

基于 Hamilton 能量理论的海上风电场双馈机群分布式互补控制

王冰, 田敏, 王宏华

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对2个海上风电场中双馈风电机组的控制问题,基于Hamilton能量理论,提出了一种分布式互补控制策略,该控制策略不仅能够保证单个机群内风电机组的同步运行,而且可以使2个机群之间实现输出互补。对双馈风电机组单机模型进行Hamilton实现,获得端口受控耗散Hamilton模型;研究2台风电机组的互补控制问题,基于能量成型的方法设计Hamilton能量控制策略;提出2个风电机组间的分布式互补控制策略,使得2个风电场分别保持同步运行,且它们之间的输出之和及有功输出之和均能保持恒定,即实现输出互补。通过仿真验证了风电机组分布式互补控制策略的有效性。

关键词:分布式互补控制;能量成型方法;海上风电;双馈风电机组;风电场

中图分类号:TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.008

0 引言

海上风电具有不占用陆地资源、储量丰富、风能利用率高等优点,得到各国越来越多的关注。在我国,东部漫长的海岸线恰好与东部经济发达地区电力负荷密集、电网强大的特点相契合,因此海上风电得到了迅速发展^[1-3]。不同于陆上风电场,海上风电场远离陆地,值守困难,因此对风电场的可靠性和自治性提出了较高的要求。随着风电场容量扩大、离岸距离增加、并网要求标准化,海上风电存在的问题也越来越多,具体包括海上风电的输电与并网控制^[4-7]和海上风电场的控制^[8-9]等,亟待提出新的控制方法和设计思路。相对传统的集中式控制方式,分布式控制具有更大的灵活性和可靠性,在海上风电场控制中具有广阔的发展前景^[10-11]。分布式控制可以有效解决网络化系统控制问题,对于复杂系统的控制有着明显优势。采用分布式控制方式,当系统局部发生故障时,系统其他部分仍可保证正常运行。海上风电场相距遥远,各自风力环境差异明显,这就为多风电场间输出的相互补充提供了条件,从而保证向电网输出更为稳定的电能。本文在海上风电场分布式控制的基础上,提出一种分布式互补控制策略,其效果就是使2个风电场内部各自实现输出同步,而在2个风电场的有功输出之间实现互补,使得它们发出的电能总和保持稳定,从而保证电网电能的稳定性。

本文基于Hamilton能量方法提出分布式控制策

略,Hamilton能量法作为复杂非线性系统一个重要的设计工具,具有明确的物理背景和意义^[12-13]。双馈风力发电机组通过Hamilton实现,转换成端口受控耗散Hamilton PCH-D (Port-Controlled Hamiltonian with Dissipation) 系统,作为本文研究的基本模型。本文还利用Hamilton能量理论中的能量成型方法^[14],修正系统的Hamilton能量函数,为设计互补控制策略创造条件。

对于2个海上风电场中的风电机组,本文首先对双馈风电机组单机模型进行Hamilton实现,并且拓展得到海上风电机组的Hamilton模型,作为研究的主要对象。本文从简单系统切入,先研究了2台风电机组的互补控制问题,基于Hamilton能量成型方法,先对机组进行能量成型控制,再通过加入协调控制器实现2台风电机组的互补控制。当一台风电机组的输出或有功输出受到影响时,在互补控制策略作用下,2台机组的输出或有功输出之和仍然保持恒定。在此基础上,进一步研究2个风电场的互补控制策略。假设2个风电场之间有简单的通信联系,对于2个风电场组成的分布式有向网络,提出分布式互补控制策略,从而达到2个风电场内机组各自同步、整体互补的控制目标。最后,本文通过仿真分别验证了2台风电机组互补控制策略和2个风电场互补控制策略的正确性。通过互补控制策略能够实现2台风电机组及2个风电场的输出互补及有功互补,即使单机发生故障,该互补控制策略仍然有效。

1 双馈风电单台机组 Hamilton 实现

首先对双馈风力发电机组进行Hamilton实现,

收稿日期:2017-02-16;修回日期:2017-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777058)

作为本文设计的基本模型,并将其拓展为风电机组的Hamilton模型。双馈风力发电机组可以表示为三阶模型^[15],即:

$$\begin{cases} 2H_{\text{tot}} \frac{ds}{dt} = P_s - P_m = -E'_d i_{ds} - E'_q i_{qs} - P_m \\ \frac{dE'_q}{dt} = -s\omega_s E'_d - \frac{1}{T'_0} [E'_q - (X_s - X'_s) i_{ds}] + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} u_{dr} \\ \frac{dE'_d}{dt} = s\omega_s E'_q - \frac{1}{T'_0} [E'_d + (X_s - X'_s) i_{qs}] - \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} u_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X_s = \omega_s L_{ss}$ 为定子电抗, ω_s 为同步角速度, L_{ss} 为定子自感; $X'_s = \omega_s (L_{ss} - L_m^2/L_{rr})$ 为定子瞬态电抗, L_m 为互感, L_{rr} 为转子自感; $T'_0 = L_{rr}/R_r$, R_r 为转子电阻; s 为转子转差率; H_{tot} 为风机和发电机整体的惯性常数; $P_s = -E'_d i_{ds} - E'_q i_{qs}$ 为风电机组定子输出的有功功率, E'_d 和 E'_q 分别为在瞬态电抗下的 d 轴和 q 轴电压, i_{ds} 和 i_{qs} 分别为 d 轴和 q 轴的定子电流; P_m 为风机输入的机械功率; u_{dr} 和 u_{qr} 分别为 d 轴和 q 轴的转子电压。因此,式(1)是风电机组在 dq 坐标系下的双输入三阶模型,其中 s 、 E'_d 和 E'_q 为状态变量, u_{dr} 和 u_{qr} 为输入变量。

