输入时滞的海上风电机群分布式控制

唐 桢1[†], 王 冰¹, 刘维扬¹, 曹智杰²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京豪庆信息科技有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要:随着海上风电的大规模发展,以及电网互联范围的不断扩大,时滞主要产生在风电场广域测量系统的信号 测量和传输中,从而导致风电机组系统性能下降甚至不稳定,严重影响了风电场的正常运行.因此,该文基于Hamilton能量理论,研究了双馈风电机群的分布式时滞控制问题.首先,该文对双馈风电系统进行Hamilton实现,得到风 电机组PCH-D模型;然后,针对单机系统PCH-D模型,引入Casimir函数设计控制律,使得风电系统在输入时滞下能 够稳定运行;进而,将风电机组网络化,设计分布式时滞控制策略,使得整个风电机群在30~300 ms的时滞范围内整 体保持稳定.最后,通过仿真验证了所提控制策略能有效地解决系统的输入时滞问题,同时减小了时滞引起的系统 误差,提高了风电机群的稳定性和控制精度.

关键词:海上风电场;双馈风电机群;分布式控制;时滞;Casimir函数;Hamilton

引用格式: 唐桢, 王冰, 刘维扬, 等. 输入时滞的海上风电机群分布式控制. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2581 – 2590

DOI: 10.7641/CTA.2020.00101

Distributed control of offshore wind turbine group with input delay

TANG Zhen^{1†}, WANG Bing¹, LIU Wei-yang¹, CAO Zhi-jie²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 211100, China;

2. Nanjing Howard Technology Science and Technology Company, Nanjing Jiangsu 210006, China)

Abstract: With the large-scale development of offshore wind power and the increasing scale of power grid interconnection, time delay mainly occurs in the signal measurement and transmission of wide area measurement system of wind farm, which leads to the performance degradation or even instability of the wind turbine system, and seriously affects the normal operation of the wind farm. Therefore, based on Hamilton energy theory, the distributed time delay control of doubly fed wind turbine group is studied in this paper. Firstly, the doubly fed wind power system is implemented to PCH–D model. Then, Casimir function is introduced into the PCH–D model of the single wind power system to make the wind power system stable under time delay. Then, the wind turbine group is networked and the distributed time delay control strategy is proposed to maintain the wind turbine group system stable in the time delay range of 30~300 ms. Finally, the simulation results show that the control strategy proposed in this paper, can effectively solve the input time delay problem, and reduce the system error caused by time delay, also improve the stability and control accuracy of the wind turbine group.

Key words: offshore wind farms; doubly fed wind turbine group; distributed control; time delay; Casimir function; Hamilton

Citation: TANG Zhen, WANG Bing, LIU Weiyang, et al. Distributed control of offshore wind turbine group with input delay. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2581 – 2590

1 引言

在全球高度关注低碳经济的大背景下,风电作为 主要的可再生能源,以其巨大的潜质成为全球开发的 热点^[1-2].海上风能资源非常丰富,而且风湍流强度和 海面粗糙度相对陆地更小,海上风能资源的开发利用 是满足能源增长、实施可持续发展的重要措施^[3-4].随 着海上风电技术的成熟,海上风电机组呈现大型化的 发展趋势,同时海上风电场的规模也不断扩大.为满 足风电机群在海洋环境下的稳定性要求,需要设计良好的控制策略,使得单台机组以及整个风电场的控制效果得到进一步的提升.

随着电力系统和通讯网络的快速融合,系统的控制形式也趋向于网络化、智能化和综合化.相对于传统的集中控制,分布式控制结构具有灵活性高和可扩展性好等特点,在发电、输电、配电等电力产业模式均被广泛采用^[5-7].海上风电场中含有多台风电机组,且

本文责任编委: 陈增强.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51777058) and the Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (XNY-010).

收稿日期: 2020-02-27; 录用日期: 2020-06-15.

[†]通信作者. E-mail: 2932441894@qq.com; Tel.: +86 18351962979.

国家自然科学基金项目(51777058), 江苏省六大人才高峰项目(XNY-010)资助.

海上环境复杂多变,机组和主控中心的通信较为复杂. 对海上风电机群采用分布式控制结构,可以将海上风 电场看作一个分布式网络,风电场中的每台机组就是 网络中的一个节点,每个机组可以从邻近的机组获得 相应的状态信息或参数,并将其决策于控制策略中, 不存在集中控制器与每个风电机组通信做出控制决 策^[8].分布式控制极大地减少了风电机组与集中控制 器的通信负担,同时也减少输配电设备的投资和电网 输送的损失.

现代电力系统逐渐趋向于多互联、大规模等特性 发展, 广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)被应用到电力系统中,为现代电力系统的分 布式同步测量和稳定控制提供了可能. WAMS存在于 风电厂的相量测量单元、通信系统、调度控制系统. 在WAMS系统中,信号传输产生的时滞通常较大,且 呈现出不可忽视的随机特性,系统时滞问题在许多电 力工程和应用中不可避免[9-10].风电机组的控制输入 作为广域测量信号在信号测量和传输中受到时滞的 影响,可能导致风电机组系统在不稳定状态下的主特 征值和主振荡频率产生变化. 根据时滞系统理论, 时 滞往往是系统不稳定或性能恶化的根源. 在风力发电 机组系统中,输入时滞会导致电力系统控制器的预设 参数失效,甚至会降低系统运行点的稳定裕度,从而 恶化电力系统的运行状况,因此风电机组的输入时滞 控制问题不容忽视[11-12].

近年来,风电机组受时滞影响的相关研究却相对 较少,文献[13]考虑了风电机组的时滞问题,利用网络 预测控制(network predictive control, NPC)的协调设 计方法增加风电系统的阻尼,补偿广域信号产生的时 滞.文献[14]考虑了从控制单元到马达驱动器的命令 通信时滞,提出了惯性补充方案.文献[15]针对多区域 时滞电力系统,提出了一种新的分散滑模变结构控制 策略,有效减小时滞引起的频率偏差和联络线功率波 动.对于时滞风电系统的研究多数是对非线性普适模 型的研究,并没有考虑时滞对风机模型的作用位置, 同时也没有考虑多个风机之间构成的协调问题.

