

УДК 621.311

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ**Хисматуллин А.С., Григорьев Е.С.***ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, Салават, e-mail: gorynychzmey02@mail.ru*

Поддержание качества напряжения в электросети, а также компенсация реактивной мощности являются ключевыми задачами обеспечения эффективности работы электрических комплексов, включающих в себя узлы нагрузок с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Компенсация высших гармоник тока существующими методами и алгоритмами с применением фильтрокомпенсирующих установок дают возможность решить задачу в рамках процесса изменчивости тока нелинейной нагрузки. Потребление нелинейной нагрузки сопровождается рядом процессов непредсказуемого характера, которые проявляются в соответствующем непостоянстве гармонического состава общего тока нагрузки. Данное обстоятельство способно коренным образом оказать влияние на величину и вектор потока реактивной мощности в сети и отрицательно подействовать на качество регулирования реактивной мощности существующими средствами. В статье разработаны алгоритм и схема регулирования конденсаторными установками в сетях с нелинейной нагрузкой, которые построены на математическом инструментарии нечеткой логики. Представлены и проанализированы результаты анализа имитационного моделирования предлагаемого нечеткого алгоритма на примере 14-узловой схемы IEEE. Полученные результаты доказывают, что при гармоническом составе, превышающем установленные нормы, разработанный алгоритм позволяет устранить сверхнормативную нагрузку конденсаторов от токов высших гармоник.

Ключевые слова: реактивная мощность, электрическая сеть, батареи статических конденсаторов, нелинейная нагрузка, нечеткая логика, нечеткие множества

SYNTHESIS OF FUZZY REFERENCE POWER COMPENSATION ALGORITHM IN ELECTRIC NETWORK WITH NONLINEAR LOAD**Khismatullin A.S., Grigorev E.S.***Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, e-mail: gorynychzmey02@mail.ru*

Maintenance of voltage quality in the power grid, as well as compensation of reactive power are key tasks to ensure the efficiency of electrical systems, including load nodes with a nonlinear voltage-current characteristic. Compensation of higher harmonics of current by existing methods and algorithms with the use of filter compensating plants makes it possible to solve the problem within the process of current nonlinear load current variability. The consumption of nonlinear load is accompanied by a number of unpredictable processes that manifest themselves in the corresponding inconsistency of the harmonic composition of the total load current. This circumstance can radically influence the magnitude and vector of the reactive power flux in the network and adversely affect the quality of reactive power control by existing means. The algorithm and the control scheme for capacitor installations in networks with nonlinear load, which are built on mathematical tools of fuzzy logic, are developed in the article. The results of the simulation analysis of the proposed fuzzy algorithm are presented and analyzed using the example of the 14-node IEEE scheme. The obtained results prove that with a harmonic composition exceeding the established norms, the developed algorithm allows to eliminate the over-standard load of the capacitors from the currents of the higher harmonics.

Keywords: reactive power, electric network, static capacitor batteries, nonlinear load, fuzzy logic, fuzzy sets

Из-за сложности распределительных электрических сетей, неравномерного графика отпуска электроэнергии потребителям, развития возобновляемых источников энергии, периодические изменения схем, выполняемые для обеспечения бесперебойного питания потребителей, планирование и реализация мероприятий по повышению эффективности функционирования электрических сетей являются сложной задачей, решение которой в современных условиях невозможно без применения интеллектуальных средств автоматизации управления.

Совершенствование информационной инфраструктуры энергоснабжающих компаний, увеличение количества и пропускной способности проводных и беспровод-

ных каналов связи упрощает организацию и повышает конкурентоспособность распределенных автоматизированных систем управления, среди прочего и перетоками реактивной электроэнергии в распределительных электрических сетях.

Использование силовых преобразователей, электронного оборудования и других нелинейных нагрузок быстро растет в промышленности, а также среди потребителей. Эти устройства характеризуются нелинейной вольт-амперной характеристикой по сравнению с традиционными нагрузками, такими как, например, резистивные нагревательные элементы. Наиболее существенными задачами повышения эффективности работы электрических сетей, включающих

в себя узлы нагрузок с нелинейным характером потребления электрической энергии, являются компенсация реактивной мощности и обеспечение требуемого качества напряжения.