下面基于Hamilton能量方法对模型进行Hamilton实现。首先选取如下Hamilton能量函数:

$$H = \frac{s^2}{2} + \frac{1}{2} \left(E'_q + \frac{P_m}{2i_{qs}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(E'_d + \frac{P_m}{2i_{ds}} \right)^2 \quad (2)$$

那么系统模型式(1)可以表示为PCH-D系统,形式如下:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s \\ E'_q \\ E'_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} & -\frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} \\ 0 & -\frac{1}{T'_0} & -s\omega_s \\ 0 & s\omega_s & -\frac{1}{T'_0} \end{bmatrix} \nabla H + \\ &\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{i_{ds}}{T'_0} (X_s - X'_s) + \frac{P_m}{2T'_0 i_{qs}} + s\omega_s \frac{P_m}{2i_{ds}} \\ -\frac{i_{qs}}{T'_0} (X_s - X'_s) + \frac{P_m}{2T'_0 i_{ds}} - s\omega_s \frac{P_m}{2i_{qs}} \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & -\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

然后通过预反馈控制进行PCH-D系统实现。设计以下控制律,分为预反馈 $\mathbf{K}$ 和输出反馈 $\boldsymbol{\mu}$ 两部分。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \mathbf{K} + \boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} K_{dr} \\ K_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{dr} \\ \mu_{qr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

取预反馈为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -\frac{L_{rr}}{\omega_s L_m} \left[\frac{i_{ds}}{T'_0} (X_s - X'_s) + \frac{P_m}{2T'_0 i_{qs}} + \left(\frac{\omega_s P_m}{2i_{ds}} - \frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} \right) s \right] \\ \frac{L_{rr}}{\omega_s L_m} \left[-\frac{i_{qs}}{T'_0} (X_s - X'_s) + \frac{P_m}{2T'_0 i_{ds}} - \left(\frac{\omega_s P_m}{2i_{qs}} + \frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} \right) s \right] \end{bmatrix} \quad (5)$$

则闭环系统可转化为PCH-D形式:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s \\ E'_q \\ E'_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} & -\frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} \\ \frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} & -\frac{1}{T'_0} & -s\omega_s \\ \frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} & s\omega_s & -\frac{1}{T'_0} \end{bmatrix} \nabla H + \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & -\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{dr} \\ \mu_{qr} \end{bmatrix} \triangleq \\ &(\mathbf{J} - \mathbf{R}) \nabla H + \mathbf{G} \boldsymbol{\mu} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} & -\frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} \\ \frac{i_{qs}}{2H_{\text{tot}}} & 0 & -s\omega_s \\ \frac{i_{ds}}{2H_{\text{tot}}} & s\omega_s & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T'_0} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T'_0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & -\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

此时,模型式(6)满足PCH-D形式。同时,输出函数可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}^T \nabla H = \begin{bmatrix} \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \left(E'_q + \frac{P_m}{2i_{qs}} \right) \\ -\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \left(E'_d + \frac{P_m}{2i_{ds}} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

2 风电机组互补控制策略

2.1 图论基础

将海上风电场看作一个分布式网络,相互连接的风电机组则可以看作网络中的节点,它们通过通信线路交换信息,在此基础上设计整个系统的分布式控制策略。下面给出图论中的一些基本概念^[16]。

假设 $G(V, E)$ 是一个有向图,包含 n 个节点,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示节点的集合, $E \subseteq V \times V$ 表示边的集合, $A = [a_{ij}]$ 表示邻接矩阵,节点 v_i 的邻节点集可表示为 $N_i = \{v_j : (v_j, v_i) \in E\}$, 节点 i 的入度 d_i 定义为 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$, 入度矩阵 D 定义为 $D = \text{diag}\{d_i\}$ 。

进而,图的 Laplacian 矩阵 L 定义为 $L = D - A$ 。对于有向图,当且仅当其中任意 2 个节点间都存在一条有向路径时,该有向图为强连通的。假设在一个有向图中,除了一个根节点外,其他每个节点都只有 1 个父节点,那么这个有向图就是一个有向树;若一个有向图包含一个有向树,那么这个有向树称为该有向图的一个有向生成树。下面是关于有向图的一个重要引理。

引理 1^[17] 假设 $z = [z_1^T, \dots, z_p^T]^T$, 其中 $z_i \in \mathbf{R}^m$, $L_p \in \mathbf{R}^{p \times p}$ 为一有向图的 Laplacian 矩阵,那么下面几个条件是等价的:

- 该有向图有一个有向生成树;
- $(L_p \otimes I_m)z = 0$, 则 $z_1 = \dots = z_p$;
- L_p 有一个 0 特征值,且其对应的特征向量为 1_p , 其他所有特征值均有正实部;
- 系统 $\dot{z} = -(L_p \otimes I_m)z$ 是渐近一致的;
- L_p 的秩 $\text{rank}(L_p) = p - 1$ 。

2.2 风电机组互补控制问题描述

对双馈风电机组 PCH-D 模型式(6)进行拓展,得到 2 台发电机组的模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (J_1 - R_1) \nabla H_1(x_1) + G_1 \mu_1 \\ y_1 = G_1^T \nabla H_1(x_1) \\ \dot{x}_2 = (J_2 - R_2) \nabla H_2(x_2) + G_2 \mu_2 \\ y_2 = G_2^T \nabla H_2(x_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中,第 l ($l = 1, 2$) 台风电机组状态变量 $x_l =$