目前,有关非线性时滞系统的稳定性问题在实际 工程和理论研究中受到学者和工程师的广泛关注.设 计状态反馈控制器的方法相对还原法更容易实现,所 以其成为主要的控制方法应用在输入时滞系统的稳 定性分析中.文献[16]结合传统的Lyapunov-Krasovski 函数,设计了一种新的自适应控制器,得到非线性时 滞系统的稳定性判据,但其推导过程中多次对矩阵不 等式放大,增加了结论的保守性.文献[17]基于线性 矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法设计了 一种模糊控制器用来处理非线性系统的时滞. LMI方 法在实际复杂系统中寻找多个不确定矩阵不一定可 用,且其过程较为复杂.海上风电机群是一个多输入 多输出的复杂非线性时滞系统,而Casimir函数是非线性系统设计的一个重要工具,可以进一步深化Hamilton 系统的稳定性分析与控制^[18–19].本文利用Hamilton理 论中的Casimir函数方法,能够有效地解决非线性输入 时滞系统的控制器设计问题,同时减少了多个不确定 矩阵的使用,克服了以往通过多次矩阵放大带来的保 守性.该方法更容易实现,而且还能够结合分布式控 制,解决了多个控制对象之间的协调问题.

为实现双馈风力发电机群的时滞控制.本文首先 对双馈风力发电机组进行Hamilton实现,得到风力发 电机组的端口受控耗散Hamilton(port-controlled Hamilton with dissipation, PCH-D)系统模型,该模型具 有良好的结构特性和清晰的物理意义;然后,针对风 电单机系统包含输入时滞的情况,利用 Casimir 方法 将PCH-D系统的闭环形式嵌入到扩展系统中,再将扩 展后的系统限制在不变的Casimir流形上,在保持 PCH-D系统结构下进行控制,使得闭环系统通过不同 的能量整形具有所需的稳定性能;接着,将单机控制 扩展到具有多台机组的风电机群系统,引入图论的基 本概念和描述方法,得到风电机群的PCH-D时滞模 型,将Casimir方法与分布式控制相结合,设计输入时 滞下的分布式协同控制策略,使得整个风电机群在存 在输入时滞的情况下,能够达到全局稳定且有功功率 输出同步的控制效果,提高了风电场的稳定性.最后, 通过仿真验证了风电机群基于输入时滞的分布式时 滞控制策略的有效性.

2 双馈风电机组Hamilton模型和图论基础

2.1 双馈风电机组的Hamilton实现

风力发电机组包括风力机、传动结构和双馈感应 发电机(doubly fed induction generator, DFIG),如果将 涡轮、齿轮箱、轴和发电机集中到一个等效质量*H*_{tot} 中,则单质量传动系统可以用一个与功率相关的一阶 模型表示^[20]:

$$H_{\rm tot}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = P_{\rm s} - P_{\rm m},\tag{1}$$

其中: H_{tot} 为风机和发电机等整体的惯性常数; s为转 子转差率; P_m 为风机输入的机械功率; $P_s = -E'_d i_{ds}$ $-E'_d i_{as}$ 为风电机组输出的有功功率.

为方便对风电机组控制和分析,将abc三相磁链方 程做dq坐标变换,变换后的电感系数都变为常数.同 时考虑到定子瞬时磁通的积累可能给双馈发电机带 来有害的功率和转矩振荡,因此采用忽略定子电磁暂 态的二阶DFIG模型^[21]:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}E'_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}t} = s\omega_{\mathrm{s}}E'_{\mathrm{q}} - \frac{E'_{\mathrm{d}} + (X_{\mathrm{s}} - X'_{\mathrm{s}})i_{\mathrm{qs}}}{T'_{0}} - \omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}u_{\mathrm{qr}}, \\ \frac{\mathrm{d}E'_{\mathrm{q}}}{\mathrm{d}t} = -s\omega_{\mathrm{s}}E'_{\mathrm{d}} - \frac{E'_{\mathrm{q}} - (X_{\mathrm{s}} - X'_{\mathrm{s}})i_{\mathrm{ds}}}{T'_{0}} + \omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}}u_{\mathrm{dr}}, \end{cases}$$
(2)

其中: L_{ss} 为定子自感; L_{rr} 为转子自感; L_{m} 为互感; R_{r} 为转子电阻; ω_{s} 为同步角速度; X_{s} 为定子电抗; X'_{s} 为 定子瞬态电抗; i_{qs} 和 i_{ds} 分别为q轴和d轴的定子电流; E'_{q} 和 E'_{d} 分别为在瞬态电抗下的q轴和d轴电压; u_{qr} 和 u_{dr} 分别为q轴和d轴的转子电压;

$$X_{\rm s} = \omega_{\rm s} L_{\rm ss}, \ X'_{\rm s} = \omega_{\rm s} (L_{\rm ss} - \frac{L_{\rm m}^2}{L_{\rm rr}}), \ T'_0 = \frac{L_{\rm rr}}{R_{\rm r}}$$

因此, 双馈风力发电机组在式(1)-(2)下写成一个 三阶模型

$$\begin{cases} H_{\rm tot} \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = -E'_{\rm d} i_{\rm ds} - E'_{\rm q} i_{\rm qs} - P_{\rm m}, \\ \frac{\mathrm{d}E'_{\rm d}}{\mathrm{d}t} = s\omega_{\rm s}E'_{\rm q} - \frac{E'_{\rm d} + (X_{\rm s} - X'_{\rm s})i_{\rm qs}}{T'_{\rm 0}} - \omega_{\rm s}\frac{L_{\rm m}}{L_{\rm rr}}u_{\rm qr}, \\ \frac{\mathrm{d}E'_{\rm q}}{\mathrm{d}t} = -s\omega_{\rm s}E'_{\rm d} - \frac{E'_{\rm q} - (X_{\rm s} - X'_{\rm s})i_{\rm ds}}{T'_{\rm 0}} + \omega_{\rm s}\frac{L_{\rm m}}{L_{\rm rr}}u_{\rm dr}. \end{cases}$$
(3)

因此,式(3)是风电机组在d-q坐标系下的双输入三阶 模型, $x = [s E'_d E'_q]^T$ 为状态, $u = [u_{dr} u_{qr}]^T$ 为输入.

双馈风电机组是一个多输入多输出的非线性模型 (3),而PCH-D模型是处理非线性模型的一个重要方 法,其更适用于高阶大型电力系统的暂态稳定研究. 因此本文将双馈风电机组的PCH-D模型作为研究的 基础模型,式(4)则是典型的PCH-D形式^[19]

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x) - R(x))\nabla H(x) + G(x)\mu, \\ y = G^{\mathrm{T}}\nabla H(x), \end{cases}$$
(4)

