

**УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ
И НАПРЯЖЕНИЕМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

**Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.,
канд. техн. наук, доц. ГУЛИЕВ Г. Б.,
докт. техн. наук, проф. РАХМАНОВ Н. Р.**

*Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики*

E-mail: nariman@cpee.az
huseyngulu@mail.ru

**IMPROVED FUZZY-LOGIC ALGORITHM FOR CONTROL
OF REACTIVE POWER AND VOLTAGE
IN DISTRIBUTIVE NETWORKS**

GASHIMOV A. M., GOULIEV G. B., RAKHMANOV N. R.

*Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Power Engineering Institute*

Предложена схема fuzzy-регулирования реактивной мощности и напряжения в электрической сети, в которой в качестве источника реактивной мощности используются статические тиристорно-управляемые компенсаторы. Дается описание формализованной процедуры нечеткого регулятора в виде нечетких отношений между контролируруемыми (напряжение) и управляемыми параметрами сети (ток и реактивная мощность конденсатора). На основе расчетных экспериментов на примере реальной электрической сети показана эффективность алгоритма, предложенного для регулятора нечеткой логики, используемого для регулирования статическими конденсаторами.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, регулирование реактивной мощности и напряжения, статические конденсаторы, fuzzy-моделирование, регулятор нечеткой логики.

Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

The paper proposes a scheme for fuzzy-regulation of reactive power and voltage in electrical power network where static thyristor-controlled compensators are used as a source of reactive power. Description of formalized procedure pertaining to fuzzy regulator in the form of fuzzy relations between controlled (voltage) and controllable parameters of the network (current and reactive power of a condenser). An algorithm efficiency proposed for a fuzzy-logic regulator and used for regulation of static condensators has been shown on the basis of calculative experiments and an electric power network taken as an exemple.

Keywords: distributive electric power networks, regulation of reactive power and voltage, static condensators, fuzzy-simulation, fuzzy-logic regulator.

Fig. 8. Tab. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Создание условий оптимального функционирования распределительных электрических сетей в значительной степени зависит от корректного выбора и настройки систем управления источниками реактивной мощности и регулирования напряжения в узлах сети. Решению задач выбора средств регулирования напряжения и реактивной мощности уделено

достаточно большое внимание [1–4]. Традиционно регулирование напряжения и реактивной мощности в электрических сетях выполняется соответственно с помощью устройств переключения РПН (регулирование под нагрузкой) трансформаторов и секций батарей конденсаторов или регулированием реактанса параллельно включенной к ним индуктивности. Исполнение этих функций реализуется в виде индуктивно-емкостной цепи, управляемой тиристором, так называемым статическим тиристорным компенсатором (СТК) [5].

На практике применяется СТК, схема которого может быть либо в виде параллельно включенных конденсаторов с постоянной величиной емкости и реактора, индуктивность которой регулируется тиристором (этот тип СТК известен как FCTSC [6]), либо в виде этой же схемы, но с изменяющейся величиной емкости конденсатора [7]. При этом требуемая величина емкости устанавливается по числу включенных секций, которое также регулируется тиристором.

Тиристорно-управляемые конденсаторы типа FCTSC находят широкое применение в распределительных электрических сетях для стабилизации напряжения в узлах нагрузки [8, 9]. В дополнение к основной функции, связанной с регулированием напряжения, реактанс FCTSC-конденсатора может быть также использован для ослабления колебательных процессов в системе [10, 11].

Существующие методы компенсации реактивной мощности, выбора величины и места ее размещения в реальных электрических сетях основаны на решении задачи минимизации потерь активной мощности, вызванных передачей реактивной мощности в этих сетях. При этом применяемые системы автоматического регулирования реактивной мощности обладают большой зоной нечувствительности из-за предварительной настройки их на заданное фиксированное значение контролируемого параметра. В результате неучета изменчивости нагрузки увеличивается погрешность при выборе числа включенных секций.

В статье предложена схема управления СТК, используемым в качестве регулятора напряжения. Регулирование осуществляется путем управления током тиристором в цепи катушки, включенной параллельно емкости. Алгоритм управления током СТК реализован на базе fuzzy logic-аппарата.

