

2. Беляев Н.Н. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов [Текст]: моногр. / Н.Н. Беляев, Т.И. Русакова, П.С. Кириченко. –Д.: Акцент ПП, 2014.– 159 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.
Надійшла до редакції 27.01.2015*

УДК 621.311

© Б.И. Кулик

УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА

Рассмотрено управление реактивной мощностью в действующих электрических системах с учетом функциональных связей между параметрами режима. Показано влияние функционально-статистических связей между исходными параметрами режима системы на прогнозирование целевых режимов работы сети и эффективность их реализации в процедурах адаптационного управления реактивной мощности.

Розглянуто управління реактивної потужності в діючих електричних системах з врахуванням функціональних зв'язків між параметрами режиму. Виявлено вплив функціонально-статистичних зв'язків між початковими параметрами режиму системи на прогнозування цільових режимів роботи мережі і ефективність їх реалізації у процедурах адаптаційного управління реактивної потужності.

Reactive power control in existing electrical power systems with the functional connections between the mode parameters is considered. The influence of functional and statistical connections between initial parameters of system mode on prediction of target power grid mode and the efficiency of their implementation in the procedures of reactive power adaptive control are shown.

Передача реактивной энергии в действующих электрических системах (ДЭС) сопровождается дополнительным нагревом токоведущих частей сетевых электроустановок, а значит, и дополнительными потерями активной энергии и напряжения. Эффективным способом снижения потерь активной энергии и повышения качества потребляемой электроэнергии в ДЭС является компенсация реактивной мощности [1]. Если проектные задачи расчета и распределения средства искусственной компенсации реактивной мощности (СИКРМ) в сетях потребителя сравнительно глубоко теоретически проработаны [2], то эксплуатационные вопросы оперативного управления СИКРМ остаются нерешенными, т. к. тесно связаны с рядом задач адаптационного (гибкого) управления: непрерывностью притока новой информации об энергетических состояниях действующей сети, наличием неопределенностей и трудно формализуемых факторов управления (что нередко приводит к необходимости изменения критериев управления в соответствии с реальной тенденцией энергетического состояния ДЭС). К тому же существующие принципы, лежащие в основе оперативного управления СИКРМ, характеризуются высокой инерционностью, что приводит к

перекомпенсации или недокомпенсации реактивной мощности, а значит и росту технико-экономических издержек на эксплуатацию сети.

Актуальность проблемы качества решения задач управления СИКРМ в ДЭС подтверждается тем, что существующие принципы управления СИКРМ позволили глубже осознать возможности компенсации РМ и установить, что убытки от незнания особенностей проблемы значительно превышают затраты и усилия на приобретение знаний и организацию рационального управления СГРЭ (нередко только за счет методических приемов).

Изложение основного материала. Параметры нормального установившегося режима работы ДЭС имеют функциональные связи, однако, из-за стохастического характера изменения величин параметров режима эти связи неоднозначны [3, 4]. При управлении нагрузкой по реактивной мощности Q , как случайным процессом, необходимо учитывать эти связи. Для выявления функциональных связей между параметрами режима применим корреляционный и регрессионный анализ.

В качестве оценки парной коррелированности случайных величин принята точечная оценка выборочного коэффициента корреляции K_r . В качестве модели вычисления оценки K_r выбрано выражение вида:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i – значения случайных величин, принимаемые в выборке X ; y_i – значения случайных величин, принимаемые в выборке Y ; \bar{x} – математическое ожидание случайной величины выборки X ; \bar{y} – математическое ожидание случайной величины выборки Y .

Имея оценки статистических связей параметров режима можно построить значимые модельные уравнения регрессии одних параметров режима ДЭС на другие. Известно, что наиболее простым видом регрессии есть линейная зависимость: $y(x)=a+bx$. Применительно к задачам компенсации реактивной мощности зависимыми от величины реактивной мощности, протекающей по сети, переменными, являются нагрузка по активной мощности, потери активной и реактивной мощности, напряжение. Независимой переменной в регрессии будет выступать реактивная мощность, а при оценке взаимосвязи между напряжением и активной мощностью – активная мощность.

Исходная информация для исследований параметров нормального установившегося режима взята на предприятии «Черниговское Химволокно». В частности это получасовые нагрузки по активной и реактивной мощностям и соответствующие им напряжения фидеров 21 и 32 (с их параметрами), которые являются вводными для распределительной подстанции РП-2 предприятия, по

состоянию на месяц март 2007 года. Расчетным путем были получены потери активной и реактивной мощностей в фидерах 21 и 32.

В результате статистической и математической обработки исходных и зависимых параметров нормального установившегося режима работы, были сформированы функции регрессии одних параметров режима ДЭС на другие. Для демонстрации полученных результатов исследования для фидера 32 выборочно взят интервал астрономического времени с 6:00 до 9:00.

В графе 2 таблицы 1 представлены коэффициенты корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,95$ (для гипотезы: коэффициент корреляции равен нулю) между нагрузками по активной P и реактивной Q мощностях для шести получасовых интервалов времени совокупной продолжительностью 31 день ($K_r^{0,5ч}$).

