

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-313-326

УДК 621.311

Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой

Г. Б. Гулиев¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Важнейшими задачами обеспечения эффективности функционирования электрических сетей, содержащих узлы нагрузок с нелинейным характером электропотребления, являются компенсация реактивной мощности и поддержание качества напряжения в сети в целом. Существующие методы компенсации высших гармоник тока с помощью фильтрокомпенсирующих устройств позволяют решить задачу в рамках процесса изменчивости тока нелинейной нагрузки. В реальных условиях стохастический характер процессов потребления нелинейной нагрузки проявляется в соответствующих изменениях гармонического состава и их доли в общем токе нагрузки. Это может существенно повлиять на величину и направление потока реактивной мощности в сети и ухудшить процесс регулирования реактивной мощности существующими средствами. Предлагаются схема и алгоритм регулирования конденсаторными установками в сетях с нелинейной нагрузкой, построенных на использовании математического аппарата нечеткой логики. Приводятся результаты анализа модельных экспериментов режимов гармонического потокораспределения на примерах 14-узловой схемы IEEE и схемы реальной электрической сети с мощной тяговой подстанцией. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при гармоническом составе, превосходящем нормативные значения, использование предложенного алгоритма позволяет устранить дополнительную нагрузку конденсаторов от токов высших гармоник, а само регулирование получается качественным, количество переключений снижается, конденсаторная батарея служит дольше и вероятность ее отказа уменьшается.

Ключевые слова: электрическая сеть, управление реактивной мощностью, несинусоидальность напряжения, нелинейная нагрузка, нечеткие множества, нечеткая логика, функция принадлежности

Для цитирования: Гулиев, Г. Б. Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой / Г. Б. Гулиев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 313–326

Адрес для переписки

Гулиев Гусейнгулу Байрам
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт
энергетики
просп. Г. Зардаби, 94
Az1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +994 12 431-64-07
huseyngulu@mail.ru

Address for correspondence

Guliyev Huseyngulu B.
Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Institute
of Energetics
94 G. Zardabi Ave.,
Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +994 12 431-64-07
huseyngulu@mail.ru

Fuzzy Algorithm to Control Reactive Power Flow in Electric Network with Nonlinear Loads

H. B. Guliyev¹⁾

¹⁾Azerbaijan Research and Design-and-Exploration Institute of Power Engineering
(Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. One of the important problems of efficient function of electric networks containing load nodes of nonlinear character of power consumption is reactive power compensation and maintaining voltage quality in a grid. The commonly used methods for compensation of harmonic currents by filtering devices make it possible to solve the problem in a narrow band of variation of current of a nonlinear load. In the reality stochastic character of power consumption of nonlinear load reveals itself in appropriate changes in harmonic components of voltage and their share in total load current. This could considerably change the magnitude and direction of reactive power flow in a grid and impair the existing processes of reactive power control. The scheme and the algorithm of control of capacitor banks in networks with non-linear load that are based on the use of fuzzy logic software are presented in the article. The results of model experiments analysis of the modes of the harmonic of the power flows on behalf of the 14-nodal scheme recommended by IEEE as well as the schemes of a real grid with powerful traction substation are presented. The mentioned results demonstrate that when harmonic components of voltages exceed normative magnitudes, the use of the proposed algorithm eliminates additional loading on the capacitor banks with higher harmonic currents whereas the control procedure acquires quality, the number of commutations is being reduced, the capacitor battery functions longer and the probability of its malfunction decreases.

Keywords: electric network, managements of reactive capacity, non-sinusoidal voltage, nonlinear loading, fuzzy sets, fuzzy logic, membership function

For citation: Guliyev H. B. (2016) Fuzzy Algorithm to Control Reactive Power Flow in Electric Network with Nonlinear Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 313–326 (in Russian)

Введение

В последние годы широкое использование в сетях электроснабжения различных установок силовой электроники, а также рост доли энергоемких потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой послужили причиной интенсивности потоков реактивной мощности (РМ) в распределительных электрических сетях [1, 2]. Особенность потоков РМ в подобных сетях состоит в том, что она имеет полигармонический характер со случайно изменяющимся значением. В результате протекания РМ от токов высших гармоник в сетях возникают дополнительные потери мощности и напряжения. Компенсация РМ в узлах сети с подключенной нагрузкой нелинейного характера имеет важное практическое значение [3, 4].

В статье предлагаются схема и алгоритм компенсации РМ в сети электроснабжения с нелинейной нагрузкой (НН) с помощью регулируемых батарей статических конденсаторов (БСК). Данный алгоритм реализован в виде нечеткого регулятора, стабилизирующего величину напряжения в узле подключения в зависимости от составляющих РМ каждой гармоники.