$[s_l \quad E'_{ql} \quad E'_{dl}]^T$; 输入变量 $\mu_l = [\mu_{drl} \quad \mu_{qrl}]^T$; Hamilton 能量函数 H_l 的梯度 $\nabla H_l = \begin{bmatrix} s_l & E'_{ql} + \frac{P_{ml}}{2i_{qsl}} & E'_{dl} + \end{bmatrix}$

$$\frac{P_{ml}}{2i_{dsl}}]^T$$
; 输出变量 $y_l = \begin{bmatrix} \omega_{sl} \frac{L_{ml}}{L_{rll}} \left(E'_{ql} + \frac{P_{ml}}{2i_{qsl}} \right) \\ -\omega_{sl} \frac{L_{ml}}{L_{rll}} \left(E'_{dl} + \frac{P_{ml}}{2i_{dsl}} \right) \end{bmatrix}; J_l, R_l$

和 G_l 含义同式(6)中 J, R 和 G , 只是在每个变量上加下标 l , 说明这是第 l 台机组的参数。

定义 1 对于有通信连接的 2 台风电机组(模型式(8)), 如果系统全局稳定且其输出满足以下条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_1(t) + y_2(t)) = T \quad (9)$$

其中, $T \in \mathbf{R}^2$ 是一个常数向量, 则称这 2 台风电机组可实现互补控制, 且 T 为互补控制的目标值。

2.3 风电机组互补控制策略

为达到双机组互补控制的目标, 控制策略设计包括两部分: 通过 Hamilton 能量理论中能量成型方法调整机组的 Hamilton 能量函数, 得到期望的 Hamilton 函数 $H_{1d}(x_1)$ 和 $H_{2d}(x_2)$; 在新能量函数下, 再对 2 台机组设计互补控制策略。

第一台机组输出需要满足:

$$G_1^T \nabla H_{1d}(x_1) = y_1 - T_1 \quad (10)$$

其中, $T_1 = [T_{11} \quad T_{12}]^T$ 为该机组的输出调整值。设能量成型控制策略为 $\bar{\mu}_1$, 在其作用下系统可改写为:

$$(J_1 - R_1) \nabla H_1(x_1) + G_1 \bar{\mu}_1 = (J_1 - R_1) \nabla H_{1d}(x_1) \quad (11)$$

则有:

$$G_1 \bar{\mu}_1 = -(J_1 - R_1)(\nabla H_1(x_1) - \nabla H_{1d}(x_1)) \quad (12)$$

式(12)满足以下匹配条件: $G_1^+ [(J_1 - R_1) \times (\nabla H_1(x_1) - \nabla H_{1d}(x_1))] = 0$, 其中 G_1^+ 为一个满秩左零化子, 满足 $G_1^+ G_1 = 0$ 。

注意到式(6)中 G_1 为列满秩矩阵, 能量成型控制策略可表示为:

$$\bar{\mu}_1 = -(G_1^T G_1)^{-1} G_1^T (J_1 - R_1) (\nabla H_1(x_1) - \nabla H_{1d}(x_1)) \quad (13)$$

基于以上过程, 可得到以下定理。

定理 1 考虑第一台双馈风电机组, 基于能量成型方法, 设计 Hamilton 能量控制策略为:

$$\mu_1 = \bar{\mu}_1 + \tilde{\mu}_1 = -\frac{L_{rll}^2}{\omega_{sl}^2 L_{ml}^2} \begin{bmatrix} -\frac{T_{11}}{T'_{01}} + s_1 \omega_{sl} T_{12} \\ -s_1 \omega_{sl} T_{11} - \frac{T_{12}}{T'_{01}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_{drl} \\ \tilde{\mu}_{qrl} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $\bar{\mu}_1 = \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dr1} \\ \bar{\mu}_{qr1} \end{bmatrix}$ 为后续设计的协调控制器。在式

(14) 作用下,使得系统在新的 Hamilton 能量函数 $H_{ld}(x_1)$ 条件下满足式(10)。证明过程见附录 A。

同理,第二台机组输出需要满足:

$$G_2^T \nabla H_{2d}(x_2) = y_2 - T_2$$

其中, $T_2 = [T_{21} \ T_{22}]^T$ 。可以求得第二台机组的 Hamilton 能量控制策略为:

$$\mu_2 = -\frac{L_{rr2}^2}{\omega_{s2}^2 L_{m2}^2} \begin{bmatrix} -\frac{T_{21}}{T'_{02}} + s_2 \omega_{s2} T_{22} \\ -s_2 \omega_{s2} T_{21} - \frac{T_{22}}{T'_{02}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dr2} \\ \bar{\mu}_{qr2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\bar{\mu}_2 = \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dr2} \\ \bar{\mu}_{qr2} \end{bmatrix}$ 为协调控制器。

在机组能量函数调整后,进一步设计2台风电机组的互补控制策略,可以得到以下定理。

定理2 考虑有通信连接的2台风电机组,能量成型控制律 $\bar{\mu}_1$ 由式(14)得到, $\bar{\mu}_2$ 由式(15)得到。则其整体控制策略为:

$$\begin{cases} \mu_1 = l_{11}(-y_1 - y_2 + T) + \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = l_{22}(-y_1 - y_2 + T) + \bar{\mu}_2 \end{cases} \quad (16)$$

其中, $l_{ii} = d_i (i=1,2)$; $T = T_1 + T_2$ 。此时系统式(8)是全局稳定的,且2台风电机组可以实现互补控制。证明过程见附录 B。

3 风电机群互补控制策略

3.1 风电机群互补控制问题描述

在图论的基础上,先对双馈风电机组 PCH-D 模型式(6)进行拓展,得到2个风电场共 N 台风电机组的模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = (J_i - R_i) \nabla H_i(x_i) + G_i \mu_i \\ y_i = G_i^T \nabla H_i(x_i) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

其中,第 i 台风电机组的状态变量 $x_i = [s_i \ E'_{qi} \ E'_{di}]^T$;