Для этих же интервалов времени были получены функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на нагрузку по активной мощности $P(Q)^{0,5ч}$, которые представлены в графе 3 таблицы 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на нагрузку по активной мощности при интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа, 3 часа

Интервал времени	$K_r^{0,5ч}$	$P(Q)^{0,5ч}$	$K_r^{1,5ч}$	$P(Q)^{1,5ч}$	$K_r^{3ч}$	$P(Q)^{3ч}$
6:00-6:30	0.81	$2421+1.41Q$	0.85	$2420+1.36Q$	0.86	$2347+1,45Q$
6:30-7:00	0.85	$2564+1.21Q$				
7:00-7:30	0.85	$2336+1.38Q$				
7:30-8:00	0.86	$2308+1.44Q$	0.84	$2342+1.46Q$		
8:00-8:30	0.85	$2350+1.44Q$				
8:30-9:00	0.86	$2148+1.71Q$				

Оценка параметров режима должна учитывать конструктивно-эксплуатационные особенности конкретного элемента сети. В настоящее время принято, что для большинства элементов сети установившийся режим нагрева длится 30 минут. Но результаты исследований, изложенные в [5] показывают, что установившийся режим нагрева длится больше 30 минут. С учетом этого было исследовано влияние интервала осреднения на тесноту связи между параметрами режима работы ДЭС. Коэффициенты корреляции $K_r^{1,5ч}$, $K_r^{3ч}$ и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на нагрузку по активной мощности при интервалах осреднения 1,5 часа $P(Q)^{1,5ч}$ (с 6:00 до 7:30 и с 7:30 до 9:00) и 3 часа $P(Q)^{3ч}$ (с 6:00 до 9:00) представлены в графах 4-7 таблицы 1.

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на потери активной мощности $\Delta P(Q)$, на потери реактивной

мощности ΔQ (Q) на интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа и 3 часа приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Большие значения K_r между нагрузками по активной и реактивной мощностям, между нагрузкой по реактивной мощности и потерями активной и реактивной мощностей при всех интервалах осреднения свидетельствуют о наличии прямых тесных связей между этими параметрами. Увеличение интервала осреднения с получасового на трехчасовой не изменяет тесноты связи. Также увеличение интервала осреднения параметров режима существенно не изменяет коэффициенты регрессии, что дает возможность управлять СИКРМ на этих интервалах времени не меняя их состояния. Такой подход к управлению СИКРМ позволяет увеличить срок их службы.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на потери активной мощности при интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа, 3 часа

Интервал времени	$K_r^{0,5ч}$	$\Delta P (Q)^{0,5ч}$	$K_r^{1,5ч}$	$\Delta P (Q)^{1,5ч}$	$K_r^{3ч}$	$\Delta P (Q)^{3ч}$
1	2	3	4	5	6	7
6:00-6:30	0,84	$4,89+9 \cdot 10^{-3}Q$	0,88	$4,34+9 \cdot 10^{-3}Q$	0,89	$3,59+1 \cdot 10^{-2}Q$
6:30-7:00	0,88	$4,84+9 \cdot 10^{-3}Q$				
7:00-7:30	0,89	$3,62+1 \cdot 10^{-2}Q$				
7:30-8:00	0,90	$3,19+1 \cdot 10^{-2}Q$	0,87	$3,19+1,1 \cdot 10^{-2}Q$		
8:00-8:30	0,89	$3,20+1,1 \cdot 10^{-2}Q$				
8:30-9:00	0,88	$1,11+1,3 \cdot 10^{-2}Q$				

Таблица 3

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на потери реактивной мощности при интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа, 3 часа

Интервал времени	$K_r^{0,5ч}$	$\Delta Q (Q)^{0,5ч}$	$K_r^{1,5ч}$	$\Delta Q (Q)^{1,5ч}$	$K_r^{3ч}$	$\Delta Q (Q)^{3ч}$
6:00-6:30	0,84	$2,29+4 \cdot 10^{-3}Q$	0,88	$2,04+5 \cdot 10^{-3}Q$	0,89	$1,68+5 \cdot 10^{-3}Q$
6:30-7:00	0,88	$2,27+4 \cdot 10^{-3}Q$				
7:00-7:30	0,89	$1,70+5 \cdot 10^{-3}Q$				
7:30-8:00	0,90	$1,50+5 \cdot 10^{-3}Q$	0,87	$1,50+5 \cdot 10^{-3}Q$		
8:00-8:30	0,89	$1,50+5 \cdot 10^{-3}Q$				
8:30-9:00	0,88	$0,52+6 \cdot 10^{-3}Q$				

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на напряжение приведены в таблице 4. Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по активной мощности на напряжение приведены в таблице 5.