其中: $J(x) = -J^{T}(x) \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $R(x) \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $R(x) = R^{T}(x) \ge 0$, $G(x) \in \mathbb{R}^{m \times n}$. 为了将三阶风电机组 数学模型(3)转换成PCH-D形式(4), 双馈风电机组的 三阶模型(3)改写成矩阵形式为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} s\\ E'_{\mathrm{q}}\\ E'_{\mathrm{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{i_{\mathrm{qs}}}{2H_{\mathrm{tot}}}E'_{\mathrm{q}} - \frac{i_{\mathrm{ds}}}{2H_{\mathrm{tot}}}E'_{\mathrm{d}} - \frac{P_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{tot}}}\\ -\frac{E'_{\mathrm{q}}}{T'_{0}} - s\omega_{\mathrm{s}}E'_{\mathrm{d}} + \frac{i_{\mathrm{ds}}}{T'_{0}}(X_{\mathrm{s}} - X'_{\mathrm{s}})\\ s\omega_{\mathrm{s}}E'_{q-} - \frac{E'_{\mathrm{d}}}{T'_{0}} - \frac{i_{\mathrm{qs}}}{T'_{0}}(X_{\mathrm{s}} - X'_{\mathrm{s}}) \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} 0 & 0\\ \omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} & 0\\ 0 & -\omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\mathrm{dr}}\\ u_{\mathrm{qs}} \end{bmatrix}.$$
(5)

取

$$H = \frac{1}{2}s^{2} + \frac{1}{2}(E'_{\rm q} + \frac{P_{\rm m}}{2i_{\rm qs}})^{2} + \frac{1}{2}(E'_{\rm d} + \frac{P_{\rm m}}{2i_{\rm ds}})^{2}$$

作为系统的Hamilton能量函数,为将模型(5)化为端口 受控Hamilton(port-controlled Hamilton, PCH)模型,再 设计控制率

$$u = \begin{bmatrix} u_{\rm dr} \\ u_{\rm qr} \end{bmatrix} = K + \mu,$$

其中K为预反馈和µ为输出反馈. 取预反馈为

$$\begin{split} K &= \\ \begin{bmatrix} -\frac{L_{\rm rr}}{\omega_{\rm s} L_{\rm m}} (\frac{i_{\rm ds}}{T'_{\rm 0}} (X_{\rm s} - X'_{\rm s}) + \frac{P_{\rm m}}{2T'_{\rm 0} i_{\rm qs}} + (\frac{\omega_{\rm s} P_{\rm m}}{2i_{\rm ds}} - \frac{i_{\rm qs}}{2H_{\rm tot}})s) \\ \frac{L_{\rm rr}}{\omega_{\rm s} L_{\rm m}} (\frac{i_{\rm qs}}{T'_{\rm 0}} (X_{\rm s} - X'_{\rm s}) + \frac{P_{\rm m}}{2T'_{\rm 0} i_{\rm ds}} - (\frac{\omega_{\rm s} P_{\rm m}}{2i_{\rm qs}} + \frac{i_{\rm ds}}{2H_{\rm tot}})s) \end{bmatrix}, \end{split}$$

$$(6)$$

.

将预反馈K代入闭环系统(5),则系统(5)表示为[22]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} s\\ E'_{\mathrm{q}}\\ E'_{\mathrm{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\iota_{\mathrm{qs}}}{2H_{\mathrm{tot}}} & -\frac{\iota_{\mathrm{ds}}}{2H_{\mathrm{tot}}} \\ \frac{i_{\mathrm{qs}}}{2H_{\mathrm{tot}}} & -\frac{1}{T'_{0}} & -s\omega_{\mathrm{s}} \\ \frac{i_{\mathrm{ds}}}{2H_{\mathrm{tot}}} & s\omega_{\mathrm{s}} & -\frac{1}{T'_{0}} \end{bmatrix} \nabla H + \\ \begin{bmatrix} 0 & 0\\ \omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} & 0\\ 0 & -\omega_{\mathrm{s}}\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\mathrm{dr}}\\ u_{\mathrm{qr}} \end{bmatrix} \triangleq \\ (J(x) - R(x))\nabla H(x) + G(x)\mu, \quad (7)$$

$$y = G^{\mathrm{T}} \nabla H(x) = \begin{bmatrix} \omega_{\mathrm{s}} \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} (E_{\mathrm{q}}' + \frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{\mathrm{qs}}}) \\ -\omega_{\mathrm{s}} \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{rr}}} (E_{\mathrm{d}}' + \frac{P_{\mathrm{m}}}{2i_{\mathrm{ds}}}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式(7)-(8)满足PCH-D结构(4), 其中J, R, G分别为

$$\begin{split} J(x) &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i_{\rm qs}}{2H_{\rm tot}} & -\frac{i_{\rm ds}}{2H_{\rm tot}} \\ \frac{i_{\rm qs}}{2H_{\rm tot}} & 0 & -s\omega_{\rm s} \\ \frac{i_{\rm ds}}{2H_{\rm tot}} & s\omega_{\rm s} & 0 \end{bmatrix}, \\ R &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_0'} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_0'} \end{bmatrix}, \ G &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_{\rm s} \frac{L_{\rm m}}{L_{\rm rr}} & 0 \\ 0 & -\omega_{\rm s} \frac{L_{\rm m}}{L_{\rm rr}} \end{bmatrix}. \end{split}$$

2.2 图论基础

海上风电场中的各个机组通过通讯网络相互连接, 整个风电场可看作一个网络拓扑,风电机组通过控制 策略相互协调.本文引入一些图论的基本概念,为后 文分布式控制设计提供理论基础^[23].

考虑系统中包含n个节点,节点之间主要通过图来 表示节点之间的通信关系,通常将通信拓扑图记为 $G(V, E), V = (v_1, \dots, v_n)$ 为节点的集合; $E \subseteq V \times V$ 为边集,每条边代表两个节点存在信息交流.如果连 接两节点间的边是有向的,G(V, E)称为有向图;否 则;称为无向图.边 (v_i, v_j) 表示节点能够获得节点的 信息,每张图的邻接矩阵 $A = \{a_{ij}\} \in \mathbb{R}^{n \times n}, \exists (v_i, v_j)$ $\in E$ 时, $a_{ij} > 0$;否则, $a_{ij} = 0$.在本文中,为便于分 2584

析, 对于 $a_{ij} \neq 0$ 情况, a_{ij} 皆取1.

3 双馈风电机群输入时滞控制设计

近年来,电网的快速发展大大增加了系统结构和 运行的复杂度,同时智能电网要求能够提高系统稳定 性和灵活性.在广域控制系统中,远程量测信号和广 域反馈信号在传输和反馈过程中会存在显著的时滞, 使得电力系统变成时滞动力系统,同时时滞的存在使 得原控制器在实际电力系统中的控制效果变差甚至 会引起振荡,恶化系统的稳定性能.海上风电场位于 电网远端,相距较远的风电机组工作于恶劣的海洋环 境中,同时存在于广域信号中的时滞通常受传输距离 和传输协议等因素影响,具有不确定性和随机性,即 不同风电机组的时滞在一定区间内大小不同^[24].为提 高风电机组的稳定性,本文设计了基于时滞的海上风 电机群协调控制策略.