Важным вкладом выполненной авторами работы является предлагаемая стратегия регулирования реактивной мощности и напряжения, обеспечивающая гибкость автоматического регулирования конденсаторов и трансформаторов путем учета динамики изменения напряжения в сети.

Структура регулятора нечеткой логики для управления реактивной мощностью СТК. Сущность работы СТК состоит в генерировании в электрическую сеть управляемого емкостного или индуктивного тока с тем, чтобы поддерживать заданную величину напряжения. Схема СТК, исполненного в виде FCTSC, представлена на рис. 1, а его рабочая характеристика [6] – на рис. 2.

Согласно схеме рис. 1, регулирование напряжения в узле включения СТК в схему электрической сети осуществляется изменением тока в ветви индуктивности (реактора). Поддержание напряжения на уровне номинального значения при его понижении или повышении осуществляется за

счет регулирования индуктивного сопротивления реактора соответственно в сторону уменьшения (что соответствует максимальному значению проводимости цепи индуктивности B_{\max}) или увеличения (минимальное значение B_{\min}) (рис. 2).

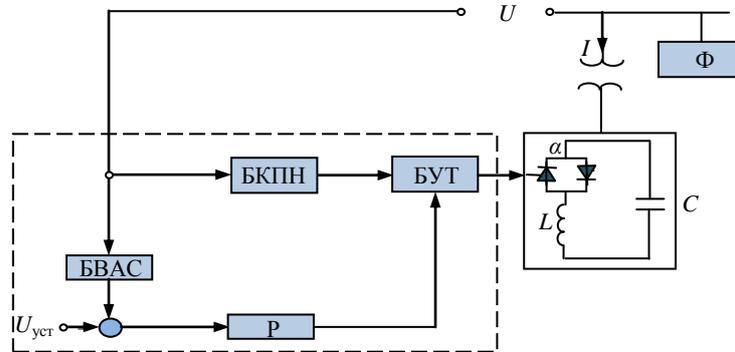


Рис. 1. Схема СТК: БКПН – блок контроля перехода тока через нуль; БУТ – блок управления тиристорами; БВАС – блок выделения амплитуды сигнала; Ф – фильтр; Р – регулятор

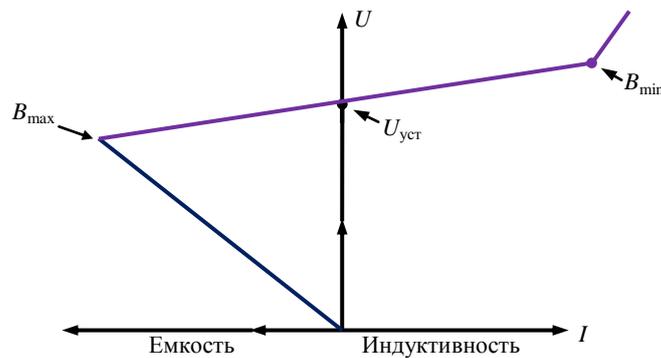


Рис. 2. Рабочая характеристика СТК

Эффективность функционирования СТК зависит от четкой настройки параметров блоков схемы, которая, в свою очередь, зависит от характера колебания напряжения в каждом конкретном узле электрической схемы. Обычно колебание напряжения имеет случайный характер, что влияет на согласование процесса управления величиной тока в цепи $L-C$.

Авторы предлагают использовать принцип регулятора нечеткой логики, в которой регулирование реактивного тока СТК выполняется с высокой чувствительностью с практическим учетом всех составляющих колебаний напряжения. Структурная схема системы управления реактивной мощностью в распределительной электрической сети на основе нечеткой логики приведена на рис. 3. Данная схема работает следующим образом: измеряются величины реактивной мощности Q в нагрузке 1 и напряжения сети U_c соответственно датчиками реактивной мощности 2 (ДРМ) и напряжения 3 (ДН). Затем на первый вход сумматора 5 поступает задание $Q_{уст}$, а на второй вход – текущее значение реактивной мощности от ДРМ. Одновременно на вход сумматора 4 поступает задание $U_{уст}$, а на второй вход –

текущее значение напряжения сети от ДН. Полученные отклонения по реактивной мощности и напряжению поступают на вход нечеткого контроллера, выделенного на рис. 3 пунктиром.