输入变量 $\mu_i = \begin{bmatrix} \mu_{dr} \\ \mu_{qr} \end{bmatrix}$; Hamilton 能量函数 H_i 的梯度

$$\nabla H_i = \begin{bmatrix} s_i & E'_{qi} + \frac{P_{mi}}{2i_{qsi}} & E'_{di} + \frac{P_{mi}}{2i_{dsi}} \end{bmatrix}^T; \text{ 输出 } y_i =$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{si} \frac{L_{mi}}{L_{ri}} \left(E'_{qi} + \frac{P_{mi}}{2i_{qsi}} \right) \\ -\omega_{si} \frac{L_{mi}}{L_{ri}} \left(E'_{di} + \frac{P_{mi}}{2i_{dsi}} \right) \end{bmatrix}; J_i, R_i \text{ 和 } G_i \text{ 的含义同式(6)}$$

中 J, R 和 G ,只是在每个变量上加下标 i ,说明这是第 i 台机组的参数。

参照文献[19]中分组一致性的定义,本文给出系统式(17)的输出互补定义如下。

定义2 对于2个风电场中的共 N 个 PCH-D 节点组成的网络系统式(17),设 $A_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \subset \{1, 2, \dots, N\}$, $A_2 = \{1, 2, \dots, N\} \setminus A_1$, $T = [T_{01} \ T_{02}]^T$ 是一个常数向量,若这 N 个 PCH-D 节点的输出满足以下条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_j(t) - y_k(t)\| = 0 \quad \forall j, k \in A_1 \quad (18)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_j(t) - y_k(t)\| = 0 \quad \forall j, k \in A_2 \quad (19)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_j(t) + y_k(t)) = T \quad \forall j \in A_1, k \in A_2 \quad (20)$$

则称风电场 A_1 和 A_2 可以实现输出互补, T 为互补的目标值。

3.2 风电机群互补控制策略

由于2个风电场间存在连接,可以看成是一个分布式网络,考虑通信信息传递的方向,网络拓扑结构可作为一个有向图,且满足以下假设。

假设1 考虑2个海上风电场构成的网络拓扑结构,其中存在至少一个有向生成树。

在假设1条件下,设计2个风电机群的分布式互补控制策略,可以得到定理如下。

定理3 考虑2个风电场 A_1 和 A_2 组成的分布式网络,假设该分布式网络拓扑结构满足假设1,则其分布式互补控制策略为:

$$\mu_i = \delta_i \sum_{j \in N_i} [\delta_j (y_j - T_{ej}) - \delta_i (y_i - T_{ei})] + \bar{\mu}_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

其中, N_i 为与第 i 台风电机组相邻机组的集合; $\delta_i =$

$$\begin{cases} -1 & i \in A_1 \\ 1 & i \in A_2 \end{cases}; e_i = \begin{cases} 1 & i \in A_1 \\ 2 & i \in A_2 \end{cases}; T_1 = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \end{bmatrix}, T_2 =$$

$$\begin{bmatrix} T_{21} \\ T_{22} \end{bmatrix}, T = T_1 + T_2 \text{ 为互补控制目标值; } \bar{\mu}_i =$$

$$-\frac{L_{ri}^2}{\omega_{si}^2 L_{mi}^2} \begin{bmatrix} -\frac{T_{e_i1}}{T'_{0i}} + s_i \omega_{si} T_{e_i2} \\ -s_i \omega_{si} T_{e_i1} - \frac{T_{e_i2}}{T'_{0i}} \end{bmatrix}。 \text{ 则闭环系统是全局稳}$$

定的,且2个风电场可以达到互补控制的要求。证明过程见附录 C。

3.3 主要结果与分析

综上所述,2个海上发电场中双馈机群的整体控制策略为:

$$u_i = \begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = K_i + \bar{\mu}_i + \bar{\mu}_i = \begin{bmatrix} K_{dr} \\ K_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dr} \\ \bar{\mu}_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dr} \\ \bar{\mu}_{qr} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} K_{dri} \\ K_{qri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_{rri}}{\omega_{si}L_{mi}} \left[\frac{i_{dsi}}{T'_{0i}}(X_{si} - X'_{si}) + \frac{P_{mi}}{2T'_{0i}i_{qsi}} + \left(\frac{\omega_{si}P_{mi}}{2i_{dsi}} - \frac{i_{qsi}}{2H_{toti}} \right) s_i \right] \\ \frac{L_{rri}}{\omega_{si}L_{mi}} \left[-\frac{i_{qsi}}{T'_{0i}}(X_{si} - X'_{si}) + \frac{P_{mi}}{2T'_{0i}i_{dsi}} - \left(\frac{\omega_{si}P_{mi}}{2i_{qsi}} - \frac{i_{dsi}}{2H_{toti}} \right) s_i \right] \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\bar{\mu}_i = -\frac{L_{rri}}{\omega_{si}L_{mi}} \begin{bmatrix} -\frac{T_{e1}}{T'_{0i}} + s_i\omega_{si}T_{e2} \\ -s_i\omega_{si}T_{e1} - \frac{T_{e2}}{T'_{0i}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\bar{\mu}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{dri} \\ \bar{\mu}_{qri} \end{bmatrix} = \delta_i \times \begin{bmatrix} -\sum_{j=1}^N \left\{ \delta_i \left[\omega_{si} \frac{L_{mi}}{L_{rri}} \left(E'_{qi} + \frac{P_{mi}}{2i_{qsi}} \right) - T_{e1} \right] - \delta_j \left[\omega_{sj} \frac{L_{mj}}{L_{rj}} \left(E'_{qj} + \frac{P_{mj}}{2i_{qsj}} \right) - T_{e1} \right] \right\} \\ \sum_{j=1}^N \left\{ \delta_i \left[\omega_{si} \frac{L_{mi}}{L_{rri}} \left(E'_{di} + \frac{P_{mi}}{2i_{dsi}} \right) - T_{e2} \right] + \delta_j \left[\omega_{sj} \frac{L_{mj}}{L_{rj}} \left(E'_{dj} + \frac{P_{mj}}{2i_{dsj}} \right) - T_{e2} \right] \right\} \end{bmatrix} \quad (25)$$