Принцип работы нечеткого регулятора в сети с нелинейной нагрузкой

Принцип работы предлагаемого нечеткого регулятора реактивной мощности (НР РМ) может быть описан в виде следующей блочной структуры (рис. 1): 1 – «спокойная» нагрузка; 2 – датчик РМ; 3 – датчик напряжения

на шинах потребителя; 4 – «Динамика» (скорость изменения РМ); 5 – счетчик количества переключений, совершаемых за день; 6 – нечеткий контроллер; 7 – фаззификатор, предназначенный для трансформации четких сигналов Q, Q', U, K_U, N в нечеткие множества $\mu_Q, \mu_{Q'}, \mu_U, \mu_{K_U}, \mu_N$ (где Q, Q', U, K_U, N – РМ, производная РМ, напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и количество выполняемых переключений соответственно, а $\mu_Q, \mu_{Q'}, \mu_U, \mu_{K_U}, \mu_N$ – соответствующие им функции принадлежности); 8 – механизм нечеткого вывода (таблица лингвистических правил, т. е. совокупность нечетких правил, описывающих нечеткое отношение между входными и выходными параметрами контроллера); 9 – дефаззификатор, где полученное нечеткое значение после дефаззификации в виде четкого управляющего воздействия поступает на вход блока управления 11; 10 – база данных, где хранятся функции принадлежности (ФП) нечетких множеств, описывающих эти сигналы, и базы знаний, где хранятся нечеткие правила управления; 12 – блок коммутации; 13 – нелинейная нагрузка, которая является источником высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения; 14 – датчик показателей несинусоидальности напряжения.

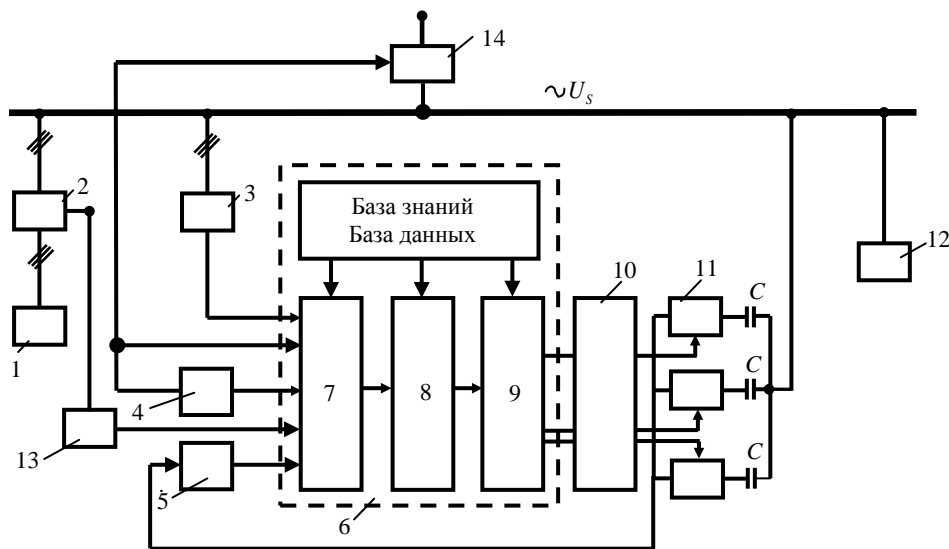


Рис. 1. Структурная схема нечеткого регулятора реактивной мощности с учетом влияния высших гармонических составляющих напряжения

Fig 1. Structural scheme of a fuzzy controller for reactive power that accounts the influence of higher harmonic components of voltage

Нечеткий регулятор реактивной мощности работает следующим образом. Текущие выходные сигналы управляемого процесса – реактивная мощность Q , ее производная Q' , напряжения U , суммарный коэффициент гармонических составляющих K_U [5] и количество переключений секций БСК N в виде четких сигналов поступают на вход нечеткого контроллера. Трансформированные в фаззификаторе нечеткие сигналы в виде нечетких

множеств поступают в механизм нечеткого вывода. Для этого используется следующий оператор фаззификации [6–8]:

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

где Q, Q', U, K_U, N – четкие сигналы, поступающие в систему; F – нечеткое множества; fuzzifier – оператор фаззификации.

Механизм вывода, получая эти нечеткие сигналы с использованием базы данных 14, где хранятся ФП нечетких множеств $\mu_Q, \mu_{Q'}, \mu_U, \mu_{K_U}, \mu_N$, описывающих эти сигналы, и базы знаний, где хранятся нечеткие правила управления в виде (1), осуществляет логический вывод для получения нечетких выходных сигналов контроллера направления Dr и задержки DL . База данных включает дискретизацию, нормализацию универсума, нечеткое разделение пространства входов и выходов, определение ФП нечетких множеств. Для проектирования базы знаний сначала определяются переменные состояния и переменные управления, источники типов нечетких правил управления и др. Так как на вход исполнительного органа (блок управления – БК) 10 должен поступить четкий управляющий сигнал, то дефаззификатор осуществляет отображение из допустимого пространства нечетких управляющих воздействий в пространство четких управляющих воздействий. Для этого используется следующий оператор:

$$Y = F^{-1}(\mu_i(Y^*)); \quad (2)$$

$$\mu_i(Y^*) = \max(\min(\mu_i(Q), \mu_i(Q'), \mu_i(U), \mu_i(K_U), \mu_i(N))), \forall i, \quad (3)$$