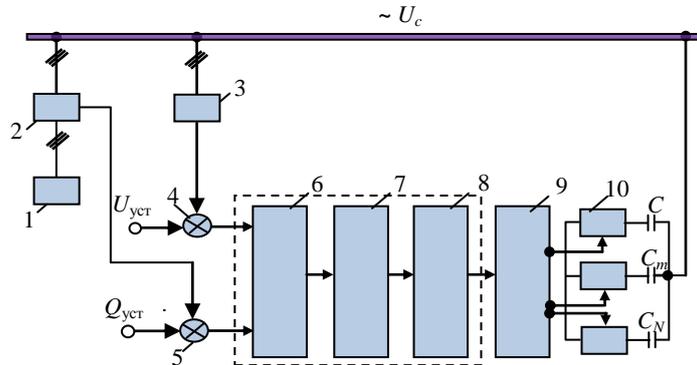


Рис. 3. Структурная схема системы fuzzy-управления реактивной мощностью

Контроллер включает в себя: фаззификатор 6, предназначенный для трансформации четких сигналов в нечеткие множества; таблицу лингвистических правил (ТЛП) 7, т. е. совокупность нечетких правил, описывающих нечеткие отношения между входными параметрами контроллера; дефаззификатор 8, где полученное нечеткое значение после дефаззификации в виде четкого управляющего воздействия поступает на вход блока управления мощностью батареи конденсаторов 9 и на блоки коммутации 10.

Критерием качества системы является

$$|\varepsilon(Q)| \leq \delta, \quad \delta = Q_{уст},$$

где $\varepsilon(Q)$ – ошибка (отклонения) по реактивной мощности; $Q_{уст}$ – заданное значение реактивной мощности.

Ошибка по реактивной мощности $\varepsilon(Q)$ определяется по выражению

$$\varepsilon(Q) = Q_{уст} - y(Q),$$

где $y(Q)$, $Q_{уст}$ – текущее значение выходной переменной и задающего воздействия системы.

Отклонение по напряжению определяется в процентах

$$V = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

где U , $U_{ном}$ – фактическое значение напряжения и номинальное напряжение сети.

Алгоритм управления на основе fuzzy logic. С целью компенсации реактивной мощности для построения алгоритма fuzzy-управления статической конденсаторной батареей (СКБ) были приняты три лингвистические переменные: напряжение, реактивная мощность и управление. По указанным лингвистическим переменным для построения алгоритма fuzzy-управления был использован пакет программ Fuzzy Logic Toolbox

в среде MatLab [12]. В рассмотренной нечеткой экспертной системе есть две входные лингвистические переменные – напряжение и реактивная мощность, и одна выходная лингвистическая переменная – управление. Для принятия логических решений рассмотренная нечеткая экспертная система приведена на рис. 4.

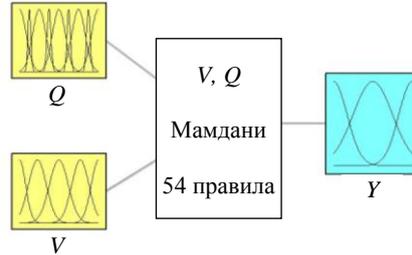


Рис. 4. Структурная схема fuzzy-управления

По вышепринятым лингвистическим переменным для системы, предложенной на рис. 2, должны быть составлены 54 нечетких логических правила. Так, для лингвистической переменной «реактивная мощность» – девять терм: NVB – отрицательно очень большая; NB – отрицательно большая; NM – отрицательно средняя; NS – отрицательно малая; Z – нуль; PS – положительно малая; PM – положительно средняя; PB – положительно большая; PVB – положительно очень большая. Для лингвистической переменной «напряжение» – шесть терм: CV – аварийное отклонение; NM – отрицательно средняя; NS – отрицательно малая; Z – нуль; PS – положительно малая; PM – положительно средняя. Для лингвистической переменной «управление» – три термы: DC – отключить емкость; Z – нуль; CC – включить емкость.