3.1 单机输入时滞控制设计

本文针对风电机群输入含有时滞的情况,首先分析风电场中单个机组在时滞情况下的控制问题,在风电机组的PCH-D系统模型基础上,引入Casimir函数,通过扩展互连的方法塑造新的能量函数,将新Hamilton能量函数作为Lyapunov函数在扩展系统中的候选形式,使得扩展风电机组系统能够在原平衡点稳定运行^[19].

3.1.1 问题描述

对于双馈风电机组这类多输入多输出非线性系统,本文将双馈风电机组的PCH-D模型作为研究的基础 模型,考虑海上风电机组的单机PCH-D模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x) - R(x))\nabla H(x) + G(x)\mu, \\ y = G^{\mathrm{T}}\nabla H(x). \end{cases}$$
(9)

假设风电机组与远处的电力系统相连,则在测量 信号中不可避免地存在时滞.考虑控制输入u_{dr}, u_{qs} 反馈当地测量信息和远程测量信息,因此将风电机组 系统建模为含输入时滞的PCH-D形式,表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x) - R(x))\nabla H(x) + G(x)\mu(t-\tau), \\ y = G^{\mathrm{T}}\nabla H(x), \end{cases}$$
(10)

其中 τ 为风电机组的输入时滞.风电机组之间距离不等,机组受到的时滞是随机的常数, τ_{\min} 为风电机组受到的最小时延, τ_{\max} 为风电机组受到的最大时延, τ 是满足 $\tau_{\min} \leqslant \tau \leqslant \tau_{\max}$ 的不确定随机常数.

3.1.2 Casimir函数设计

实际的风电机组系统可以通过用PCH-D形式来 描述,其Hamilton能量函数可作为Lyapunov函数的候 选函数.为使得闭环风电机组系统在输入时滞下具有 所需的稳定性能,通过互连来形成新的能量函数,选 取源系统如下:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = (J_1(\xi) - R_1(\xi)) \nabla H_1(\xi) + G_1(\xi) u_1(t-\tau), \\ y_1 = G_1^{\mathrm{T}}(\xi) \nabla H_1(\xi), \end{cases}$$
(11)

其中: $\xi \in \mathbb{R}^{n_1}, y_1 \in \mathbb{R}^m, u_1(t - \tau) \in \mathbb{R}^m; H_1(\xi)$ 为用 于动态控制扩展的Hamilton函数.

设计反馈互连控制器为

$$\mu(t-\tau) = -(t-\tau)y_1, u_1(t-\tau) = (t-\tau)y.$$
(12)

将系统(10)与源系统(11)互连,得到以下扩展系统:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J(x) - R(x) & -G(x)(t-\tau)G_1^{\mathrm{T}}(\xi) \\ G_1(\xi)(t-\tau)G^{\mathrm{T}}(x) & J_1(\xi) - R_1(\xi) \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} \nabla H(x) \\ \nabla H_1(\xi) \end{pmatrix}.$$
(13)

定义1 函数 $\xi_k - c_k(x, t - \tau)(k = 1, 2, \dots, n_1)$, 为系统(13)的Casimir函数, 该函数满足

$$\begin{cases} (\nabla C(x,t-\tau))^{\mathrm{T}} J(x) \nabla C(x,t-\tau) = J_{1}(\xi), \\ R(x) \nabla C(x,t-\tau) = R_{1}(\xi) = 0, \\ (\nabla C(x,t-\tau))^{\mathrm{T}} J(x) = G_{1}(\xi)(t-\tau) G^{\mathrm{T}}(x), \end{cases}$$
(14)

其中
$$C(x, t - \tau) = (c_1(x, t - \tau), \cdots, c_{n_1}(x, t - \tau)).$$

基于定义1,可以定义一个不变流形为

$$B = \{(x,\xi) | \xi_k = c_k(x,t-\tau) + d_k, \ k = 1, \cdots, n_1\},$$
(15)

其中 d_1, d_2, \dots, d_{n_1} 为常数,则系统(13)就可以限制在 该不变流形B上.为使得风电机组系统在含有输入时 滞下仍能够保持稳定运行,现基于Casimir函数方法设 计风电机组单机控制策略,具体定理如下.

定理1 考虑海上风电场中含输入时滞的双馈 风电机组(10),设计反馈控制器为

$$\mu(t-\tau) = -(t-\tau)G_1^{\mathrm{T}}(x)\nabla H_1(\xi)|_{\xi_k = c_k(x,t-\tau) + d_k},$$
(16)

能够使得单机闭环系统(10)在输入时滞条件下保持稳 定运行.

证 对于输入时滞风电机组PCH-D模型(10),将 控制器

 $\mu(t-\tau) = -(t-\tau)G_1^{\mathrm{T}}(x)\nabla H_1(\xi)|_{\xi_k = c_k(x,t-\tau) + d_k}$ 代入互连后的扩展闭环系统(13)中,有

$$\dot{x} = (J(x) - R(x))\nabla H(x) - G(x)(t-\tau)G_1^{\mathrm{T}}(x)\nabla H_1(\xi)|_{\xi_k = c_k(x,t-\tau) + d_k}$$

在条件(14)下继续整理得

$$\dot{x} = (J(x) - R(x))\nabla H(x) + (J(x) - R(x)) \times \nabla C(x, t - \tau)\nabla H_1(\xi)|_{\xi_k = c_k(x, t - \tau) + d_k} =$$

$$(J(x) - R(x))\nabla H(x) + (J(x) - R(x)) \times$$

$$\nabla H_1(x, t - \tau) =$$

$$(J(x) - R(x))\nabla H_a(x, t - \tau),$$

其中 $H_a(x, t - \tau) = H(x) + H_1(x, t - \tau).$
引入Casimir函数 $\xi_k - c_k(x, t - \tau), H_1(x, t - \tau)$
可表示为

$$H_1(x, t - \tau) = H_1(c_1(x, t - \tau) + d_1, \cdots, c_{n_1}(x, t - \tau) + d_{n_1}).$$

取
$$H_1(\xi), C(x_1, x_2, x_3, t - \tau), G_1(x)$$
为

$$\begin{cases}
H_1(\xi) = \xi, \\
C(x_1, x_2, x_3, t - \tau) = \frac{1}{2}\tau x_1^2, \\
G_1(x) = \frac{i_{qs}L_{rr}x_1\tau}{2H_{tot}L_m\omega_s(t - \tau)} - \frac{i_{ds}L_{rr}x_1\tau}{2H_{tot}L_m\omega_s(t - \tau)}, \\
则有
\end{cases}$$

$$\nabla H_1(\xi) = 1, \ C(x_1, x_2, x_3, t - \tau) = \begin{pmatrix} \tau x_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