Из анализа мероприятий по уменьшению потерь электроэнергии и повышения ее качества в распределительных электрических сетях известно, что одним из самых эффективных способов является установление дополнительных источников реактивной мощности и управления ими [1, 2]. Последние, уменьшая токовые нагрузки линии электропередач и силовых трансформаторов, обеспечивают снижение потерь электроэнергии и повышения качества напряжения.

В промышленных электрических сетях для компенсации реактивной мощности обычно используют конденсаторные установки. Главным элементом таких комплексов является регулирующий элемент реактивной мощности, от функционального и технического исполнения которого зависит качество компенсации реактивной мощности [3, 4]. Такие регуляторы на сегодняшний день лишены интеллектуальной составляющей и не способны эффективно работать в сетях с нелинейной нагрузкой, поскольку не учитывают гармонический состав напряжения.

Исходя из вышесказанного, разработка мероприятий по компенсации реактивной мощности в современных условиях требует совершенствования существующих и разработки новых методов оптимизации и расчетных алгоритмов, которые бы учитывали не только особенности передачи электроэнергии распределительными сетями, но и эксплуатационные особенности современных источников реактивной мощности.

Современное развитие информационных технологий и вычислительных средств формирует предпосылки для применения других подходов к решению проблемы оптимизации потоков реактивной энергии. На текущий момент методы нечеткой логики широко внедряются в промышленное производство и позволяют повышать качество регулирования в условиях неполноты информации об объекте управления [5, 6]. Именно поэтому в противопоставление к вышеописанному подходу компенсации реактивной мощности предлагается нечеткий алгоритм.

Метод теории нечеткой логики применяет вместо булевой логики экспертные оценки и использует для формирования решения совокупность нечетких функций принадлежности и правил с несколькими выводами, позволяющие сформировать базу знаний системы [7, 8]. При этом на основе экспертных знаний определяются

терм-множества параметров, нечеткого регулирования [9, 10].

Цель исследования: разработка схемы и нечеткого алгоритма компенсации реактивной мощности в электрической сети с устройствами нелинейного характера потребления электроэнергии, а также его тестирование на базе программного комплекса «MATLAB».

Материалы и методы исследования

При разработке описываемого алгоритма управления реактивной мощностью в сети с нелинейными потребителями использовались математический инструментарий нечеткой логики и метод имитационного моделирования предложенных решений на базе 14-узловой схемы IEEE [11]. Осуществлен анализ результатов компьютерного моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанный нечеткий регулятор реактивной мощности представлен на рис. 1 и описан в виде структурных блоков:

- 1 – активная нагрузка;
- 2 – датчик реактивной мощности;
- 3 – датчик величины напряжения на питающей линии;
- 4 – скорость изменения реактивной мощности;
- 5 – счетчик количества переключений, совершаемых за день;
- 6 – нечеткий регулятор;
- 7 – блок фаззификации, используемый для преобразования четких сигналов Q , Q' , U , K_U , N в нечеткие множества μQ , $\mu Q'$, μU , μK_U , μN . При этом Q , Q' , U , K_U , N – реактивная мощность, вычисленное значение производной реактивной мощности, величина напряжения, коэффициент гармонических составляющих напряжения и количество выполняемых переключений соответственно, а μQ , $\mu Q'$, μU , μK_U , μN – функции принадлежности, которые соответствуют данным параметрам;
- 8 – блок нечеткого вывода (совокупность продукционных правил системы);
- 9 – блок дефаззификации;
- 10; 11 – база функций принадлежности нечетких множеств, входные эти сигналы и набор нечетких продукционных правил;
- 12 – коммутирующий блок;
- 13 – нагрузка нелинейного характера;
- 14 – показатели несинусоидальности напряжения (датчик).

Нечеткий регулятор реактивной мощности функционирует по следующему принципу. Параметры процесса, также величина переключений секций батарей статических конденсаторов N в виде четких сигналов поступают на нечеткий регулятор. Интерпретированные в фаззификаторе сформированные

рованные нечеткие множества поступают в механизм нечеткого логического вывода [12]. Нечеткие множества находятся следующим образом:

$$F = \text{fuzzifier}(Q, Q', U, K_U, N), \quad (1)$$

где Q, Q', U, K_U, N – совокупность четких сигналов, описанных выше;
 F – результат фаззификации;
 fuzzifier – оператор, позволяющий осуществить операцию фаззификации.