Функции принадлежности (ФП) для каждой из трех лингвистических переменных можно принять как экспоненциальную функцию (рис. 4) [13]. Нечеткие подмножества лингвистической переменной ошибки по реактивной мощности E_{1i} определены по следующему лингвистическому языку:

$$\begin{aligned}
 E_{11} &= \text{NVB} & (\text{отрицательно очень большая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{11}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{12} &= \text{NB} & (\text{отрицательно большая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{12}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{13} &= \text{NM} & (\text{отрицательно средняя}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{13}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{14} &= \text{NS} & (\text{отрицательно малая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{14}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{15} &= \text{Z} & (\text{нуль}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{15}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{16} &= \text{PS} & (\text{положительно малая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{16}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{17} &= \text{PM} & (\text{положительно средняя}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{17}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{18} &= \text{PV} & (\text{положительно большая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{18}(\varepsilon(Q))); \\
 E_{19} &= \text{PVB} & (\text{положительно очень большая}) & \underline{\underline{\Delta}}(\varepsilon, \mu_{19}(\varepsilon(Q))).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Нечеткие подмножества лингвистической переменной отклонения напряжения E_{2j} определены по следующему языку:

$$E_{21} = \text{CV} \quad (\text{аварийное отклонение}) \quad \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{21}(V));$$

$$\begin{aligned}
E_{22} &= \text{NM} & (\text{отрицательно средняя}) & & \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{22}(V)); \\
E_{23} &= \text{NS} & (\text{отрицательно малая}) & & \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{23}(V)); \\
E_{24} &= \text{Z} & (\text{нуль}) & & \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{24}(V)); \\
E_{25} &= \text{PS} & (\text{положительно малая}) & & \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{25}(V)); \\
E_{26} &= \text{PM} & (\text{положительно средняя}) & & \underline{\underline{\Delta}}(V, \mu_{26}(V)).
\end{aligned} \tag{2}$$

Нечеткие подмножества лингвистической переменной $E_{3\gamma}$ управляющего воздействия на батареи конденсаторов определены по следующему языку:

$$\begin{aligned}
E_{31} &= \text{DC} & (\text{отключить емкость}) & & \underline{\underline{\Delta}}(Y, \mu_{31}(Y)); \\
E_{32} &= \text{Z} & (\text{нуль}) & & \underline{\underline{\Delta}}(Y, \mu_{32}(Y)); \\
E_{33} &= \text{CC} & (\text{включить емкость}) & & \underline{\underline{\Delta}}(Y, \mu_{33}(Y)).
\end{aligned} \tag{3}$$

Используя нечеткие множества E_{1i} , E_{2j} , $U_{3\gamma}$ видов (1)–(3), можно записать нечеткое отношение более компактно

$$R = E_{11} \wedge E_{21} \wedge E_{31} \vee E_{12} \wedge E_{22} \wedge E_{32} \vee \dots \vee E_{1i} \wedge E_{2j} \wedge E_{3\gamma} = \bigcup_{r=1}^m R_r. \tag{4}$$

Общие пределы изменения и нечеткие подмножества соответствующих отклонений входов (Q , V) и управляющего воздействия (Y) принимаются на основе экспертных знаний о процессе управления реактивной мощностью исследуемого объекта. В качестве примера в табл. 1 при формировании нечетких правил приняты значения для Q – (± 320 квар), отклонения напряжения ± 20 % и управляющего воздействия ± 80 квар.

ФП нечетких множеств $\mu_{1i}(\varepsilon(Q))$, $\mu_{2j}(V)$, $\mu_{3\gamma}(Y)$, ошибки по реактивной мощности, напряжению и управляющему воздействию на батареи конденсаторов построены по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
\mu_{1i}(\varepsilon(Q)) &= \exp(-q_{1i} |\varepsilon(Q) - \bar{\varepsilon}_{1i}|), \quad i = \overline{1, 9}; \\
\mu_{2j}(V) &= \exp(-q_{2j} |V - \bar{V}_{2j}|), \quad j = \overline{1, 5}; \\
\mu_{3\gamma}(Y) &= \exp(-q_{3\gamma} |Y - \bar{Y}_{3\gamma}|), \quad \gamma = \overline{1, 3}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Для построения и использования ТЛП регулятора заранее задаются значения μ_{1i} , μ_{2j} , $\mu_{3\gamma}$, при которых $\varepsilon(Q)$, V , Y принадлежат соответствующим множествам E_{1i} , E_{2j} , $E_{3\gamma}$. Согласно последнему, постоянные q_{1i} , q_{2j} , $q_{3\gamma}$ в (4) определяются из выполнения заданных условий:

$$\begin{aligned}
\mu_{1i}(\varepsilon(Q)) &\geq 0,5 \quad \text{при } \varepsilon(Q) \in E_{1i}; \\
\mu_{2j}(V) &\geq 0,5 \quad \text{при } V \in E_{2j}; \\
\mu_{3\gamma}(Y) &\geq 0,5 \quad \text{при } Y \in E_{3\gamma}
\end{aligned}$$