其满足Casimir函数存在的充分必要条件(14), 扩展系 统(13)的Casimir函数 $\xi_k - c_k(x, t - \tau)$ 存在, 此时可将 Casimir函数取为 $\xi = C(x, t - \tau)$, 则

$$\begin{split} H_{\mathbf{a}}(x,t-\tau) &= \\ H(x) + H_{1}(x,t-\tau) &= \\ \frac{1}{2}x_{1}^{2} + \frac{1}{2}(x_{2} + \frac{P_{\mathbf{m}}}{2i_{\mathbf{qs}}})^{2} + \frac{1}{2}(x_{3} + \frac{P_{\mathbf{m}}}{2i_{\mathbf{ds}}})^{2} + \frac{1}{2}\tau x_{1}^{2} \geqslant \\ 0, \end{split}$$

继而对 $H_{a}(x,t-\tau)$ 求时间t导数

$$\begin{split} H_{\mathbf{a}}(x,t-\tau) &= \\ \nabla^{\mathrm{T}}H_{\mathbf{a}}(x,t-\tau)\dot{x} &= \\ -\nabla^{\mathrm{T}}H_{\mathbf{a}}(x,t-\tau)R(x)\nabla H_{\mathbf{a}}(x,t-\tau) \leqslant 0. \end{split}$$

原系统(9)的Hamilton能量函数为

$$H(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}(x_2 + \frac{P_{\rm m}}{2i_{\rm qs}})^2 + \frac{1}{2}(x_3 + \frac{P_{\rm m}}{2i_{\rm ds}})^2,$$

平衡点通过 $\frac{\partial H(x)}{\partial x} = 0$ 求取,得到原系统(9)的平衡 点为 $x_1 = 0, x_2 = -\frac{P_m}{2i_{qs}}, x_3 = -\frac{P_m}{2i_{ds}};$ 而时滞系统 (13)的平衡点通过 $\frac{\partial H_a(x,t-\tau)}{\partial x} = 0$ 求取,得到时滞 系统(13)的平衡点 $x'_1 = 0, x'_2 = -\frac{P_m}{2i_{qs}}, x'_3 = -\frac{P_m}{2i_{ds}},$ 可知扩展后的单机系统(13)的平衡点与不含输入时滞 系统(9)的平衡点相同,扩展系统(13)能够被抑制在不 变流形B(15)上,同时将 H_a 作为系统的Lyapunov函数, 输入时滞系统(10)在源系统(11)作用下能够保持全局 稳定. 证毕.

由上证明可知,在风电机组输入含有时滞的情况下,可通过Casimir函数方法,结合风电机组的PCH-D 模型进行扩展互连,设计状态反馈控制器,使得风电 机组能够保持有效稳定的PCH-D形式,同时消除了输 入时滞对系统的影响,保持系统的稳定运行.

3.2 多机输入时滞控制设计

海上风电场中含有多台风电机组,各机组通过通 讯线路相互连接,并向电网提供电能.海上环境复杂 多变,风电机组之间相距远近不一,每台机组受到的 时滞受距离和环境的影响,在一定范围内随机变化. 针对整个风电机群普遍存在输入时滞的情况,本节将 上节提出的单机输入时滞控制器拓展至风电机群的 协调控制,在网络化的风电机群系统中,设计基于时 滞的分布式控制策略,解决整个风电机群存在不同随 机输入时滞的控制问题,保证整个风电场的全局稳定, 以及有功功率的稳定输出,进一步提高风电场运行的 可靠性.

考虑海上风电机群,将单机PCH-D模型扩展,得 到风电机群的PCH-D模型,具体如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i} = (J_{i}(x_{i}) - R_{i}(x_{i}))\nabla H_{i}(x_{i}) + G_{i}(x_{i})\mu_{i}, \\ y_{i} = G_{i}^{\mathrm{T}}\nabla H_{i}(x_{i}), \end{cases}$$
(17)

其中下标*i* = 1,2,…,*N*表示在整个风电网络拓扑 中第*i*台单机.则含输入时滞的风电机群系统建模为以 下PCH-D形式:

$$\begin{cases} \dot{x_i} = (J_i(x_i) - R_i(x_i)) \nabla H_i(x_i) + G_i(x_i) \mu_i(t - \tau_i), \\ y_i = G_i^{\mathrm{T}} \nabla H_i(x_i), \end{cases}$$

(18)

其中 τ_i 为每个风电机组的输入时滞,满足 $\tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max}$.

假设1 海上风电机群构成的网络拓扑中,至少 存在一簇有向生成树.

定理2 考虑含有N台机组的海上风力发电机 群(17),在风电机群系统输入含有随机时滞情况下 (18),设计风电机群的输入时滞控制策略为

$$\mu_{i} = -(t - \tau_{i}) G_{1i}^{\Gamma}(x_{i}) \nabla H_{1i}(\xi_{i})|_{\xi_{ik} = c_{ik}(x_{i}, t - \tau_{i}) + d_{ik}} - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(y_{i} - y_{j}), \ \forall i, j = 1, 2, \cdots, N,$$
(19)

其中: $\tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max}$, $a_{ij} = 1$. 在该控制策略作用下,风电机群中各机组能够在输入时滞下保持全局稳定,以及有功功率输出同步.

证 设
$$\mu_i = \mu_{i1} + \mu_{i2}$$
,可将其分为两部分
 $\mu_{i1} = -(t - \tau_i)G_{1i}^{\mathrm{T}}(x_i)\nabla H_{1i}(\xi_i)|_{\xi_{ik} = c_{ik}(x_i, t - \tau_i) + d_{ik}},$
 $\mu_{i2} = -\sum_{j=1}^{N} a_{ij}(y_i - y_j),$

其中: μ_{i1}的作用是在机组输入含有时滞的情况下, 保 持机组为PCH-D稳定结构; μ_{i2}的作用是调节多台机 组的输出, 实现多台机组在分布式网络结构中的同步 输出, 从而实现整个风电场的稳定运行.