因此,风电机组的控制策略由三部分组成:第一部分为预反馈控制(式(23)),用于解决系统的 Hamilton 实现问题,保证单机能够稳定运行;第二部分为能量成型控制(式(24)),用于调整机组的 Hamilton 能量函数,为互补控制设计做准备;第三部分为协调控制(式(25)),用于实现 2 个风电场中多台风电机群间的互补控制。第二部分式(24)和第三部分式(25)合为分布式互补控制策略式(21),实现风电场内的机组同步和风电场间的输出互补。

以上结果归结为定理 4,即为本文主要结论。

定理 4 考虑海上风电场中的双馈风电机组:

$$\begin{cases} 2H_{toti} \frac{ds_i}{dt} = -E'_{di}i_{dsi} - E'_{qi}i_{qsi} - P_{mi} \\ \frac{dE'_{qi}}{dt} = -s_i\omega_{si}E'_{di} - \frac{1}{T'_{0i}}[E'_{qi} - (X_{si} - X'_{si})i_{dsi}] + \omega_{si}\frac{L_{mi}}{L_{rri}}u_{dri} \\ \frac{dE'_{di}}{dt} = s_i\omega_{si}E'_{qi} - \frac{1}{T'_{0i}}[E'_{di} + (X_{si} - X'_{si})i_{qsi}] - \omega_{si}\frac{L_{mi}}{L_{rri}}u_{qri} \end{cases} \quad (26)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

风电场通信网络拓扑结构满足假设 1,在整体控制策略式(22)的作用下,可使得 2 个风电场内部输出各自同步,且风电场之间实现输出互补。

注意到风机输出的有功功率为:

$$P_{si} = \frac{L_{rri}}{\omega_{si}L_{mi}}(i_{dsi}Y_{i2} - i_{qsi}Y_{i1}) + P_{mi} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

当采用以上互补控制策略时,2 个风电场内部输出各自同步,则有:

$$P_{sA} = P_{sA_1} + P_{sA_2} = \sum_{i=1, \dots, n} \left[\frac{L_{rri}}{\omega_{si}L_{mi}}(i_{dsi}Y_{i2} - i_{qsi}Y_{i1}) + P_{mi} \right] = T_{12} \sum_{i=i_1, \dots, i_n} \frac{L_{rri}i_{dsi}}{\omega_{si}L_{mi}} - T_{11} \sum_{i=i_1, \dots, i_n} \frac{L_{rri}i_{qsi}}{\omega_{si}L_{mi}} + T_{22} \sum_{i=i_{n+1}, \dots, i_N} \frac{L_{rri}i_{dsi}}{\omega_{si}L_{mi}} - T_{21} \sum_{i=i_{n+1}, \dots, i_N} \frac{L_{rri}i_{qsi}}{\omega_{si}L_{mi}} + \sum_{i=1, \dots, N} P_{mi} \quad (28)$$

当风电机组输出互补时,有:

$$T_1 + T_2 = \begin{bmatrix} T_{11} + T_{21} \\ T_{12} + T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{01} \\ T_{02} \end{bmatrix} = T$$

对于一个稳定运行的海上风电场,考虑各机组参数 L_{rri} 、 ω_{si} 、 L_{mi} 、 P_{mi} 、 i_{qsi} 、 i_{dsi} 均为常值,此时 2 个风电场 A_1 和 A_2 输出的有功功率之和 P_{sA} 也为一定值,即在一定条件下,通过互补控制率能实现 2 个风电场总体有功功率的互补。反之,假设给出 2 个风电场总的输出有功的目标值 P_{sA} ,必然能找到一个对应的 T 满足式(28),并通过相应的互补控制率使得 2 个风电场输出的有功功率之和达到目标值 P_{sA} 。

以上所提控制策略的现实意义在于:海上风电资源丰富,但是海上环境复杂,风力变化莫测,对海上风电的稳定性提出了挑战。当风电场受到风力环境影响时,其向电网输出的电能也将受到影响,为保证能向电网输出稳定的电能,可以将 2 个风电场协调控制,当一个风电场的输出变小时,另外一个风电场的输出能够及时补上,使得 2 个风电场最终输出电能总和满足电网要求。

本文中,海上风电场的分布式互补控制目标分为两部分,一方面保证单个风电场内部机组同步输出,另一方面保证 2 个风电场输出总和达到目标值。因此,除了互补控制外,通过相互协调可以使同一风电场内部各机组的输出达到同步,在分布式控制策略下,即使单机发生故障,整个风电场依然能够保持稳定输出,提高了海上风电场的可靠性。

4 仿真验证

仿真验证具体包括 3 个部分:第一部分证明在上述控制策略下,2 台风电机组输出稳定且能达到输出互补,即不仅能使 2 台风电机组的输出之和收敛到定值,还能使 2 台风电机组输出的有功功率之和收敛到定值;第二部分证明在互补控制策略下,2 个风电场内部能够分别达到输出同步状态,且 2 个风电场之间能达到输出互补,即风电场 A_1 中任意一

台机组的输出与风电场 A_2 中任意一台机组的输出之和收敛到一定值,且2个风电场输出的有功功率之和也收敛到一定值;第三部分证明故障情况下系统的可靠性,当单机出现故障时,其他机组仍能正常工作,且风电场间的互补控制仍然发挥作用。

4.1 风电机组互补控制仿真

仿真系统由2台风电机组组成,假设机组1和2之间双向互联,已知 $L_{\pi} = L_m + L_r$, $T'_0 = L_{\pi}/R_r$,其中 L_r 为转子电感,主要参数如附录D中表D1所示。