выражения (5) $\bar{\varepsilon}_{i_i}(i=\overline{1,9})$, $\bar{V}_{2_j}(j=\overline{1,5})$, $\bar{Y}_{3_\gamma}(\gamma=\overline{1,3})$, соответствующего средним значениям i -го, j -го, γ -го множеств ошибок по реактивной мощности, отклонению напряжения и управляющих воздействий, у которых степень принадлежности равна 1,0.

Определенные значения постоянных коэффициентов ФП приведены в табл. 1:

$$q_{i_i}(i=\overline{1,9}); \quad q_{2_j}(j=\overline{1,5}); \quad q_{3_\gamma}(\gamma=\overline{1,3});$$

$$\varepsilon_{i_i}(i=\overline{1,9}); \quad V_{2_j}(j=\overline{1,5}); \quad Y_{3_\gamma}(\gamma=\overline{1,3}).$$

Таблица 1

Численные значения параметров

Параметр	i, j, γ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{\varepsilon}_{i_i}$	-320	-240	-160	-80	0	-80	160	240	320
q_{i_i}	0,0139	0,023	0,0139	0,023	0,0139	0,023	0,0139	0,023	0,0139
$\bar{V}_{2_j}, \%$		-40	-11	-6	0	6	11		
q_{2_j}		0,025	0,347	0,231	0,231	0,231	0,347		
$Y_{3_\gamma}, \text{ квар}$				-80	0	80			
q_{3_γ}				0,023	0,0139	0,023			

Согласно выражениям (1)–(4) разработана ТЛП нечеткого регулятора. При двух входных и одной выходной переменных алгоритм управления представлен прямоугольной матрицей (табл. 2).

Таблица 2

Правила для нечеткого регулятора

	NVB	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PVB
CV									
NM	CC	CC	CC	CC	CC				
NS	CC	CC	CC	CC	CC				
Z				CC		DC	DC		
PS						DC	DC	DC	DC
PM						DC	DC	DC	DC

В случае регулирования реактивной мощности на шинах подстанции в качестве нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани. Это объясняется несколькими факторами [13]:

- простота программирования: алгоритм Мамдани наиболее прост и понятен для программирования;
- при программировании алгоритма не столь важна точность вывода, сколько «наглядность» и «понятность» всех составляющих алгоритма. Алгоритм Мамдани удовлетворяет этому требованию.

Данный алгоритм является наиболее часто применяемым на практике, так как очень хорошо себя зарекомендовал в ряде задач управления в режиме реального времени. Математически он может быть описан следующей последовательностью шагов [14].

1. Нечеткость: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила:

$$A_1(x_0); A_2(x_0); B_1(y_0); B_2(y_0).$$

2. Нечеткий вывод: находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции min):

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0); \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),$$

где через « \wedge » обозначена операция логического минимума (min), затем находятся усеченные функции принадлежности:

$$C'_1 = (\alpha_1 \wedge C_1(Z));$$

$$C'_2 = (\alpha_2 \wedge C_2(Z)).$$

3. Композиция: с использованием операции max (обозначаемой как « \vee ») производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению истового нечеткого подмножества для переменной выхода с ФП

$$\mu_\Sigma(Z) = C(Z) = C'_1(Z) \vee C'_2(Z) = (\alpha_1 \wedge C_1(Z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(Z)).$$

4. Наконец, приведение к четкости (для нахождения Z_0) проводится, например, центроидным методом (как центр тяжести для кривой $U\mu_\Sigma(Z)$)

$$Z_0 = \frac{\int Z \mu_\Sigma(Z) dz}{\int \mu_\Sigma(Z) dz}.$$

В результате машинного моделирования получена оптимальная ТЛП нечеткого регулятора СКБ. Алгоритм принятия решения (нечеткий логический вывод) нечеткой системы, основанный на алгоритме Мамдани, приведен на рис. 5, а трехмерное представление получения управляемого воздействия – на рис. 6.