将风电场中的每台机组通过反馈互连控制器μ_{i1} 与源系统(11)互连,得到扩展PCH-D系统为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{\xi}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_i(x_i) - R_i(x_i) & -G_i(x_i)(t - \tau_i)G_{1i}^{\mathrm{T}}(\xi_i) \\ G_{1i}(\xi_i)(t - \tau_i)G_i^{\mathrm{T}}(x_i) & J_{1i}(\xi_i) - R_{1i}(\xi_i) \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} \nabla H_i(x_i) \\ \nabla H_{1i}(\xi_i) \end{pmatrix} .$$

再将控制策略μ_{i2}代入风电机群的输入时滞PCH-D模型(18)得

$$\dot{x_i} = (J_i(x_i) - R_i(x_i)) \nabla H_{ai}(x_i, t - \tau_i) - G_i(x_i) \sum_{j=1}^N a_{ij}(y_i - y_j),$$

 $\oplus H_{ai}(x_i, t - \tau_i) = H_i(x_i) + H_{1i}(x_i, t - \tau_i).$

在**C**asimir函数 $\xi_{ik} - c_{ik}(x_i, t - \tau_i)$ 的表示下,可以 得到

$$H_{1i}(x_i, t - \tau_i) = H_{1i}(c_{i1}(x_i, t - \tau_i) + d_{i1}, \cdots, c_{in_1}(x_i, t - \tau_i) + d_{in_1}).$$

取整个系统的Lyapunov函数为

$$V(x,t) = 2 \sum_{i=1}^{N} H_{ai}(x_i, t - \tau_i),$$

对 Lyaponov 函数V(x,t)求导,并将控制策略 μ_i 代入V(x,t),可得

$$\begin{split} \dot{V}(x,t) = & 2\sum_{i=1}^{N} \nabla^{\mathrm{T}} H_{\mathrm{a}i}(x_{i},t-\tau_{i}) (J_{i}(x_{i})-R_{i}(x_{i})) \times \\ & \nabla H_{\mathrm{a}i}(x_{i},t-\tau_{i}) - 2\sum_{i=1}^{N} y_{i}^{\mathrm{T}} \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(y_{i}-y_{j}). \end{split}$$

将V(x,t)写成向量形式

$$\dot{\boldsymbol{V}} = -2\nabla^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{R}\nabla\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}} - 2\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{L}_{N}\otimes\boldsymbol{I}_{3})\boldsymbol{y} \leqslant 0,$$

其中: $L^N \in N$ 个机组系统的Laplacian矩阵, 输出 $\boldsymbol{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_N]^{\mathrm{T}}$. 考虑集合

$$\begin{split} \boldsymbol{S} &= \{ \boldsymbol{x} | \dot{\boldsymbol{V}} = 0 \} = \\ &\{ \boldsymbol{x} | \nabla^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H}_{\mathrm{a}} \boldsymbol{R} \nabla \boldsymbol{H}_{\mathrm{a}} = 0, (\boldsymbol{L}_{N} \otimes \boldsymbol{I}_{3}) \boldsymbol{y} = 0 \}. \end{split}$$

依据LaSalle不变集原理^[24], 当 $t \to \infty$ 时, 风电机 组稳定输出满足 $y_1 = y_2 = \cdots = y_N$, 当风电机组稳 定运行时, 可知 $P_{si} = P_{mi}$.

当系统保持稳定运行时,风电机组的有功功率输出等于其输入机械功率^[22].综上可知,通过利用Casimir函数方法设计相应的分布式时滞控制策略,能够确保风电机组在一定范围的输入时滞下相互协调,保 持整个闭环网络系统的稳定输出. 证毕. 综上分析,当海上风电机组的输入存在明显时滞时,通过引入Casimir函数方法互连反馈控制器保持系统在输入时滞下的稳定PCH-D结构,使得单机稳定运行;当一个海上风电场的风电机群都存在输入时滞时,对各机组进行网络化分布式时滞控制,使得各机组在输入时滞下相互协调,不仅消除了时滞的影响,同时保证了整个风电场的稳定运行,大大提高了风电场的稳定性和可靠性.

4 仿真验证

本文利用MATLAB 2014b软件进行仿真,验证在 输入时滞条件下控制策略的有效性.首先,研究双馈 风电机组单机输入带有时滞的情况,利用Casimir函数 方法稳定时滞机组系统的输出,通过与无时滞控制、 LMI时滞控制相比,验证了该控制方法在提高系统性 能方面的有效性和优越性;其次,针对含输入时滞的 双馈风电机群,将单机输入时滞控制扩展至含有多机 的风电机群,对风电机群系统进行网络化协调时滞控 制,使得整个风电场在输入时滞下仍能够保证输出同 步、稳定运行.本节将选取一组有效的双馈风力发电 机参数^[21]:

 $H_{\rm tot} = 6 \text{ s}, \ P_{\rm m} = 10 \text{ MW}, \ L_{\rm s} = 0.17 \text{ pu},$

 $L_{\rm r}=0.156\;{\rm pu},\;L_{\rm m}=0.4\;{\rm pu},\;R_{\rm s}=0.085\;{\rm pu},$

 $\omega_{\rm s} = 3.14 \; {\rm pu}, \; i_{\rm ds} = 1.8 \; {\rm pu}, \; i_{\rm qs} = 1.7 \, {\rm pu}, \;$

其中: $L_{\rm rr} = L_{\rm m} + L_{\rm r}, L_{\rm ss} = L_{\rm m} + L_{\rm s}.$

4.1 单机输入时滞控制设计

考虑双馈风力发电机群中一台机组,因其与其他 机组以及远处电力系统相连,则在控制输入反馈测量 信息时,不可避免的存在时滞 τ ,此处 τ 为 $\tau_{min} \leq \tau \leq$ τ_{max} 的一个随机常数,为方便分析,只考虑距离对 τ 值 大小的影响.在风电机组系统不失稳的情况下,对风 电机组系统进行时滞裕度测试,Casimir函数方法能够 有效处理的最小、最大时滞分别为 $\tau_{min} = 30$ ms, τ_{max} = 300 ms,而常用的LMI时滞控制在本文参数下能够 处理的时滞范围为38~275 ms.对比一般的时滞处理 方法,Casimir函数方法可以处理的时滞裕度更大,更 适合做大容量电力系统的时滞分析.本节风电机组受 到的时滞是在30~300 ms范围内的随机常数,如 图1所示.

将Casimir函数条件(14)的G₁(x)代入设计的控制器(16),得到

$$\mu(x, t - \tau) = -(t - \tau)G_1^{\mathrm{T}}(x)\nabla H_1(\xi)|_{\xi_k = c_k(x, t - \tau) + d_k} = \left(\frac{i_{\mathrm{qs}}L_{\mathrm{rr}}x_1\tau}{2H_{\mathrm{tot}}L_{\mathrm{m}}\omega_{\mathrm{s}}}\right) \left(\frac{i_{\mathrm{ds}}L_{\mathrm{rr}}x_1\tau}{2H_{\mathrm{tot}}L_{\mathrm{m}}\omega_{\mathrm{s}}}\right).$$
(20)





选取适当的初始值,风电单机仿真结果如图2-3所示,其中图2(a)--2(b)分别是单机系统输入含有时滞的输出响应曲线和有功功率输出曲线,图3(a)--3(b)分别 是利用Casimir函数方法和LMI方法控制后,系统的输出响应曲线和有功功率输出曲线.