где Y – вектор четких управляющих воздействий; $F^{-1}(\cdot)$ – оператор дефаззификации; Y^* – вектор результирующих нечетких управляющих воздействий; $\mu_i(\cdot)$ – результирующая ФП управляющих воздействий.

Алгоритм регулирования реактивной мощности

Регулирование реактивной мощности в сети с нелинейной нагрузкой реализуется программно в блоке в виде последовательности вычислительной процедуры, представленной на рис. 2. Измеренные датчиками значения параметров состояния (выходные параметры) (U – напряжения; Q – реактивная мощность; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения), вычисленные значения производной РМ, а также количество совершаемых переключений секций БСК за день при выполнении условия $K_U > K_U^{\text{норм}}$ поступают на блок нечеткого механизма принятия решения.

С учетом текущих значений выходного вектора состояний принимается одно из решений переключения секций с задержкой времени в зависимости от количества выполняемых переключений и динамики изменения РМ: «Вверх», «Вниз», «Стоп». При невыполнении условия $K_U > K_U^{\text{норм}}$ про-

исходит отключение секций БСК. При выполнении условия $\text{tg}\varphi \leq \text{tg}\varphi_{\text{уст}}$ работа контроллера считается завершенной, где $\text{tg}\varphi$ и $\text{tg}\varphi_{\text{уст}}$ – текущее и установленное значения коэффициента реактивной мощности соответственно ($\text{tg}\varphi = Q/P$). В противном случае количество совершаемых переключений за день подается на механизм принятия решения, и работа алгоритма повторяется.

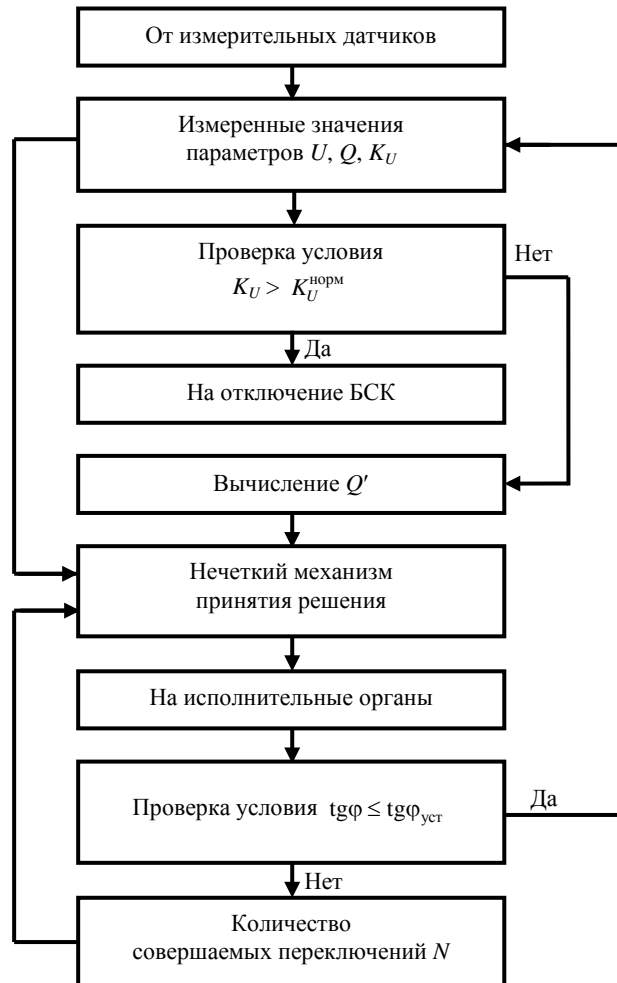


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нечеткого управления потоками реактивной мощности

Fig. 2. The block diagram of algorithm of reactive power flow fuzzy control

Нечеткая модель нечеткого регулятора реактивной мощности

Для идентификации нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани. Для непрерывных универсумов ФП нечетких множеств имеют треугольную, трапецидальную, колоколообразную – S- и Z-образные – формы. Описываются они формулами и параметрами, приведенными в табл. 1 [9–11].

При работе контроллера по алгоритму Мамдани в распределительных сетях (поддержание отклонения РМ в нормируемых пределах) [2] на вход нечеткого контроллера подавались: вычисленное значение РМ, динамика изменения РМ, вычисленное значение напряжения и наибольшее количество переключений за день, совершаемых установкой. С выхода контроллера снимались значения лингвистических переменных «Направление», «Задержка».

