УДК 681.518

В. Н. ЕФАНОВ, Т. У. ЕНИКЕЕВ

УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваются теоретические основы синтеза координирующего управления локальной энергосистемой с использованием ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: *локальные энергосистемы, ветроэнергетические установки, модель, расчетный режим, координирующее управление.*

Одним из приоритетов в развитии энергетики является использование различных возобновляемых энергоресурсов. Реализация такого направления возможна с применением ветроэнергетических установок (ВЭУ). Практика эксплуатации ВЭУ показывает, что для надежного энергоснабжения потребителей следует объединять значительное количество ветрогенераторов в единую локальную энергетическую систему (ЛЭС). Это объясняется следующими специфическими особенностями ВЭУ:

— относительно малой установленной мощностью каждого отдельного агрегата;
— непостоянством характеристик ветра как энергоносителя;
— невозможностью аккумулирования энергии ветра;
— нестабильным характером нагрузки в сетях малой мощности.

Указанные особенности обусловливают необходимость оперативного управления режимом работы подобных энергосистем, а также гибкого перераспределения активной и реактивной мощности в зависимости от конкретной складывающейся ситуации. Решение этих задач обеспечивает система автоматического управления (САУ) параметрами ЛЭС на двух уровнях [1]. На нижнем уровне выполняется автоматическое регулирование частоты и напряжения при помощи первичных регуляторов ВЭУ. На верхнем уровне происходит так называемое групповое регулирование активной и реактивной мощности с целью согласования режимов работы отдельных ВЭУ для обеспечения требуемого качества генерируемой энергии.

В настоящей работе предлагается метод синтеза верхнего уровня САУ локальной энергетической системы, основанный на принципе координации электроэнергетических процессов во всех элементах сети.

Математическая модель нижнего уровня управления может быть представлена в виде двух групп уравнений. Первая группа описывает процессы в узлах электрической сети, к каждому из которых подключаются определенная совокупность ветрогенераторов и нагрузка

$$\begin{aligned} \Delta\dot{z}_{\text{н}i} &= A_{\text{н}i}\Delta z_{\text{н}i} + B_{\text{н}i}\Delta w_i + D_{\text{н}i}\Delta\beta_i\,; \\ \Delta\rho_i &= C_{\text{н}i}\Delta z_{\text{н}i}\,, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\Delta z_{\text{н}i} = \left[\Delta s_i \;\Delta i_{\text{в}i}\right]^T$ — вектор отклонений значений скольжения ротора генератора и тока обмотки возбуждения соответственно; $\Delta w_i = \left[\Delta\Theta_i \;\Delta U_{\text{в}i}\right]^T$ — вектор отклонений управляющих воздействий — угла установки лопастей ВЭУ и напряжения на обмотке возбуждения; $\Delta\beta_i = \left[\Delta\delta_{\text{г}i} \;\Delta\delta_i\right]^T$ — вектор отклонения абсолютных углов, определяющих положение ротора генератора и вектора напряжения в узле относительно некоторой вращающейся с угловой скоростью оси ω_C; $\Delta\rho_i = \left[\Delta f_i \;\; \Delta U_i\right]^T$ — вектор отклонений соответственно частоты и величины индуцируемой в якорной обмотке ЭДС.

Систему (1) дополним уравнениями, описывающими системы первичного регулирования частоты и напряжения:

$$\Delta\dot{z}_{\mathrm{p}i} = \Delta v_i;$$
$$\Delta w_i = T_i \Delta z_{\mathrm{p}i} + G_i \Delta v_i. \qquad (2)$$

Здесь $\Delta z_{\mathrm{p}i}$ — вектор отклонений переменных состояния i-го регулятора; $\Delta v_i = \Delta g_i - \Delta\rho_i$ — вектор отклонений входных переменных; $\Delta w_i = \left[\Delta\Theta_i \;\; \Delta U_{\mathrm{в}i}\right]^T$ — вектор отклонений управляющих воздействий.