Fig. 2(a) The output response of single wind turbine under time-delay



Fig. 2(b) The active power output of single wind turbine under time-delay

由图2可知,风电机组受到时滞时,系统的输出响 应和有功功率输出均呈现出大幅振荡的不稳定形式, 最大有功功率为 $P_{sMax} = 20.1$ MW, 1 s内功率变化 最大范围为 $\nabla P_{sMax} = 18.06$ MW, 说明机组稳定的 PCH-D形式受时滞影响而被破坏, 使系统不稳定运行.



图 3(a) 单机时滞控制输出响应

Fig. 3(a) The output response of single wind turbine under



图 3(b) 单机时滞控制有功功率输出 Fig. 3(b) The active power output of single wind turbine under time-delay control

由图3可知,机组的输出响应和有功功率曲线在短时间内有一定幅度的振荡,经过一段时间后,曲线的波动幅度减小,最后收敛稳定,整个系统在Casimir函数方法和LMI方法的作用下都可以实现稳定运行.风电机组系统在两种时滞控制方法下的性能参数见表1.

	表1	性能参	数
Table 1	Perfo	rmance	parameters

参数	Casimir	LMI	
$P_{\rm sMax}/{\rm MW}$	17.09	19.56	
$P_{\rm s}/{\rm MW}$	10.06	10.11	
σ	0.699	0.935	
$t_{\rm p}/{\rm s}$	2.01	4.05	
$t_{\rm s}/{\rm s}$	25.03	41.02	
$e_{\rm ss}$	0.05	0.11	

从表1比较可以看出,对比LMI方法,本文Casimir 函数方法控制下的风电机组,振荡幅度更小,收敛速 度更快,振荡次数更少,同时稳态误差更小.说明Casimir函数方法不仅可以有效地解决输入时滞问题,保 持单机系统的稳定,进一步提高了系统的稳定性能, 同时相比于LMI方法,Casimir函数方法在提高系统稳 定性和控制精度方面更具有优越性.

4.2 风电机群输入时滞控制设计

一个风电场内含有多台风电机组,多台风电机组 都会受到广域信号时滞的影响,从而对风电场采用分 布式时滞控制.为方便仿真和分析,在本节中,选取6 台双馈风力发电机组组成的风电机群,其系统单线连 接如图4所示.



图 4 风电场单线图 Fig. 4 The single line diagram of the wind farm

将图4的风电机组G1-G6看作节点,机组之间通过 通讯线路相互交换信息,6台机组构成的网络结构在 考虑通信方向后,可被简化为图5形式,其为含有有向 生成树的连通图.



Fig. 5 Network topology of offshore wind turbine group

各机组之间通过通讯网络连接,在运行过程中相 互交换参数和状态信息等.对于分布式时滞控制策略 式(19)中, µ_{i2}的作用是调节多台机组网络化的输出, 其为一类分布式协同控制策略.对于图5中无时滞影 响的6台风电机组,有向图5含有有向生成树结构,满 足分布式协同控制策略设计条件(8),对各机组采用分 布式协同控制,可以使得各机组相互协调,达到输出 收敛一致的稳定效果.所以对无时滞影响的风电机群 采用协同控制策略为

$$\mu_i = -\sum_{j=1}^N a_{ij}(y_i - y_j), \ \forall i, j = 1, 2, \cdots, N.$$
 (21)

若机组i能够接收到机组j的参数和状态信息,取 $a_{ij} = 1$,对于图5中各机组的连接方式和信息输出方 向,6台机组的分布式协同控制策略对应为

$$\begin{cases}
\mu_1 = y_2 - y_1, \\
\mu_2 = y_6 + y_3 - 2y_2, \\
\mu_3 = y_2 + y_4 - 2y_3, \\
\mu_4 = y_5 - y_4, \\
\mu_5 = y_4 - y_5, \\
\mu_6 = y_5 + y_1 - 2y_6.
\end{cases}$$
(22)

各机组在海上风电场中受到一定范围的随机时 滞 τ 的影响,且不同机组的输入时滞 $\tau_{min} \leq \tau_i \leq \tau_{max}$ 随机不同.利用Casimir函数方法,对风电机群内部每 台机组进行互连控制,再经过机组之间的分布式协同 控制策略对含有6台机组的风电机群加以控制,从第 3节定理2可知,对于带时滞风电机群的控制策略 μ_i 为 式(19),而 μ_{i1} 和 μ_{i2} 可由式(20)和式(22)得到,所以6个 机组的分布式控制策略分别为

$$\begin{cases} \mu_{1} = \mu_{11} + y_{2} - y_{1}, \\ \mu_{2} = \mu_{21} + y_{6} + y_{3} - 2y_{2}, \\ \mu_{3} = \mu_{31} + y_{2} + y_{4} - 2y_{3}, \\ \mu_{4} = \mu_{41} + y_{5} - y_{4}, \\ \mu_{5} = \mu_{51} + y_{4} - y_{5}, \\ \mu_{6} = \mu_{61} + y_{5} + y_{1} - 2y_{6}. \end{cases}$$

$$(23)$$

受时滞影响的风电机群系统的仿真结果如图6-7.



图 6(a) 风电机群时滞输出响应







Fig. 6(b) Wind turbine group active power output under time-delay





Fig. 7(a) Wind turbine group output response under time-delay control





图6(a)--6(b)分别是风电机群在含有输入时滞情况 下的输出响应曲线和有功功率输出曲线,图7(a)--7(b) 分别是双馈风电机群在Casimir时滞控制下的输出响 应曲线和有功功率输出曲线.表2是6个含时滞风电机 组采用分布式时滞控制(23)后的稳定参数.

表 2 风电机组参数 Table 2 Wind turbine parameters

参数	G1	G2	G3	G4	G5	G6
$P_{\rm sMax}/\rm{MW}$	10.76	10.89	11.13	14.15	14.04	11.66
$P_{\rm s}/{\rm MW}$	10.01	9.984	10.01	9.967	9.965	9.967
σ	0.0749	0.0907	0.112	0.42	0.409	0.17
$t_{\rm p}/{\rm s}$	0.87	1.97	0.84	1.6	1.7	1.67
$t_{\rm s}/{\rm s}$	5.58	6.72	8.05	9.1	9.6	9.09
$e_{\rm ss}$	0.01	0.016	0.01	0.033	0.035	0.33

由图6可知,整个风电机群在输入时滞的影响下, 每个机组的输出曲线都出现较大幅度的振荡,可知整 个机群系统处于非稳定状态,时滞严重影响了风电场 的正常运行. 由图7可知, 10 s内输出曲线和有功功率 曲线具有短时间的振荡,且振荡幅度是减小的,在 约10 s以后,输出曲线收敛至0,有功功率曲线收敛至 10 MW, 各机组输出和有功功率同步且保持稳定. 从 表格2看出,在6个机组中,有功功率振荡最大的为G4 号机 $P_{4sMax} = 14.15$ MW, 6台机组的调节时间普遍 都在10 s内,其中最快的是G1号机,其调节时间和超 调分别为 $t_s = 5.58 \text{ s}, \sigma_1 = 0.076, 6$ 台机组的稳态误 差都在0.04以内. 各机组通过引入Casimir函数方法设 计分布式时滞控制策略,一方面可以抑制时滞对系统 产生的振荡作用,另一方面,各机组可以通过分布式 控制相互协调,保证有功功率稳定且输出同步.风电 机群通过分布式时滞控制后,系统收敛速度更快,超 调和稳态误差更小,说明本文提出的分布式时滞控制 方法有效地提高了系统的稳定性和控制精度.