Таблица 1

Параметры и формулы функций принадлежности
The parameters and formulas of membership functions

Функция принадлежности	Параметр	Формула
S-образная	a, b	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x > b \end{cases}$
Z-образная	b, c	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$
Треугольная	a, b, c	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$
Трапецеидальная	a, b_1, b_2, c	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b_1-a}, & a < x < b_1 \\ \frac{c-x}{c-b_2}, & b_2 < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$

Все входные и выходные величины являются четкими значениями, поскольку снимаются с приборов, измеряющих значения реальных параметров. Далее, в самом контроллере, эти величины преобразуются в нечеткие. После срабатывания нечетких правил полученные выходные переменные вновь преобразуются в четкий вид.

Для работы нечеткого контроллера использовались лингвистические переменные на входе контроллера (входные переменные). Нечеткие значения, ФП и параметры входных лингвистических переменных показаны в табл. 2. После дискретизации и определения нечетких значений термножеств $T_{E_{ij}}(\cdot)$ переменных состояний (параметры входа) и управляемых параметров (параметры выхода) $T_{E_{1j}}(Q)$ с $j=\overline{1,5}$, $T_{E_{2j}}(Q')$ с $j=\overline{1,3}$, $T_{E_{3j}}(U)$

с $j = \overline{1,4}$, $T_{E_{4j}}(K_U)$ с $j = \overline{1,3}$, $T_{E_{5j}}(DL)$ с $j = \overline{1,2}$, $T_{E_{6j}}(Dr)$ с $j = \overline{1,3}$, $T_{E_{7j}}(Dy)$ с $j = \overline{1,5}$ составляли набор нечетких правил управления (нечеткое моделирование).

Таблица 2

Нечеткие значения, функции принадлежности и параметры входных и выходных лингвистических переменных

Fuzzy values, membership functions and input and output parameters of linguistic variables

Значение переменной	Функция принадлежности	Параметр
Реактивная мощность		
Очень малое	Z-образная	(0; 0,05)
Малое	Трапецеидальная	(0; 0,05; 0,15; 0,2)
Среднее	Трапецеидальная	(0,15; 0,2; 0,4; 0,45)
Большое	Трапецеидальная	(0,4; 0,45; 0,85; 0,95)
Очень большое	S-образная	(0,8; 0,91; 1)
Динамика		
Отрицательное	Z-образная	(-0,5; 0)
Нулевое	Треугольная	(-0,8; 0; 0,8)
Положительное	S-образная	(0; 0,5)
Напряжение		
Низкое	Трапецеидальная	(0,69; 0,749; 0,89; 0,95)
Нормальное	Трапецеидальная	(0,89; 0,94; 1,05; 1,1)
Высокое	S-образная	(1,05; 1,1)
Аварийное	Z-образная	(0,69; 0,74)
Гармонические искажения		
Нормальное	Z-образная	(2,5; 6)
Немного большее	Треугольная	(2,5; 6; 9)
Большое	S-образная	(6; 9)
Количество		
Малое	Z-образная	(0; 7; 10)
Не малое	S-образная	(7; 10; 12)
Направления		
Вверх	Трапецеидальная	(0,5; 0,75; 1,25; 1,5)
Вниз	Трапецеидальная	(-1,5; -1,25; -0,75; -0,5)
Стоп	Трапецеидальная	(-0,5; -0,25; 0,25; 0,5)
Задержка		
Очень малое	Z-образная	(0; 0,05)
Короткое	Трапецеидальная	(0; 0,05; 0,15; 0,2)
Среднее	Трапецеидальная	(0,15; 0,2; 0,4; 0,45)
Долгое	Трапецеидальная	(0,4; 0,45; 0,85; 0,95)
Очень долгое	S-образная	(0,8; 0,9; 1,1)

Нечеткие правила управления имеют форму нечетких условных утверждений, которые соотносят переменные состояния в антецеденте (посылка правила) и управляющие переменные процесса в консеквентах (заключение правила) [9, 10]. Для многих нечетких логических контроллеров используются нечеткие правила, имеющие следующий вид:

если (if) x_1 есть (is) A_{11} и (and) x_2 есть (is) A_{12} , ..., и (and) x_n есть (is) A_{1n} , то (then) y есть (is) B_1 ;
если (if) x_1 есть (is) A_{21} и (and) x_2 есть (is) A_{22} , ..., и (and) x_n есть (is) A_{2n} , то (then) y есть (is) B_2

.....
если (if) x_1 есть (is) A_{m1} и (and) x_2 есть (is) A_{m2} , ..., и (and) x_n есть (is) A_{mn} , то (then) y есть (is) B_m .

По приведенным выше переменным состояния и управления составлено 67 наборов правил нечеткого управления для данной НР РМ в вышеуказанной форме.