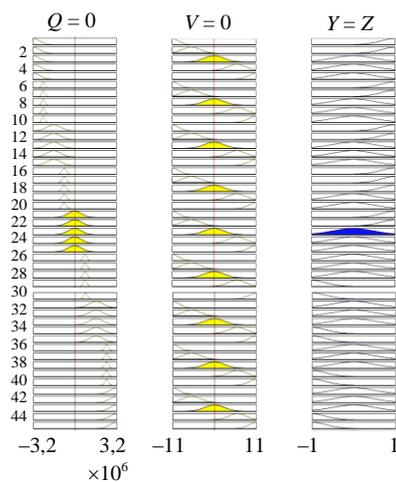


Рис. 5. Процедура принятия решения

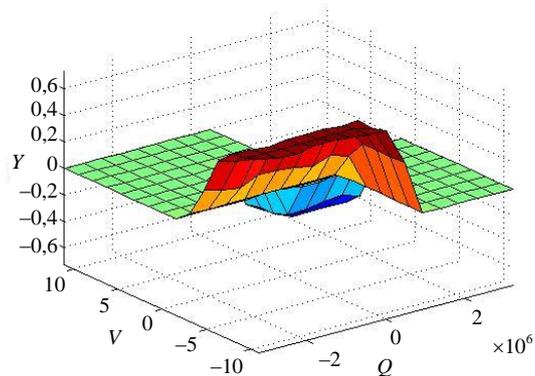


Рис. 6. Диаграмма формирования управляющих воздействий

Практическая реализация предлагаемого алгоритма. Для представления эффективности использования предложенного выше алгоритма fuzzy-управления СКБ в распределительной электрической сети на рис. 1 и в табл. 1 для типичной сети 35/10/0,4 кВ с применением пакета программ MatLab были проведены сравнительные расчеты. Для исходных параметров диапазона изменения напряжения шин 10/0,4 кВ было принято $\pm 20\%$, активная и реактивная нагрузки соответственно 400 кВт и 215 квар, а интервал изменения реактивной мощности ± 320 квар. Для распределительного трансформатора типа ТМ-630/10 сопротивление было определено соответственно $R_T = 2,12$ Ом и $X_T = 8,50$ Ом.

На основе вероятностного моделирования изменения реактивной нагрузки на рис. 7а представлены графики сравнительного функционирования нечеткого и традиционного управлений, а на рис. 7б – закономерность изменения напряжения на потребительских шинах. Как видно из модельных расчетов, относительно к традиционному управлению алгоритм fuzzy-управления, работая более четко, обеспечивает профиль напряжения в потребляющей и питающих сетях в допустимых пределах, а также, выполняя эффективное управление СКБ, обеспечивает изменение коэффициента мощности в пределах нормы.

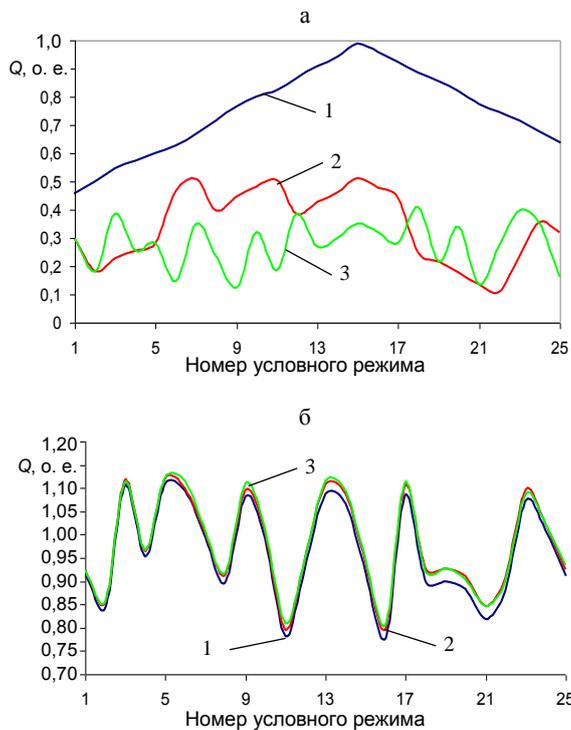


Рис. 7. Диаграмма работы традиционного и fuzzy-управления:
а – изменение реактивной нагрузки; б – изменение напряжения; 1 – исходный режим;
2 – при нечетком управлении; 3 – при традиционном управлении