假设2台风电机组有功输出的目标值为 $P_{sA} = 15 \text{ MW}$,根据式(28)取 $T = [14.2 \quad -4]^T$,假设初始值 $T_{10} = [6 \quad -6]^T$, $T_{20} = [1.58 \quad -4]^T$,由控制率式(16)可得:

$$\begin{cases} \mu_1 = -y_1 - y_2 + T + \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = -y_1 - y_2 + T + \bar{\mu}_2 \end{cases}$$

假设3s时机组1由于外界原因导致输出发生变化,则其输出响应曲线和输出有功功率曲线如图1所示。图中, $y_{(1)1}$ 、 $y_{(1)2}$ 和 $y_{(2)1}$ 、 $y_{(2)2}$ 分别为机组1和2的输出; $y_{(12)1}$ 、 $y_{(12)2}$ 为机组1和2的输出之和; ΣP_s 为2台机组输出的有功功率之和,即 $\Sigma P_s = P_{s1} + P_{s2}$ 。

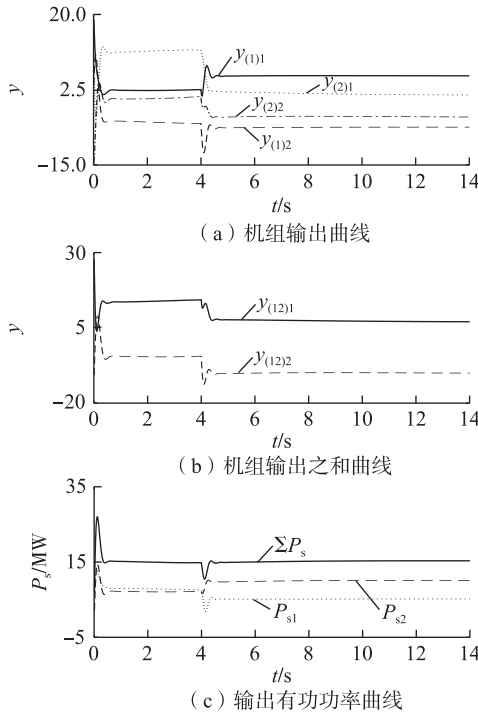


图1 2台风电机组输出响应和输出有功功率曲线

Fig.1 Curves of output response and active power of two wind turbines

由图1(a)、(b)可知,在0~4s之间,系统正常运行,2台风电机组均能达到输出稳定且2台风电机组的输出之和能够收敛到目标值 T ;由图1(c)可

知,此时2台风电机组的输出有功功率之和能够收敛到目标值 P_{sA} 。进一步,假设在4s时,机组1的输出受到影响,其有功输出下降,根据互补控制率,调整机组2的输出,最终使得2台风电机组总的有功输出仍然保持在目标值,即当机组1的有功输出减小时,机组2的有功输出能够及时补上,最终整个系统仍然能输出稳定的电能,即实现2台风电机组的输出互补。

4.2 风电场互补控制仿真

考虑2个风电场的风电机群拓扑结构如图2所示。

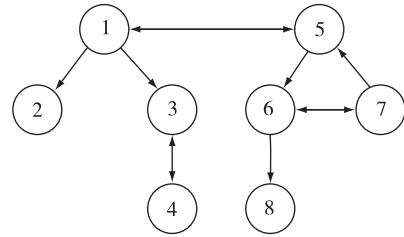


图2 2个风电场拓扑结构图

Fig.2 Topological structure of two wind farms

仿真系统由2个海上风电场组成,每个风电场各由4台双馈风电机组组成,即 $A_1 = \{1, 2, 3, 4\}$, $A_2 = \{5, 6, 7, 8\}$ 。取2个风电场输出的总的有功目标值 $P_{sA} = 63 \text{ MW}$,假设各风电机组的主要参数如附录D中表D2和表D3所示。

由式(28)可选取 $T = [10 \quad -10]^T$,假设初始值 $T_{10} = [2 \quad -6]^T$, $T_{20} = [8 \quad -4]^T$,由互补控制策略式(21)可得:

$$\begin{cases} \mu_1 = -y_1 - y_5 + T + \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = y_1 - y_2 + \bar{\mu}_2 \\ \mu_3 = y_1 + y_4 - 2y_3 + \bar{\mu}_3 \\ \mu_4 = y_3 - y_4 + \bar{\mu}_4 \\ \mu_5 = y_7 - y_1 - 2y_5 + T + \bar{\mu}_5 \\ \mu_6 = y_7 + y_5 - 2y_6 + \bar{\mu}_6 \\ \mu_7 = y_6 - y_7 + \bar{\mu}_7 \\ \mu_8 = y_6 - y_8 + \bar{\mu}_8 \end{cases}$$

假设3s时风电场 A_1 输出和有功输出发生变化,则其输出响应曲线和输出有功功率曲线如图3所示。图中, $y_{(A_1)1}$ 、 $y_{(A_1)2}$ 和 $y_{(A_2)1}$ 、 $y_{(A_2)2}$ 分别为风电场 A_1 和 A_2 中机组的输出; $y_{(15)1}$ 、 $y_{(15)2}$ 和 $y_{(36)1}$ 、 $y_{(36)2}$ 分别为机组1、5和机组3、6的输出之和; P_{sA_1} 、 P_{sA_2} 分别为风电场 A_1 、 A_2 中的4台机组有功输出总和,即 $P_{sA_1} = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4}$, $P_{sA_2} = P_{s5} + P_{s6} + P_{s7} + P_{s8}$; P_{sA} 为2个风电场中一共8台机组有功输出总