Результаты компьютерного моделирования

Для апробации разработанных моделей и алгоритма управления РМ электрической сети с нелинейными потребителями проведены расчетные тесты для 14-узловой схемы IEEE, и для реальной схемы электрической сети системы Азербайджана.

Спектры напряжения для двух характерных узлов 14-узловой схемы IEEE (B4, B14) изображены на рис. 3а, b и для реальной схемы энергосистем (B5, B10) при работе шестифазных вентильных преобразователей тяговой подстанции (ПС), подключенных на эти узлы с максимальной нагрузкой, – на рис. 3с, d. В обоих спектрах доминируют гармоники 5, 7, 11, 13. Как видно из рис. 3а, d, в узле B4 схемы IEEE 5-я гармоника достигает значения 6 %, в узле B10 реальной схемы – 16 %.

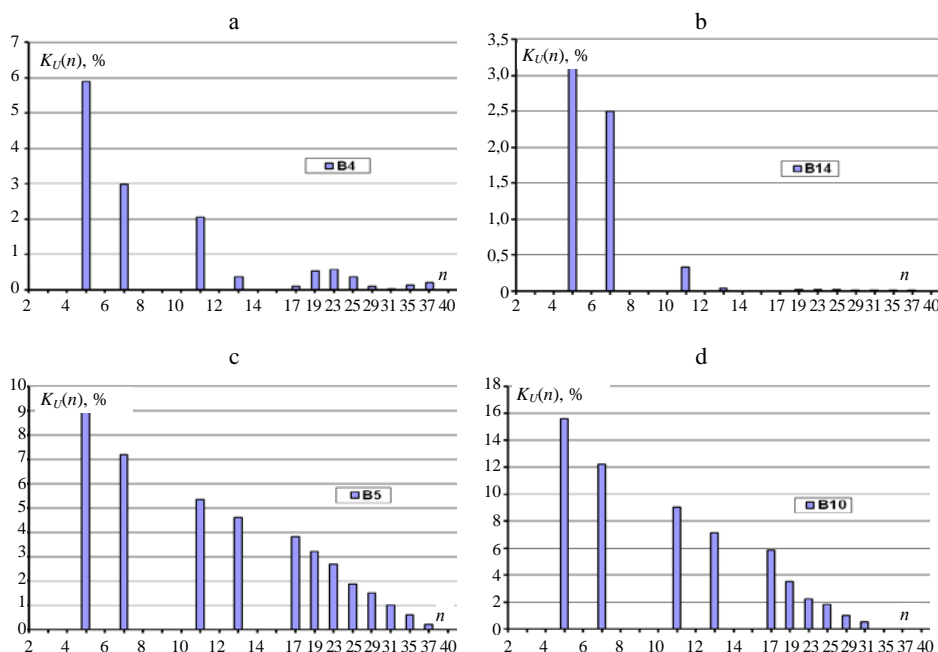


Рис. 3. Спектральный состав напряжения для характерных узлов сети:
а, b – для 14-узловой схемы IEEE; с, d – для реальной схемы энергосистемы

Fig. 3. Spectral composition of voltage of the characteristic network nodes:
а, b – for the 14-node IEEE scheme; с, d – for the real circuit of power system

Профиль коэффициента суммарного гармонического искажения напряжения K_U по узлам схемы IEEE и реальной электрической сети энергосистемы изображен на рис. 4а, б. Как видно, во всех случаях $K_U > 2\%$ и превышает установленные нормы для шин напряжением 110 кВ [3]. Например, на шинах 110 кВ ПС № 4 схемы IEEE $K_U > 7\%$, а на шинах ПС № 9 $K_U > 6\%$ (рис. 4а), для реальной электрической сети на шинах ПС № 12, 15 и 16 $K_U > 10\%$, а на шинах ПС № 1–3 и № 9 $K_U > 9\%$. Аналогичные результаты получаются на шинах 35 и 10 кВ. На этих шинах значения коэффициента K_U значительно превосходят установленные нормы для данных классов напряжения. Так, на шинах 35 кВ ПС № 8 этот показатель находится в пределах 15% ($K_U^{\text{норм}} = 4\%$), а на шинах 10 кВ – $20\text{--}25\%$ ($K_U^{\text{норм}} = 5\%$). На шинах 10 кВ действующее значение напряжения уменьшается соответственно до $7,90\%$ и $8,05\%$.