После этапа фаззификации необходимо обработать лингвистические выходные переменные, которые должны быть переведены в четкое значение. Цель состоит в том, чтобы получить управляющее воздействие, которое наилучшим образом соответствует полученным нечетким значениям лингвистических переменных. Для этого используется операция дефаззификации – обратного преобразования, которое выводит результат из нечеткой области обратно в четкие значения. Текущий метод формирует суммарный выход, учитывая все элементы результирующего нечеткого множества с соответствующими весами.

Регулирование потоков реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой реализовано программным образом. Блок-схема данного алгоритма, представлена на рис. 2. Параметры от датчиков, значение производной реактивной мощности (Q'), а также число совершаемых переключений секций батарей статических конденсаторов за день при увеличении коэффициента K_U выше нормы, поступают на блок нечеткого механизма принятия решения.

Решение переключения формируется с учетом текущих значений выходного вектора состояний секций с выдержкой времени в зависимости от числа выполняемых переключений и динамики изменения реактивной мощности. При невыполнении условия $K_U > K_U^{\text{норм}}$ происходит отключение секций батарей статических конденсаторов. При выполнении условия отключение секций батарей статических конденсаторов. При выполнении условия $\text{tg}\phi \leq \text{tg}\phi_{\text{уст}}$ работа нечеткого регулятора завершается, где $\text{tg}\phi$ и $\text{tg}\phi_{\text{уст}}$ – текущее и установленное значения коэффициента реактивной мощности соответственно.

Предлагаемый алгоритм был протестирован в программе «MATLAB», в комплексе «Simulink» на базе 14-узловой схемы IEEE (рис. 3). Испытательная схема включает в себя 14 шин, 5 генераторов и 11 нагрузок.

Полученные диаграммы нечеткого управления реактивной мощностью (а) и $\text{tg}\phi$ (б) изображены на рис. 4 (♦ – исходный режим, ■ – режим с использованием нечеткого регулирования, ▲ – режим с учетом K_U).

Как видно из рис. 4, в соответствии с управлением при учете значения гармонических составляющих напряжения нечеткий регулятор формирует управляющие сигналы только при его малых значениях и значениях, находящихся в пределах нормы. При управлении значения $\text{tg}\phi$ в некоторые моменты времени (например, в период 4–7 ч. $\text{tg}\phi = 0,71$) получаются выше нормы. Но, несмотря на это, даже если гармонические составляющие напряжения выше нормы, предотвращаются перегрузка батарей статических конденсаторов.

