр. 2014 г. / под ред. Е. Э. Овчаровой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 24–41.

3. Балабанов М. С., Виноградов А. Л. Приведение параметров качества электроэнергии к требованиям ГОСТ в сети АО «Ковдорский ГОК» // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения). Т. I: Электроэнергетика: межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. С. В. Тарарыкин; редкол.: В. В. Тютиков, В. А. Шуин, Ю. Б. Казаков, В. А. Полетаев, В. Ф. Воробьев, С. В. Косяков, В. И. Колибаба, Е. Н. Бушуев, С. В. Ключина. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2015. С. 144–148.

4. Балабанов М. С., Хамитов Р. Н. Система автоматического управления режимом энергосистемы Филиала ОАО «Группа ИЛИМ» в г. Братске по напряжению и реактивной мощности // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: в 3 ч. Ч. 3: Секция «Энергетика»: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. С. 138–141.

5. Балабанов М. С., Баранова Е. М., Ощепков М. Б. Моделирование системы электроснабжения предприятия в ПО EasyPower и DigSILENT // Россия молодая. Передовые технологии – в промышленность. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. № 1. С. 104–108.

6. Балабанов М. С., Хамитов Р. Н. FACTS-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 184 с.: ил.

7. Балабанов М. С., Хамитов Р. Н. Анализ программных комплексов, применяемых при проектировании FACTS устройств // Информационные технологии в проектировании и производстве: науч.-техн. журн. 2014. № 4 (156). С. 23–28.

8. Balabanov M. S. Analysis of the Use of FACTS Devices of Different Types and the Ability to Bring Parameters of Power Quality to GOST R 54149-2010 // Comp. Modeling and Simulation: тр. междунар. науч.-техн. конф., 2–4 июля 2014 г. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 110–112.

9. Балабанов М. С., Хамитов Р. Н. Устройства компенсации реактивной мощности – базовый кластер FACTS устройств // IX Междунар. IEEE конф. «Динамика систем, механизмов и машин». Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. С. 176–181.

10. Балабанов М. С. Импортозамещение высоковольтных конденсаторных батарей // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. / отв.

ред. В. А. Шабанов; редкол.: С. Г. Конесев, М. И. Хакимьянов, П. А. Хлюпин, Р. Т. Хазиева. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. С. 209–212.

11. Балабанов М. С., Баранова Е. М. Погрешность моделирования FACTS устройств // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 1 (157). С. 28–33.

12. Балабанов М. С. Определение типа FACTS-устройств: свидетельство РФ № 2014663236; заявл. 31.10.14, опубл. 23.12.14 г. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 17.11.2015).

13. Балабанов М. С. Определение типа FACTS-устройств V 2. 0: свидетельство РФ № 2015617896; заявл. 01.06.15, опубл. 24.07.15 г. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 17.11.2015).

14. Балабанов М. С., Бабошкина С. В. Мероприятия по реализации Концепции экологической безопасности города Челябинска до 2020 года на примере модернизации ферросплавного производства ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» // Экология промышленного производства. 2014. Вып. 4 (88). С. 47–54.

15. Маннанов Э. Р., Рукавицын А. Н. Оптимальный выбор типа гибкой системы электропередачи переменного тока // III Междунар. молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы». Томск, 28 сент. – 2 окт. 2015 г.: материалы: в 3 т. Т. 3. С. 99–103.

16. Галунин С. А., Маннанов Э. Р., Рукавицын А. Н. Программа для предварительного анализа и выбора типа гибких систем электропередачи переменного тока: свидетельство РФ № 2015619931; заявл. 22.07.15, опубл. 17.09.15 г. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 21.12.2015).

17. Исследование влияния высокочастотного генератора на качество электроэнергии питающей сети / Э. Р. Маннанов, С. А. Галунин, М. С. Балабанов, Т. П. Козулина, М. Р. Маннанов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 2 (133). С. 33–40.

18. Анализ гибких систем электропередачи переменного тока / Э. Р. Маннанов, С. А. Галунин, А. Н. Рукавицын, Д. Ф. Багаутдинова // Техника и технология: Новые перспективы развития. 2015. № 2 (133). С. 15–27.

E. R. Mannanov, A. N. Rukavicyn
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

IMPROVING THE ELECTRIC POWER QUALITY WITH ABRUPTLY VARIABLE LOAD

Discusses the problems of electric power quality when connecting with abruptly variable load the ways of their solution with step-by-step examination of optimum search.

Power quality, FACTS, Smart Grid

УДК 621.3.078

А. В. Стариков, П. К. Кузнецов, И. С. Беляева
Самарский государственный технический университет

Дискретная математическая модель электромагнитного подшипника

Показано, что для синтеза цифровых регуляторов системы управления электромагнитным подшипником необходимо знание его дискретной математической модели. Рассмотрена непрерывная математическая модель электромагнитного подшипника с учетом вихревых токов. Найдена дискретная передаточная функция электромагнитного подшипника, учитывающая экстраполятор нулевого порядка, функцию которого выполняет цифровой силовой преобразователь. Показано, что полученная передаточная функция позволяет на этапе проектирования формулировать требования к вычислительной мощности микропроцессора.

Электромагнитный подшипник, цифровая система управления, период дискретизации, дискретная передаточная функция, экстраполятор нулевого порядка

Современные системы управления электромагнитными подшипниками строятся на базе цифровой микропроцессорной техники, которая отличается от аналоговой наличием квантования сигналов по времени и уровню. Наиболее пер-

спективным методом синтеза регуляторов цифровых систем является метод непрерывного прототипа [1], но он требует знания дискретной математической модели объекта управления с учетом экстраполятора. Известные работы [2], [3], по-