5 结论

本文针对海上风电机组在运行过程中,输入时滞 对机组稳定运行造成严重影响的情况,在Hamilton能 量方法的基础上,引入Casimir函数方法,对输入时滞 机组进行分布式时滞控制,保持机群系统的稳定.本 文的主要创新点体现在下面两个方面:第一,针对双 馈风电机组的输入存在范围为30~300 ms的随机时 滞,在PCH-D模型的基础上,引入Casimir函数方法, 设计互连反馈控制器,解决了系统因时滞产生的振荡 问题,该方法设计过程简单,条件保守性低,提高了系 统的响应速度、稳定性、控制精度等,具有良好的控制 效果和优越性.第二,针对具有多台风电机组的风电 机群系统,其内部机组输入受到不同的随机时滞影响, 将单机PCH-D模型扩展至机群的PCH-D模型,基 于Casimir方法,对输入时滞的风电机群系统设计分布 式时滞控制策略,大程度地降低了风电场的通信负担, 又提高了风电机群的可靠性和稳定性,对实际风电场 控制具有一定的指导意义.总之,本文方法在发电性 能、系统简化和成本效益等方面都是有利的.

参考文献:

- OWENS B N. The Wind Power Story: A Century of Innovation that Reshaped the Global Energy Landscape. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2019.
- [2] WU Q W, SUN Y Z. Modeling and Modern Control of Wind Power. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2018.
- [3] APOSTOLAKI-IOSIFIDOU E, MCCORMACK R, KEMPTON W, et al. Transmission design and analysis for large-scale offshore wind energy development. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2019, 6(1): 2332 – 7707.
- [4] YI X, SCUTARIU M, SMITH K. Optimisation of offshore wind farm inter-array collection system. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(11): 1990 – 1999.
- [5] HE Jinghan, WANG Zhenji, LUO Guomin, et al. Hierarchical distributed control of voltage and active power for VSC-MTDC. *Power System Technology*, 2018, 42(12): 3951 3959.
 (和敬涵, 王振吉, 罗国敏, 等. 适用于VSC-MTDC系统的电压功率 分层分布式控制策略. 电网技术, 2018, 42(12): 3951 3959.)
- [6] KONG X B, LIU X J, MA L, et al. Hierarchical distributed model predictive control of standalone wind/solar/battery power system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1570 – 1581.
- [7] XUE N, CHAKRABORTTY A. Control inversion: A clusteringbased method for distributed wide-area control of power systems. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2019, 6(3): 937 – 949.
- [8] WANG Bing, DOU Yu, WANG Honghua. Distributed cooperative control research of doubly fed wind turbine groups in offshore wind-farms. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5279 5287. (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. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5279 5287.)
- [9] PHADKE A G, BI T S. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(4): 619 – 629.
- [10] LIN Z Z, WEN F S, DING Y, et al. WAMS-based coherency detection for situational awareness in power systems with renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5410 – 5426.
- [11] CAI D S, HUANG Q, LI J, et al. Stabilization of time-delayed power system with combined frequency-domain IQC and time-domain dissipation inequality. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5531 – 5541.
- [12] LIU M Y, DASSIOS I, TZOUNAS G, et al. Stability analysis of power systems with inclusion of realistic-modeling WAMS delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 627 – 636.
- [13] MOHSEN D, ABOLFAZL J. Designing a wide area damping controller to coordinate FACTS devices in the presence of wind turbines with regard to time delay. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(13): 1523 – 1534.

- [14] YIN M H, LI W J, CHUNG C Y, et al. Inertia compensation scheme of WTS considering time delay for emulating large-inertia turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(4): 529 – 538.
- [15] MI Y, HAO X Z, LIU Y J, et al. Sliding mode load frequency control for multi-area time-delay power system with wind power integration. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(18): 4644 – 4653.
- [16] XUE L R, ZHANG T L, ZHANG W H, et al. Global adaptive stabilization and tracking control for high-order stochastic nonlinear systems with time-varying delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(9): 2928 – 2943.
- [17] KIAMINI S, JALILVAND A, MOBAYEN S. LMI-based robust control of floating tension-leg platforms with uncertainties and timedelays in offshore wind turbines via T–S fuzzy approach. *Ocean Engineering*, 2018, 154(15): 367 – 374.
- [18] MACCHELL A, GORREC Y L, RAMIREZ H, et al. On the synthesis of boundary control laws for distributed port-Hamiltonian systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 1700 – 1713.
- [19] WANG Yuzhen. General Hamilton Control System Theory—Implementation, Control and Application. Beijing: Science Press, 2007. (王玉振. 广义Hamilton控制系统理论、实现、控制与应用. 北京: 科 学出版社, 2007.)
- [20] WANG D X, GAO X D, MENG K, et al. Utilisation of kinetic energy from wind turbine for grid connections: A review paper. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(6): 615 – 624.
- [21] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Decentralized nonlinear control of wind turbine with doubly fed induction generator. *IEEE Transactions* on Power Systems, 2008, 23(2): 613 – 621.
- [22] WANG Bing, TIAN Min, WANG Honghua. Distributed complementary control of doubly-fed wind turbine group in offshore wind farm based on Hamiltonian energy theory. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(2): 58 66.
 (王冰,田敏,王宏华. 基于Hamilton能量理论的海上风电场双馈机 群分布式互补控制. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 58 66.)
- [23] MESBAHI M, EGERSTEDT M. Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks. New Jersey: Princeton University Press, 2010.
- [24] CELIK V, OZDEMIR M T, LEE K Y. Effects of fractional-order PI controller on delay margin in single-area delayed load frequency control systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(2): 380 – 389.
- [25] KHALIL H K. *Nonlinear Systems*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

作者简介:

唐 桢 硕士,研究方向为风力发电机系统及其控制, E-mail: 2932441894@qq.com;

王 冰 教授,硕士生导师,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;

刘维扬 硕士,研究方向为电动汽车的调度机制和区块链在能源 互联网中的应用, E-mail: 851805472@qq.com;

曹智杰硕士,研究方向为电梯运行维护检测、火灾自动报警系统及联动系统设计与施工, E-mail: 208865235@qq.com.