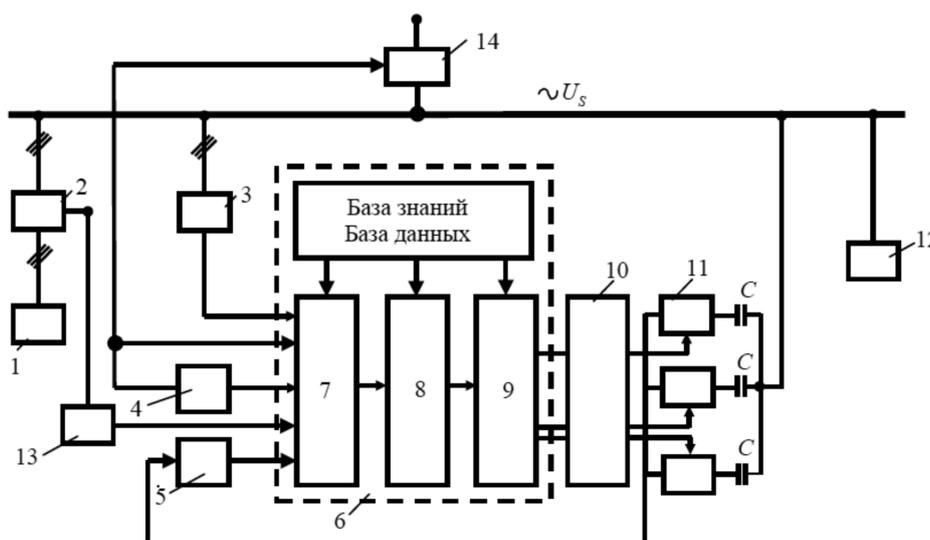


Рис. 1. Структурная схема нечеткого регулятора реактивной мощности

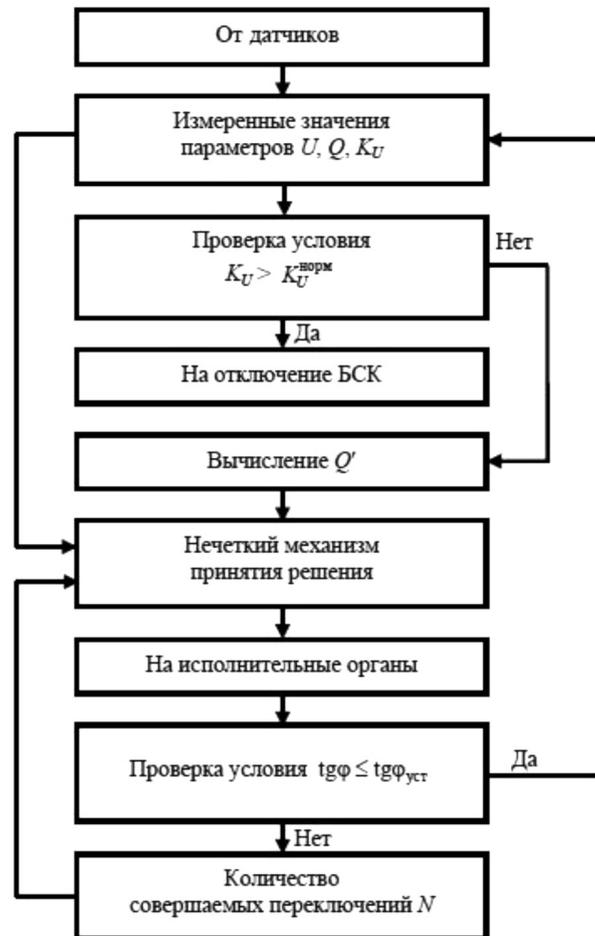


Рис. 2. Нечеткий алгоритм компенсации реактивной мощности

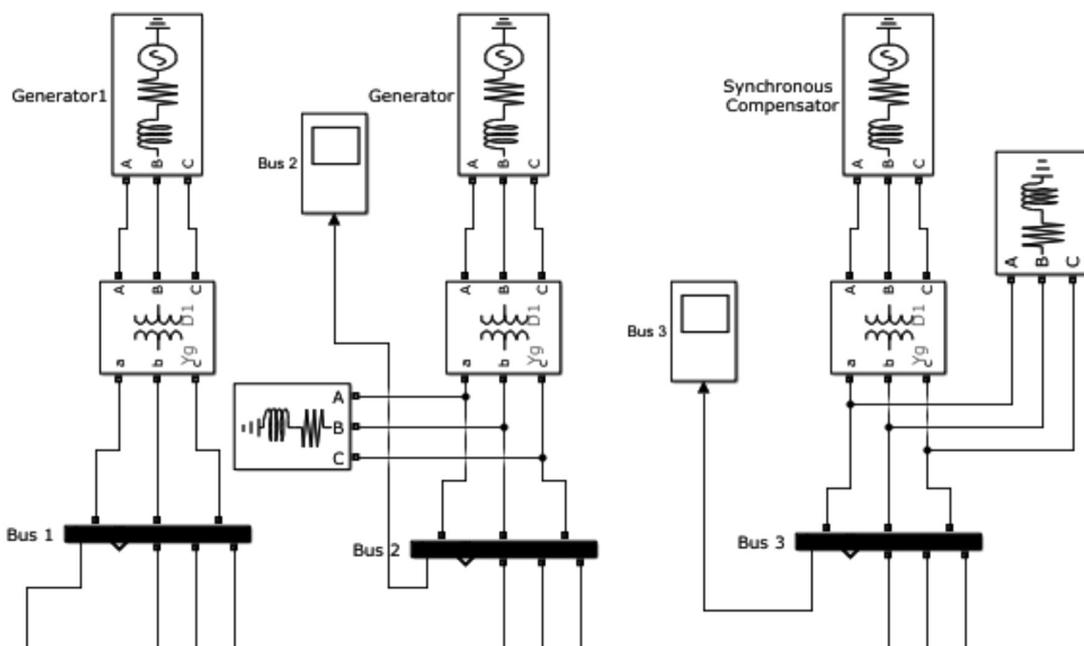


Рис. 3. Фрагмент 14-узловой схемы IEEE в «MATLAB»