Положительные значения K_r между нагрузкой по активной и реактивной мощностям и напряжением на интервале времени 6:00-8:00 показывают увеличение напряжения при увеличении нагрузок. Но малость величины коэффициентов корреляции говорит о том, что связь между исследуемыми параметрами не тесная и нагрузки потребителя на изменение напряжения в исследуемом узле влияют мало. Изменение знака K_r нагрузки по реактивной мощности и напряжения с положительного на отрицательный (при получасовом осреднении нагрузки на интервале времени с 8:00 до 9:00), подтверждает не монотонность этих параметров режима во времени.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на напряжение при интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа, 3 часа

Интервал времени	$K_r^{0,5ч}$	$U(Q)^{0,5ч}$	$K_r^{1,5ч}$	$U(Q)^{1,5ч}$	$K_r^{3ч}$	$U(Q)^{3ч}$
6:00-6:30	0,19	$10,54+14 \cdot 10^{-5}Q$	0,09	$10,55+5 \cdot 10^{-5}Q$	0,09	$10,54+5 \cdot 10^{-5}Q$
6:30-7:00	0,08	$10,58+5 \cdot 10^{-5}Q$				
7:00-7:30	0,20	$10,52+10 \cdot 10^{-5}Q$				
7:30-8:00	0,05	$10,57+3 \cdot 10^{-5}Q$	0,10	$10,54+5 \cdot 10^{-5}Q$		
8:00-8:30	-0,01	$10,60-1 \cdot 10^{-5}Q$				
8:30-9:00	-0,07	$10,63-3 \cdot 10^{-5}Q$				

Таблица 5

Коэффициенты корреляции и функции регрессии нагрузки по активной мощности на напряжение при интервалах осреднения 0,5 часа, 1,5 часа, 3 часа

Интервал времени	$K_r^{0,5ч}$	$U(P)^{0,5ч}$	$K_r^{1,5ч}$	$U(P)^{1,5ч}$	$K_r^{3ч}$	$U(P)^{3ч}$
6:00-6:30	0,14	$10,43+6 \cdot 10^{-5}P$	0,04	$10,54+2 \cdot 10^{-5}P$	0,03	$10,55+1 \cdot 10^{-5}P$
6:30-7:00	0,09	$10,49+4 \cdot 10^{-5}P$				
7:00-7:30	0,15	$10,43+5 \cdot 10^{-5}P$				
7:30-8:00	0,02	$10,57+1 \cdot 10^{-5}P$	0,05	$10,53+2 \cdot 10^{-5}P$		
8:00-8:30	-0,08	$10,68-2 \cdot 10^{-5}P$				
8:30-9:00	-0,09	$10,67-2 \cdot 10^{-5}P$				

Увеличение интервала осреднения с получасового на полуторачасовой не изменяет тесноты связи, но меняет функциональную связь между параметрами режима. Что не позволяет управлять СИКРМ на интервале времени больше получасового.

Малые значения коэффициентов регрессии функций регрессии $U(Q)$ подтверждают, что практически нет возможности влиять изменением реактивной мощности СИКРМ на напряжение в данном узле. Функции регрессии показывают, что управляя СИКРМ в данном узле на исследуемом интервале времени можно достичь целей: снижения потерь активной и реактивной мощности.

Анализируя значения коэффициентов регрессии $\Delta Q(Q)$, $\Delta P(Q)$ видно, что влияние нагрузки по реактивной мощности больше на потери активной мощности. При изменении интервала осреднения они практически остаются неизменными.

Для данного объекта можно сделать вывод, что при поиске интервала, на котором связь между параметрами режима ДЭС будет наибольшей нельзя использовать нагрузки данного объекта с интервалом осреднения 1,5 часа и 3 часа на временном интервале за весь месяц. Поставлена задача поиска временного интервала, на котором можно сформировать целенаправленные управляющие воздействия на СИКРМ.

Вывод. Знание функционально-статистических связей между исходными параметрами режима действующей электрической системы позволяют более качественно прогнозировать целевые режимы работы сети и эффективно их реализовать в процедурах адаптационного управления реактивной мощностью.

Для каждой ДЭС при управлении ее реактивной мощностью необходимо учитывать функциональные связи между параметрами режима. Функции регрессии нагрузки по реактивной мощности на параметры нормального установившегося режима работы ДЭС позволяют разработать процедуры управления режимом ДЭС как при изменении нагрузки, так и при внесении регулирующих воздействий СИКРМ. Составленные функции регрессии могут быть заложены в основу алгоритма управления СИКРМ.

Список литературы

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009.-456 с.
2. Рогальский Б.С. Способы и технические средства управления компенсирующими установками в электрических сетях промышленных предприятий [Текст] / Б. С. Рогальский, А. В. Дмитраш, В. М. Непийвода // Контроль и управление в энергетике. – Киев : УМК ВО. – 1988. – С. 114–117.
3. Особенности режима работы действующих электрических сетей с учетом реактивной составляющей мощности / Скоробогатова В.И., Кулик Б.И. // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 4. – С. 163-167.
4. Підвищення функціональної ефективності управління потоками реактивної енергії в діючих електричних мережах / Скоробогатова В.І., Кулик Б.І. // Вісник ЧДТУ. – 2007. – № 30. – С. 118-121.
5. Скоробогатова В. И. Оценивание энергетического состояния действующих промышленных электрических сетей. – К.: Об-во "Знание" Украины, Укр.дом экон. и науч.-техн. знаний.–1996. – 54 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ширінім Л.Н.
Надійшла до редакції 27.01.15*