Графики изменения коэффициента мощности приведены на рис. 8а, а функции ее распределения, которые подтверждают вышеперечисленные заключения, – на рис. 8б. Так, по сравнению с традиционным управлением, в fuzzy-управлении значения коэффициента мощности с вероятностью $P = 0,95$ получаются в пределах нормы. На рис. 7а, б и рис. 8а на горизонтальной оси отложены номера условных режимов, соответствующих задаваемым

значениям реактивной мощности нагрузки, извлекаемым из последовательности случайного моделирования ее изменения в интервале ± 320 квар.

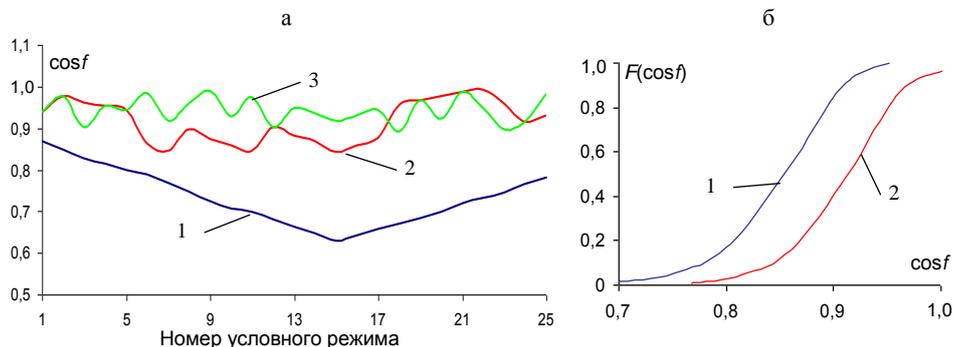


Рис. 8. Закономерность изменения коэффициента мощности: а – кривые изменения: 1 – исходный режим; 2 – при нечетком управлении; 3 – при традиционном управлении; б – функции распределения: 1 – исходный режим; 2 – при нечетком управлении

При исследовании работы нечеткого контроллера, функционирующего на основе алгоритма Мамдани (при регулировании реактивной мощности в распределительных сетях), кроме вышеуказанных результатов, было установлено, что нечеткий алгоритм производит меньшее количество переключений по сравнению с классическим и «подстраивается» с учетом текущего положения ступеней конденсаторных батарей. Система, построенная на основе предложенного алгоритма, позволяет осуществлять устойчивое управление компенсатором.

ВЫВОДЫ

1. С учетом вероятностного и неопределенного характера первичной информации разработан эффективный алгоритм управления источником реактивной мощности в распределительной электрической сети энергосистемы, основанный на применении аппарата нечеткой логики.

2. На основе машинного моделирования выполнена реализация предложенной системы fuzzy-управления статической конденсаторной батареей для компенсации реактивной мощности в узлах сети. Полученные сравнительные результаты расчета показали преимущество разработанного алгоритма по сравнению с существующими.

3. Система, построенная на основе предложенного алгоритма, позволяет осуществлять устойчивое управление компенсатором и повышает эффективность распределения электроэнергии в системе распределительной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железко, В. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / В. С. Железко // Электричество. – 1992. – № 51. – С. 6–12.
2. Железко, В. С. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 321 с.
3. Лежюк, П. Д. Регулирование реактивной мощности и напряжения в электрических сетях как вспомогательная услуга / П. Д. Лежюк, Ю. В. Грицюк, В. М. Пирняк // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 2. – С. 1–6.
4. 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.
5. Civanlar, S. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part III: the Numerical Results / S. Civanlar, J. J. Grainger // IEEE Trans Power Apparatus and Systems. – 1985. – Vol. 104, No 11. – P. 3291–3297.