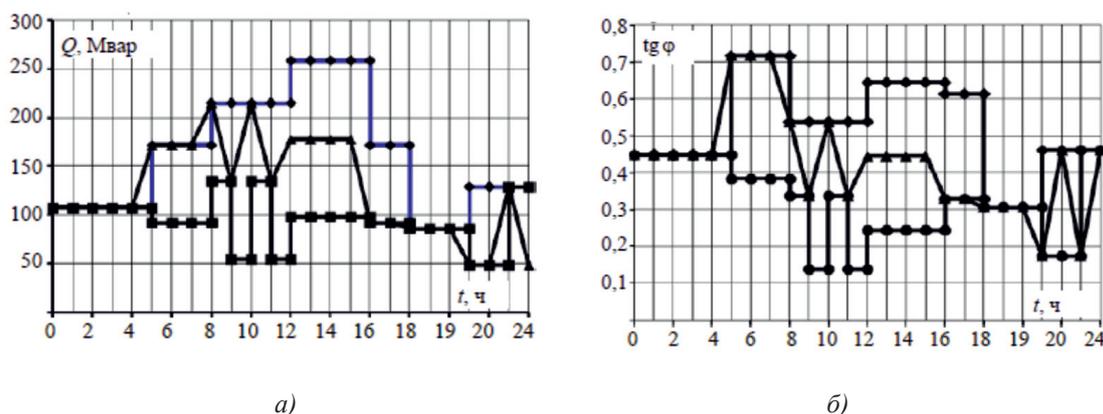


Рис. 4. Результаты моделирования предложенных решений (диаграмма реактивной мощности (а) и $\text{tg}\phi$ (б))

Данные методы могут качественным образом повлиять на срок службы конденсаторной батареи, а также снизить количество мероприятий по осуществлению текущего и капитального ремонтов по отношению к ней. Уменьшается вероятность отказа конденсаторной батареи и повышается надежность при эксплуатации.

Заключение

Таким образом, на базе математического аппарата нечеткой логики предложен алгоритм нечеткого регулирования реактивной мощности в электросети с нелинейными потребителями электрической энергии. Данное решение дает возможность поддерживать коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\phi$ в рамках, регламентируемых в технических условиях для потребителей, а также может применяться для обеспечения нормального эксплуатационного состояния батарей статических конденсаторов.

Список литературы

1. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 2011. 182 с.
2. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 2011. 200 с.
3. Копытов Ю.В., Железко Ю.С., Файницкий В.В. Требования по компенсации реактивной мощности потребителей электроэнергии // Промышленная энергетика. 2012. № 11. С. 39–42.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 2010. 184 с.

5. Правила пользования электрической и тепловой энергией. М.: Энергоиздат, 1999. 174 с.

6. Ермилов А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 2014. 368 с.

7. Попов Н.А. Вакуумные выключатели. М.: Энергия, 2013. 112 с.

8. Бронштейн А.М. Исследования дугогасительных устройств выключателей высокого напряжения. М.: Информэлектро, 2009. Вып. 1. 58 с.

9. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электросетях предприятий. М.: Энергия, 2015. 112 с.

10. Хисматуллин А.С., Григорьев Е.С. Управление конденсаторными установками на базе нечеткого регулятора с двойной базой правил // Экология и ресурсосбережение в нефтехимии и нефтепереработке: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате и году экологии. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. С. 219–221.

11. Хисматуллин А.С., Григорьев Е.С. Имитационное моделирование компенсации реактивной мощности на базе батарей статических конденсаторов в программном комплексе Simulink // Актуальные направления научных разработок в технических вузах нефтегазового профиля: материалы Международной научно-технической конференции «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля 2018» Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. С. 138–141.

12. Веников В.А., Жуков Л.А., Карташов И.И. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях. М.: Энергия, 2005. 135 с.

13. Хисматуллин А.С., Григорьев Е.С. Нечеткий алгоритм компенсации реактивной мощности на базе батарей статических конденсаторов // Актуальные направления научных разработок в технических вузах нефтегазового профиля: материалы Международной научно-технической конференции «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля 2018». Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. С. 141–143.