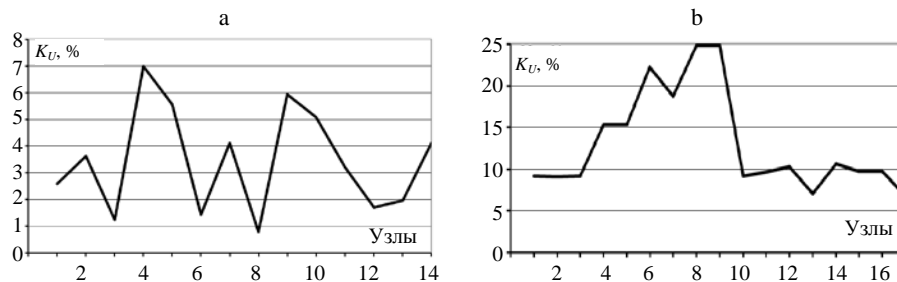


Рис. 4. Профиль коэффициента K_U в максимальном режиме нелинейных потребителей: а – для 14-узловой схемы IEEE; б – для реальной электрической сети

Fig. 4. The profile of the K_U coefficient in the maximum mode of non-linear consumers: а – 14 node IEEE scheme; б – for a real electric network

Итак, на основании результатов проведенных расчетных экспериментов на формате ЕТАР можно сделать вывод о том, что в условиях несинусоидальности питающего напряжения необходимо учесть значение суммарного коэффициента гармонических составляющих в нечетком алгоритме управления РМ для предотвращения частых перегрузок БСК и соответственно обеспечения невыхода из строя их секций. Для представления эффективности использования предложенного нечеткого алгоритма в виде (3) НР РМ в электрических сетях энергосистем в условиях несинусоидальности питающего напряжения проведены расчетные эксперименты путем компьютерного моделирования в среде программного комплекса MatLab с использованием модуля Fuzzy Logic Toolbox [12]. Фрагмент процедуры принятия решения на основе реализации алгоритма отображен на рис. 5. При моделировании использованы типичные суточные графики активных и реактивных нагрузок, которые показаны на рис. 6.

Благодаря компьютерной реализации алгоритма НР РМ на основе базы знаний в виде (3) получены две пары управления поверхности $Y = f(U', K_U)$ и $Y = f(Q, K_U)$, которые изображены на рис. 7а, б.



Рис. 5. Фрагмент процедуры принятия решения

Fig. 5. A fragment of the decision-making procedure

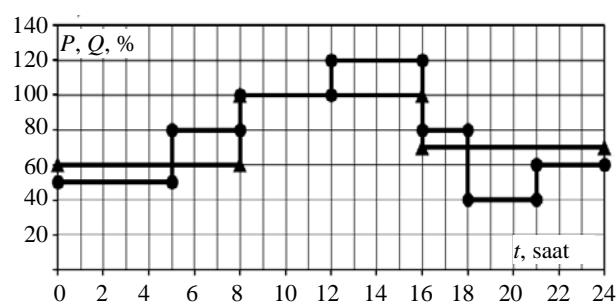


Рис. 6. Типичные суточные графики активных и реактивных нагрузок:

—●— реактивной нагрузки; —▲— активной нагрузки

Fig. 6. A typical daily schedule of active and reactive loads:

—●— reactive load; —▲— resistive load

Если $K_U = \text{Нормальное}$, то для уменьшения напряжения и коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ НР РМ принимает решения о включения секции БСК, а при соответствии напряжения термам, выше номинальных напряжений, нечеткий контроллер формирует управляющее воздействие на отключение секций БСК.

При значении $K_U = \text{Большое}$ нечеткий контроллер принимает решение мгновенного отключения БСК независимо от значений напряжений и $\text{tg}\varphi$.

При $K_U = \text{Немного большое}$ в зависимости от значения напряжения и $\text{tg}\varphi$ контроллер принимает то или иное решение в соответствии с алго-

ритмом управления НР РМ. Время выдержки работы контроллера генерируется в зависимости от количества переключений секций БСК и от значения переменной «Динамика». Если количество переключений за день мало и динамика отрицательная, то задержка будет средней. Если количество переключений за день мало и динамика положительная, то задержка будет короткой, и т. п.