Вторая группа уравнений позволяет установить взаимосвязь между параметрами отдельных узлов в соответствии с топологией линий электропередачи:

$$\Delta\beta_i = \sum_{j=1}^{n} F_{ij} \Delta\rho_i;$$
$$\Delta y_C = \sum_{i=1}^{n} L_i \Delta\rho_i. \qquad (3)$$

Матрицы F_{ij}, L_i описывают связи между узлами внутри электрической сети, отображая взаимное влияние узлов, а также влияние линий передачи.

Объединив (1) и (2), с учетом (3) получим систему уравнений для нижнего уровня управления ЛЭС

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 g(t);$$
$$y(t) = Cx(t), \qquad (4)$$

где $\dot{x}(t) = \left[\Delta z_{\mathrm{н}1}, ..., \Delta z_{\mathrm{н}n}, \Delta z_{\mathrm{p}1}, ..., \Delta z_{\mathrm{p}n}\right]^T$ — обобщенный вектор переменных состояния;

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{\mathrm{н}} - B_{\mathrm{н}} G C_{\mathrm{н}} + D_{\mathrm{н}} F C_{\mathrm{н}} & B_{\mathrm{н}} T \\ -C_{\mathrm{н}} & 0 \end{bmatrix};\; B_1 = \begin{bmatrix} B_{\mathrm{н}} G \\ I \end{bmatrix};\; C = \left[LC_{\mathrm{н}}; 0\right].$$

$A_{\mathrm{н}} = blockdiag\{A_{\mathrm{н}i}\}$; $B_{\mathrm{н}} = blockdiag\{B_{\mathrm{н}i}\}$; $C_{\mathrm{н}} = blockdiag\{C_{\mathrm{н}i}\}$; $D_{\mathrm{н}} = blockdiag\{D_{\mathrm{н}i}\}$; $T_{\mathrm{н}} = blockdiag\{T_{\mathrm{н}i}\}$; $G_{\mathrm{н}} = blockdiag\{G_{\mathrm{н}i}\}$ — блочно-диагональные матрицы; $F = \left[F_{ij}\right]_{n\times n}$, $L = \left[L_i\right]_{1\times n}$ — блочные матрицы; I — единичная матрица.

Уравнение наблюдения в системе (4) служит основой для построения координирующего управления. Матрица C содержит информацию о результате декомпозиции вектора обобщенных выходных координат y и определяет весовые коэффициенты векторов переменных состояния локальных подсистем в формировании вектора y. Информация о значениях элементов матрицы C используется верхним уровнем управления, который подает управляющие воздействия в соответствующие локальные подсистемы нижнего уровня при отклонении текущей величины обобщенного вектора от ее желаемого значения, приводя тем самым переменные величины локальных подсистем к значениям, необходимым для выполнения задачи верхнего уровня управления.

Решение в полном объеме задачи координирующего управления представляется возможным только в рамках цифровой системы, способной в реальном масштабе времени обрабатывать большие массивы информации. Для этого необходимо перейти от непрерывной модели нижнего уровня управления в форме (4) к его цифровой форме записи:

$$x(k+1) = A_2 x(k) + B_2 g(k);$$

$$y(k) = Cx(k), \qquad (5)$$

где A_2 и B_2 — числовые матрицы цифровой модели, однозначно соответствующие, для выбранного времени дискретизации T_0, матрицам A_1 и B_1 непрерывной модели; C — числовая матрица наблюдения, одинаковая для обеих моделей [3].