6. L a n g h t o n, M. A. Electrical Engineers Reference Book / M. A. Langhton, D. J. Warne // Sixteenth Edition. – London, 2003.
7. A T h y r i s t o r Series Controlled Compensation Model for Power System Stability Analysis / J. Paserba [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 1995. – Vol. 10, No 3. – P. 1471–1478.
8. I E E E FACTS Working Group 15.05.15 FACTS Applications, decem. 1995.
9. Ч и с т я к о в, Г. Н. Применение нечеткой логики при оптимизации компенсации реактивных нагрузок / Г. Н. Чистяков, Р. Ю. Беляев // Электрика. – 2006. – № 12. – С. 20–24.
10. N e l s o n, M. Determination of Suitable Locations for Power Systems Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems / M. Nelson, L. T. G. Lima // IEEE Transactions on Power Systems. – 1990. – Vol. 5, No 4. – P. 1455–1469.
11. A p p l i c a t i o n of Fuzzy Logic for Reactive Power Compensation of Radial Distribution Feeders / S. F. Mekhamer [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18, No 1. – P. 206–213.
12. Ш т о в б а, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
13. M a m d a n i, E. H. Application of Fuzzy Logic of Approximate Reasoning Using Linguistic Syntesis / E. H. Mamdani // IEEE Transaktions on Computers. – 1977. – Vol. 26, No 12. – P. 1182–1191.
14. B a r a n, M. E. Optimal Sizing of Capacitors in a Radial Distribution System / M. E. Baran, F. F. Wu // IEEE Trans. Power Delivery. – 1989. – Vol. 4, No 4. – P. 735–743.

R E F E R E N C E S

1. Z h e l e z k o, V. S. (1992) Strategy for Reduction of Losses and Quality Improvement of Electric Power in Electric Power Networks. *Elektrichestvo [Electricity]*, 51, 6–12.
2. Z h e l e z k o, V. S. (1983) *Electric Power Losses in the Networks of Electric Power Systems*. Moscow: Energoatomizdat.
3. L e z h i u k, P. D., Gritsiuk, Yu. V., & Pirmiak, V. M. (2012) Regulation of Reactive Power and Voltage in electric Power Networks as an Ancillary Service. *Naukovi praci Vinnic'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu [Scientific Works of Vinnytsia National Technical University]*, 2, 1–6.
4. R a s h t c h i z a d e h, 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).
5. C i v a n l a r, S., & Grainger, J. J. (1985) Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part III: the Numerical Results. *IEEE Trans Power Apparatus and Systems*, 104, (11), 3291–3297. DOI: 10.1109/TPAS.1985.318842.
6. L a n g h t o n, M. A., & Warne, D. J. (2003) *Electrical Engineers Reference Book*. London.
7. P a s e r b a, J. J., Miller, N. W., Larsen, E. V., & Piwko, R. J. (1995) A Thyristor Series Controlled Compensation Model for Power System Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10, (3), 1471–1478. DOI: 10.1109/61.400931.
8. I E E E FACTS Working Group 15.05.15 FACTS Applications, decem. 1995.
9. Т ч и с т и а к о в, Г. Н., & Beliaev, R. Yu. (2006) Application of Fuzzy Logic While Optimizing Compensation of Reactive Loads. *Elektrika [Electrical Engineering]*, 12, 20–24.
10. N e l s o n, M., & Lima L. T. G. (1990) Determination of Suitable Locations for Power Systems Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5, (4), 1455–1469. DOI: 10.1109/59.99400.
11. M e k h a m e r, S. F., Soliman, S. A., Moustafa, M. A., & El-Hawary, M. E. (2003) Application of Fuzzy Logic for Reactive Power Compensation of Radial Distribution Feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18, (1), 206–213. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.807037
12. Ш т о в б а, С. Д. (2007) *Design of Fuzzy Systems by Means of MatLab*. Moscow, Hotline Telecom.
13. M a m d a n i, E. H. (1977) Application of Fuzzy Logic of Approximate Reasoning Using Linguistic Syntesis. *IEEE Transaktions on Computers*, 26, (12), 1182–1191. DOI: 10.1109/TC.1977.1674779.
14. B a r a n, M. E., & Wu, F. F. (1989) Optimal Sizing of Capacitors in a Radial Distribution System. *IEEE Trans. Power Delivery*, 4, (4), 735–743. DOI: 10.1109/61.19266.

Поступила 30.05.2013