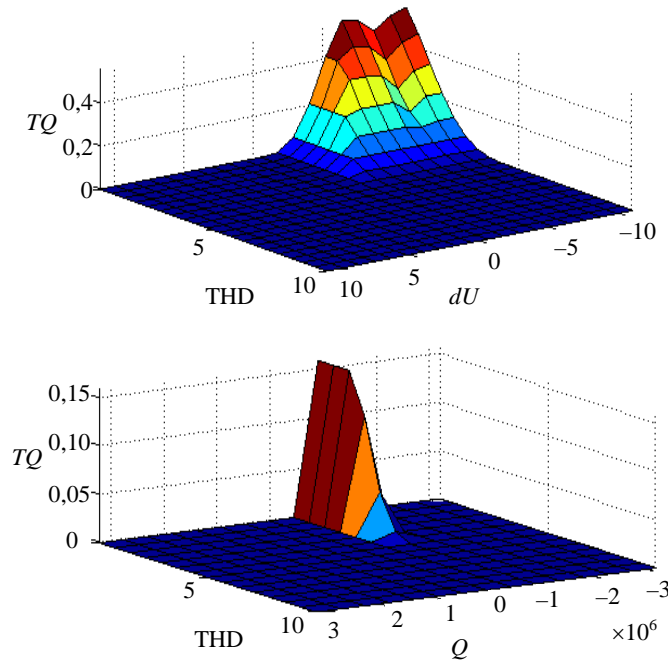


Рис. 7. Управление поверхностью с учетом значений K_U

Fig. 7. The surface control based on the values of K_U

Полученные диаграммы нечеткого управления РМ (а) и $\text{tg}\varphi$ (б) при исходном режиме с учетом и неучетом значений коэффициента K_U изображены на рис. 8а, б. Как видно из рис. 8, в соответствии с управлением поверхности при учете значения K_U нечеткий контроллер вырабатывает управляющие сигналы только при ее малых значениях и значениях, находящихся в пределах нормы ($K_U^{\text{норм}}$), установленных [3]. При управлении значения $\text{tg}\varphi$ в определенные часы (например, часов в 4–7 $\text{tg}\varphi = 0,71$) получаются выше нормы. Но несмотря на это, при условии $K_U > K_U^{\text{норм}}$ предотвращаются перегрузка конденсаторов БСК, а также их преждевременный выход из строя.

Таким образом, на основе нечеткого алгоритма Мамдани предложен алгоритм НР РМ в электрических сетях со специфическими нагрузками с целью поддержания значения коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ в пределах, установленных в технических условиях для потребителей, а также для обеспечения нормального эксплуатационного состояния БСК. В результате учета в алгоритме ВГС напряжения предотвращаются пере-

грузки БСК с токами высших гармоник. Это приводит к повышению надежности переключающих устройств, а также БСК.

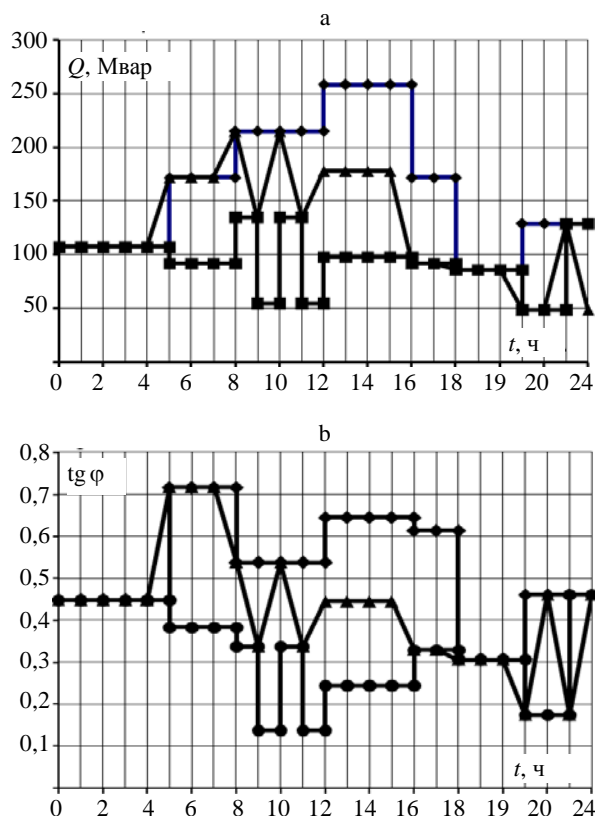


Рис. 8. Диаграммы управления реактивной мощностью (а) и $\text{tg } \varphi$ (б):
 —◆— — исходный режим; —■— — после нечеткого регулирования;
 —▲— — то же с учетом K_U

Fig. 8. Chart of the control of reactive power (a) and $\text{tg } \varphi$ (b):
 —◆— — original mode; —■— — the one after fuzzy regulation;
 —▲— — the same in consideration of K_U

ВЫВОДЫ

1. Предложены структурная схема и алгоритм для нечеткого регулятора реактивной мощности в распределительных электрических сетях энергосистем, работающих со специфическими нагрузками. Выполнены расчетные эксперименты в реальной электрической сети с преобразовательными установками, питающими электрифицированный транспорт. Полученные результаты свидетельствуют о том, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения значительно превосходит установленные нормы.