和, 即 $P_{sA} = P_{sA_1} + P_{sA_2}$ 。

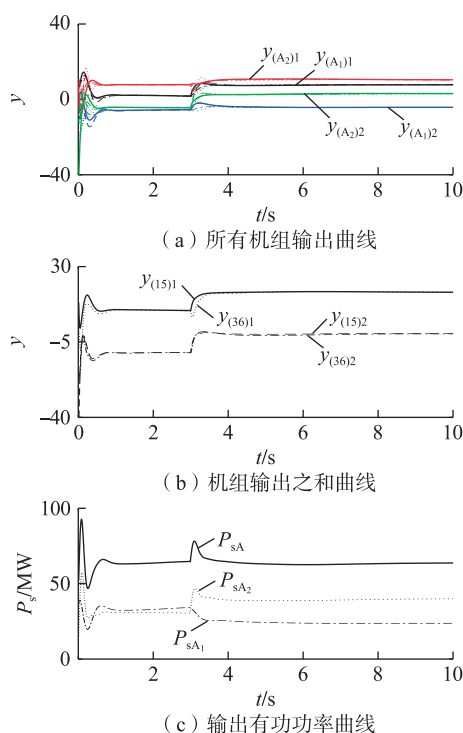


图 3 2 个风电场输出响应和输出有功功率曲线

Fig.3 Curves of output response and active power of two wind farms

由图 3(a)可知,在 0~3 s 内,2 个风电场内各机组的输出分别能达到输出同步,即 A_1 中的机组输出同步到 T_{10} , A_2 中的机组输出同步到 T_{20} ; 由图 3(b)可知, A_1 中一台风电机组的输出都与 A_2 中一台机组的输出互补,即它们输出之和收敛到目标值 T ; 由图 3(c)可知,这个时间段内 2 个风电场输出的有功功率的总和能够收敛至目标值 P_{sA} (63 MW)。在 3 s 时,风电场 A_1 的有功输出减小,根据互补控制率调整 A_2 的输出,使得 2 个风电场输出再次互补,同时 2 个风电场的有功功率输出也收敛至目标值 P_{sA} ,即实现了 2 个风电场的有功互补。

4.3 故障情况下风电场互补控制仿真

仍考虑如图 2 所示的 2 个风电场,2 个风电场输出的总的有功目标值仍然为 $P_{sA} = 63$ MW,选取 $T = [10 \ -10]^T$ 。假设风电场 A_1 中的机组 4 在 2.5 s 时发生故障,无法正常工作;在 3 s 时,将机组 4 从网络中切除,故障切除后网络拓扑结构如图 4 所示,则风电机组输出响应曲线和输出有功功率曲线如图 5 所示。图中, $y_{(4)1}$ 、 $y_{(4)2}$ 为机组 4 的输出。

由图 5 可知,整个故障过程可以分为 3 个阶段:

a. 在 2.5 s 之前,2 个风电场内部分别达到同步运行状态,2 个风电场输出之和收敛至目标值 T ,并且 2 个风电场输出有功的总值收敛至目标值 P_{sA} 。

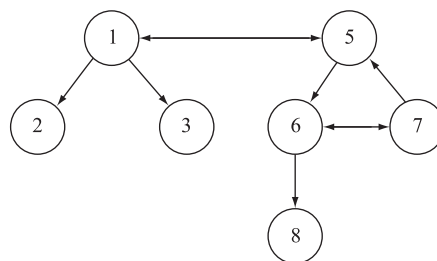


图 4 故障后 2 个风电场拓扑结构图

Fig.4 Topological structure of two wind farms after failure

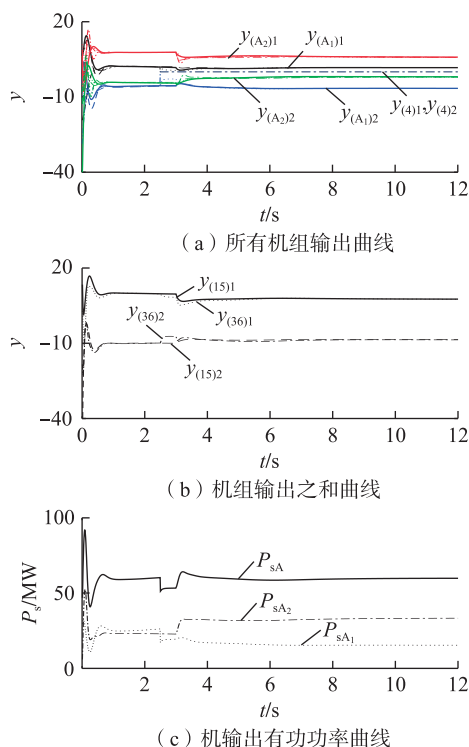


图 5 故障过程中 2 个风电场输出响应和输出有功功率曲线

Fig.5 Curves of output response and active power of two wind farms during failure

(63 MW);

b. 在 2.5 s 时,机组 4 发生故障,其有功输出跌为 0,2.5~3 s,故障机组仍连接在网络中,因此机组 3 受其影响而偏离同步状态;

c. 在 3 s 时将机组 4 切除,可根据式 (28) 重新调整 $T' = [8 \ -8.4]^T$,因此在 3 s 以后互补控制率为 $\mu_1 = -y_1 - y_5 + T' + \bar{\mu}_1$, $\mu_2 = y_1 - y_2 + \bar{\mu}_2$, $\mu_3 = y_1 - y_3 + \bar{\mu}_3$, $\mu_5 = y_7 - y_1 - 2y_5 + T' + \bar{\mu}_5$, $\mu_6 = y_7 + y_5 - 2y_6 + \bar{\mu}_6$, $\mu_7 = y_6 - y_7 + \bar{\mu}_7$, $\mu_8 = y_6 - y_8 + \bar{\mu}_8$ 。