На систему координирующего управления, которая выполняет функции группового регулирования активной и реактивной мощности, возлагается задача согласования электромеханических и аэродинамических процессов во всех частях энергосистемы исходя из требования обеспечения расчетного режима ее работы при одновременном поддержании в заданных пределах требуемых значений основных параметров. Предположим, что расчетный режим задается вектором переменных $y^*(k)$. Условия согласования отдельных подсистем ЛЭС предусматривают, что вектор переменных состояния энергосистемы принадлежит области, удовлетворяющей следующему соотношению:

$$Cx^*(k) = y^*(k). \qquad (6)$$

Случай, когда $x(k) \in x^*(k)$, означает, что в системе протекают согласованные процессы, обеспечивающие требуемые значения обобщенных координат. Если $x(k) \notin x^*(k)$, то в силу (6) глобальная цель не достигается, и в системе протекают несогласованные процессы, требующие координации. Расстояние в дискретном пространстве между фактическими $x(k)$ и желаемыми $x^*(k)$ значениями переменных состояния определяется минимальной длиной вектора

$$\rho(k) = x^*(k) - x(k). \qquad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что для вектора рассогласования $\rho(k)$ справедлива система уравнений

$$C\rho(k) = Cx^*(k) - Cx(k),$$

т.е.

$$C\rho(k) = y^*(k) - Cx(k). \qquad (8)$$

Так как матрица C является не квадратной, то для системы (4) может быть найдено нормальное псевдорешение

$$\rho(k) = C^T \left(CC^T\right)^{-1} \left(y^*(k) - Cx(k)\right), \qquad (9)$$

имеющее наименьшую длину среди всех векторов $\rho(k)$, определяющих минимальное значение $\left|C\rho(k) - \left(y^*(k) - Cx(k)\right)\right|$.

Координирующее управление $g(k)$ будем искать исходя из условия минимизации ожидаемого расстояния между желаемыми и текущими состояниями энергосистемы, т.е. $\rho(k+1) = x^*(k+1) - x(k+1) \to 0$. Подставив выражение $x(k+1)$ из (2) в формулу (5) для $\rho(k+1)$, получим

$$\rho(k+1) = C^T \left(CC^T\right)^{-1} \left(y^*(k+1) - CA_2x(k) - CB_2g(k)\right) = 0,$$

или

$$C^T \left(CC^T\right)^{-1} CB_2g(k) = C^T \left(CC^T\right)^{-1} \left(y^*(k+1) - CA_2x(k)\right),$$

отсюда находим

$$g(k) = -\left(CB_2\right)^T \left(CB_2\left(CB_2\right)^T\right)^{-1}\left(CA_2x(k) - y^*(k+1)\right). \quad (10)$$

В системе (5), замкнутой координирующим управлением (10), достигается полное согласование динамических процессов для всех генерирующих и потребляющих элементов ЛЭС. Это выражается в обеспечении движения вектора обобщенных выходных координат $y(t)$ системы по желаемой траектории $y^*(t)$, формируемой временной последовательностью расчетных значений [4]. В самом деле, подставив (10) в систему (4), получим

$$y(k+1) = Cx(k+1) = C\left[A_2x(k) + B_2g(k)\right] =$$

$$= CA_2x(k) + CB_2\left[-\left(CB_2\right)^T\left(CB_2\left(CB_2\right)^T\right)^{-1}\left(CA_2x(k)\right) - y^*(k+1)\right].$$

Поскольку $CB_2\left(CB_2\right)^T\left(CB_2\left(CB_2\right)^T\right)^{-1} = I$, то

$$y(k+1) = CA_2x(k) - CA_2x(k) + y^*(k+1).$$

Оценим эффективность полученных результатов на примере системы управления, состоящей из трех взаимосвязанных подсистем — трех секций ВЭУ $x_1(k)$, $x_2(k)$ и $x_3(k)$. Пусть уравнения состояния (5) для данной ЛЭС имеют вид

$$x_1(k+1) = 0{,}873x_1(k) - 0{,}115x_2(k)+0{,}456x_3(k)+0{,}157g_1(k) - 3{,}54g_2(k);$$

$$x_2(k+1) = -0{,}21x_1(k)+0{,}75x_2(k)+0{,}229x_3(k) - 0{,}089g_1(k)+0{,}790g_2(k);$$

$$x_3(k+1) = 0{,}834x_1(k)+0{,}008x_2(k)+0{,}908x_3(k)+4{,}60g_1(k) - 0{,}266g_2(k);$$