2. Результаты компьютерного моделирования предложенного метода регулирования показали, что учет гармонических составляющих напряже-

ния позволяет устранить дополнительную нагрузку БСК с токами высших гармоник, а само регулирование получается качественным, количество переключений снижается, конденсаторная батарея служит дольше и вероятность ее отказа уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rashtchizadeh, A. Genetic Algorithm for Optimal Distributed Generation Siting and Sizing for Losses and Voltage Improvement / A. Rashtchizadeh, N. Rahmanov, K. Dursun // *International Journal for Knowledge, Science and Technology*. 2009. Vol. 1, No 1. P. 56–61.
2. Воронин, К. А. Эффективность компенсации реактивной мощности при больших нелинейных нагрузках / К. А. Воронин, Ю. В. Рахманова, Ю. Волкова // *Промышленная энергетика*. 2015. № 8. С. 54–58.
3. Wilkosz, K. Harmonic Sources Localization: Comparison of Methods Utilizing the Voltage Rate or the Current Rate / K. Wilkosz // 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU. Barcelona, Spain, 2007. Article number 4424101.
4. Harmonic Propagation Analysis in Electric Energy Distribution Systems / C. A. Canesin [et al.] // 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007). Lisbon, Portugal: IEEE, 2007. P. 577–583.
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.02.2016. М.: Госстандарт, 2015. 18 с.
6. Гашимов, А. М. Улучшенный алгоритм нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в распределительных сетях / А. М. Гашимов, Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2014. № 2. С. 29–39.
7. Guliyev, H. B. System of Automatic Regulation of Reactive Power by Means of Fuzzy Logic. Reliability / H. B. Guliyev, Z. I. Farkhadov, J. F. Mammadov // *Reliability: Theory & Applications*. 2015. Vol. 10, No 2 (37). P. 50–58.
8. Рахманов, Н. Р. Идентификация структуры нечеткого регулятора реактивной мощности индукционной печи / Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев, З. И. Фархадов // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 4. С. 28–31.
9. ИУС газопромысловых объектов. Современное состояние и перспективы развития / Р. А. Алиев [и др.]. М.: Недра, 2014. 462 с.
10. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
11. New Approach Based on Fuzzy Controller for Volt/Var Control in Distribution System / M. Nayeripour [et al.] // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010. Vol. 4, No 3. P. 468–480.
12. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. Version 2. The MathWorks. Inc. 1999.

Поступила 14.12.2015 Подписана в печать 12.02.2016 Опубликовано онлайн 03.08.2016

REFERENCES

1. Rashtchizadeh A., Rahmanov N., Dursun K. (2009) Genetic Algorithm for Optimal Distributed Generation Siting and Sizing for Losses and Voltage Improvement. *International Journal for Knowledge, Science and Technology*, 1 (1), 56–61.
2. Voronin K. A., Rakhmanova Yu. V., Volkova Yu. (2015) The Effectiveness of Reactive Power Compensation for Large Nonlinear Loads. *Promyshlennyya Energetika* [Industrial Power Engineering], (8), 54–58 (in Russian).
3. Wilkosz K. (2007) Harmonic Sources Localization: Comparison of Methods Utilizing the Voltage Rate or the Current Rate. *9th International Conference on Electrical Power Quali-*

- ty and Utilisation, EPQU. Barcelona, Spain, Article number 4424101. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424101/.
4. Oliveira L. C. O., Melo G. A., Souza J. B., Canesin C. A., Bonatto B. D., Belchior F. N., Oliveira M., Mertens E. A. (2007) Harmonic Propagation Analysis in Electric Energy Distribution Systems. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*. Lisbon, Portugal, 577–583. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128827.
 5. State Standard 32144–2013. Electric Power. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Quality Norms of Electric Power in Power Supply Systems of General Purpose. Moscow, Gosstandart, 2015. 18 (in Russian).
 6. Gashimov A. M., Rahmanov N. R., Guliyev G. B. (2014) Improved Algorithm of Fuzzy Logic for Control of Reactive Capacity and Voltage in Distributive Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (2), 29–39 (in Russian).
 7. Guliyev H. B., Farkhadov Z. I., Mammadov J. F. (2015) System of Automatic Regulation of Reactive Power by Means of Fuzzy Logic. Reliability. *Reliability: Theory & Applications*, 10 (2), 50–58.
 8. Rahmanov N. P., Guliyev G. B., Farhadov Z. I. (2015) Structure Identification of a Fuzzy Controller of Reactive Power of the Induction Furnace. *ELECTRO. Elektrotehnika, Elektroenergetika i Elektrotehnicheskaya Promyshlennost*. [ELECTRO. Electrical Engineering, Power Engineering, Electrical Industry], (4), 28–31 (in Russian).
 9. Aliyev R. A., Arabskii A. K., Arno O. B., Gunkin S. I., Talybov E. G. (2014) *ICS of Gas-Output Facilities: Current State and Prospects of Development*. Moscow, Nedra. 462 (in Russian).
 10. Shtovba S. D. (2007) *The Design of Fuzzy Systems by Means MatLab*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom. 288 (in Russian).
 11. Nayeripour M., Khorsand H., Roosta A. R., Niknam T. (2010) New Approach Based on Fuzzy Controller for Volt/Var Control in Distribution System. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (3), 468–480.
 12. *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. Version 2*. The MathWorks. Inc., 1999.