基于新的控制率,由图 5 可知,在 3 s 后 2 个风电场的输出之和重新收敛至目标值,2 个风电场输出的总有功率仍能收敛至目标值 P_{sA} (63 MW),即在单机发生故障时,通过重新调整,2 个风电场仍然能实现有功输出互补。

通过以上仿真和分析可知,采用分布式互补控制策略,能够有效降低故障带来的损失,即便单机发生故障,整个风电场仍能稳定运行。海上风电场环境复杂多变、值守困难,分布式控制策略可大幅提高风电场运行的可靠性和自治能力。

5 结论

本文针对2个海上风电场中双馈风电机群的互补控制问题,基于Hamilton能量法提出了分布式互补控制策略,实现风电场内部输出同步、风电场之间输出互补的控制目标。本文将海上风电场看作一个分布式网络,基于Hamilton能量法和图论的知识对整个风电机群网络进行分布式控制,从而提高了整个海上风电机群运行的可靠性和自治性;基于能量成型方法修正风电机群得Hamilton能量函数,为多风电机组的互补控制策略设计创造条件;进一步,将互补控制拓展到2个风电场的风电机群,实现2个风电场输出互补的控制目标。在风能储备充足的情况下,当其中一个风电场的输出受到影响时,通过启动2个风电场的互补控制策略,仍然能向电网输出稳定的电能。该互补控制策略具有明确的应用价值和工程意义,可为未来海上风电场的运行和调度提供备选方案。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

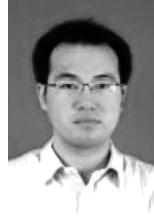
参考文献:

- [1] 李逸驰,孙国强,杨义,等. 含经VSC-HVDC并网海上风电场的交直流系统概率最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):136-142.
LI Yichi, SUN Guoqiang, YANG Yi, et al. Probabilistic optimal power flow of AC/DC system with offshore wind farm connected to grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 136-142.
- [2] MADARIAGA A, MARTIN J L, ZAMORA I, et al. Technological trends in electric topologies for offshore wind power plants[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 24(8): 32-44.
- [3] 傅质馨,袁越. 海上风电机组状态监控技术研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):121-129.
FU Zhixin, YUAN Yue. Status and prospects on condition monitoring technologies of offshore wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 121-129.
- [4] 彭衍建,李勇,曹一家. 基于VSC-MTDC的大规模海上风电并网系统协调下垂控制方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):16-25.
PENG Yanjian, LI Yong, CAO Yijia. Coordinated droop control for large-scale offshore wind farm grid-connected based on VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 16-25.
- [5] DENG F J, CHEN Z. Operation and control of a DC-grid offshore wind farm under DC transmission system faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1356-1363.
- [6] 黄川,王志新,王国强. 基于MMC的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):23-27.
HUANG Chuan, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Simulation of MMC-based converter for flexible direct current transmission of offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 23-27.
- [7] KHALIK A S, MASSOUD A M, ELSEROUGI A A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3401-3409.
- [8] VARELA G Q, AULT G W, LARA O A, et al. Electrical collector system options for large offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(2): 107-114.
- [9] 王俊,段斌,苏永新. 基于尾流效应的海上风电场有功出力优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):26-32.
WANG Jun, DUAN Bin, SU Yongxin. Optimization of active power output in offshore wind farms based on wake effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 26-32.
- [10] 王冰,窦玉,王宏华. 海上风电场双馈风电机群分布式协同控制研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5279-5287.
WANG Bing, DOU Yu, WANG Honghua. Distributed cooperative control research of doubly fed wind turbine groups in offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5279-5287.
- [11] 赵曰浩,彭克,徐丙垠,等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):253-259.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Hierarchical and distributed coordination control of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 253-259.
- [12] VAN DER SCHAFT A J. L2-gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2000: 113-165.
- [13] 王玉振. 广义Hamilton控制系统理论:实现、控制与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:87-104.
- [14] ORTEGA R, VAN DER SCHAFT A J, MASCHKE B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [15] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Decentralized nonlinear control of wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 613-621.
- [16] MESBAHI M, EGERSTEDT M. Graph theoretic method in multiagent networks[M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2010: 24-62.
- [17] REN W, BEARD R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2008: 43-70.
- [18] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2002: 54-87.
- [19] LI Changsheng, WANG Yuzhen. Protocol design for output consensus of port-controlled Hamiltonian multi-agent systems[J]. ACTA Automatica Sinica, 2014, 40(3): 415-422.

作者简介:

王 冰(1975—),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要研究方向为风电机组控制、网络化系统协调与控制(E-mail: icekingking@hhu.edu.cn);

田 敏(1994—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为多智能体控制和海上风电的协调与控制(E-mail:



王 冰

838989594@qq.com);

王宏华(1963—),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新型交直流电气传动、先进控制理论及其应用(E-mail:wanghonghua@263.net)。

Distributed complementary control of doubly-fed wind turbine group in offshore wind farm based on Hamiltonian energy theory

WANG Bing, TIAN Min, WANG Honghua

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: For the control problem of doubly-fed wind turbine groups in two offshore wind farms, a complementary control strategy is proposed based on Hamiltonian energy theory, which can not only ensure the wind turbine outputs synchronous in one single group, but also achieve the output complementation of two groups. The single-machine model of doubly-fed wind turbine is Hamiltonian realized to get the PCH-D (Port-Controlled Hamiltonian with Dissipation) model. The complementary control of two doubly-fed wind turbines is studied, and the Hamiltonian energy control law is designed based on the energy shaping method. The complementary control law between two wind turbine groups is presented to render the two wind farms synchronous respectively and remain the total outputs and active power outputs of the two groups constant. Simulations verify the effectiveness of the distributed complementary control for wind turbine groups.

Key words: distributed complementary control; energy shaping method; offshore wind power; doubly-fed wind turbine group; wind farms