а выходная координата системы, оценивающая величину активной мощности, подчиняется соотношению

$$y(k) = 0{,}43x_1(k)+0{,}82x_2(k)+0{,}134x_3(k).$$

Координирующее управление, синтезированное для данной системы в соответствии с уравнением (10), имеет вид

$$g_1(k) = -\,0{,}160x_1(k) - 0{,}288x_2(k) - 0{,}257x_3(k)+0{,}5085y^*(k+1);$$

$$g_2(k) = 0{,}2386x_1(k)+0{,}429x_2(k)+0{,}383x_3(k) - 0{,}757y^*(k+1),$$

В таблице приведены результаты моделирования системы при квадратичном законе изменения выходной координаты $y^*(k) = 0{,}1k^2$.

Результаты моделирования системы при квадратичном законе изменения выходной координаты

k	$y^*(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$y(k)$
1	0,100	0,276	–0,064	0,254	0,100
2	0,400	0,975	–0,190	1,022	0,400
3	0,900	1,847	–0,232	2,207	0,900
4	1,600	2,739	–0,078	3,629	1,600
5	2,500	3,633	0,296	5,190	2,500
6	3,600	4,578	0,863	6,892	3,600
7	4,900	5,617	1,596	8,774	4,900
8	6,400	6,763	2,483	10,863	6,400
9	8,100	8,001	3,527	13,165	8,100
10	10,000	9,342	4,735	15,673	10,000
11	12,100	10,758	6,111	18,379	12,100
12	14,400	12,259	7,654	21,283	14,400
13	16,900	13,846	9,364	24,383	16,900
14	19,600	15,522	11,239	27,682	19,600
15	22,500	17,285	13,279	31,179	22,500

Продолжение таблицы

k	$y^*(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$y(k)$
16	25,600	19,136	15,485	34,878	25,600
17	28,900	21,074	17,856	38,775	28,900
18	32,400	23,099	20,393	42,872	32,400
19	36,100	25,272	23,096	47,167	36,100
20	40,000	27,412	25,964	51,661	40,000
21	44,100	29,699	28,997	56,355	44,100
22	48,400	32,073	32,197	61,247	48,400
23	52,900	34,535	35,562	66,339	52,900
24	57,600	37,084	39,092	71,629	57,600
25	62,500	39,721	42,788	77,119	62,500
26	67,600	42,445	46,649	82,808	67,600
27	72,900	45,255	50,677	88,696	72,900
28	78,400	48,154	54,869	94,783	78,400
29	84,100	51,139	59,228	101,069	84,100
30	90,000	54,212	63,751	107,555	90,000
31	96,100	57,373	68,441	114,239	96,100
32	102,400	60,620	73,296	121,123	102,400
33	108,900	63,955	78,317	128,205	108,900
34	115,600	67,378	83,503	135,487	115,600
35	122,500	70,887	88,855	142,968	122,500

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вследствие согласованного управления переменными состояния $x_1(k)$, $x_2(k)$ и $x_3(k)$ трех секций ВЭУ обобщенная выходная координата системы точно воспроизводит заданный закон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Холмский В. Г.* Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы). М.: Высш. школа, 1975. 280 с.

2. *Беркович М. А., Комаров Н. А., Семенов В. А.* Основы автоматики энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1981. 432 с.

3. *Бойчук Л. М.* Синтез координирующих систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.

4. *Васильев В. И., Гусев Ю. М., Ефанов В. Н.* Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987. 309 с.

Сведения об авторах

Владимир Николаевич Ефанов — д-р техн. наук, профессор; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения; заведующий кафедрой; E-mail: efanov@mail.rb.ru

Тимербулат Узбекович Еникеев — аспирант; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения; E-mail: tibulus@list.ru

Рекомендована кафедрой авиационного приборостроения

Поступила в редакцию 29.06.10 г.