

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190892

基于 PDNN 的含风电互联电网负荷频率 Tube-RMPC 设计

张虹¹, 杨杨¹, 王迎丽¹, 袁琳¹, 姜德龙²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着新能源大规模接入电网, 为应对新能源随机性和波动性给互联系统负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)带来的不确定问题, 实现新能源电力系统多约束条件下的优化运行, 建立了含风电机组的 LFC 多胞模型, 以减少模型参数不确定对控制系统的影响。设计了基于原对偶神经网络(Primal-Dual Neural Network, PDNN)的 Tube 鲁棒模型预测控制(Tube-Robust Model Predictive Control, Tube-RMPC)策略。将标称模型预测控制器与辅助反馈控制器结合, 通过 PDNN 实时求解标称模型预测控制器以保证为 LFC 系统产生最优状态轨迹。设计辅助反馈控制器抵消外部干扰, 使实际系统的状态维持在以标称轨迹为中心的 Tube 内。最后, 对含风电的三区域负荷频率控制系统进行仿真研究, 结果表明所提出的 Tube-RMPC 控制策略, 不仅能够有效提高控制精度, 还能增强系统鲁棒性, 提高实时优化效率。

关键词: 风电不确定性; 负荷频率控制; Tube 鲁棒模型预测控制; 原对偶神经网络

Tube robust model predictive control of load frequency for an interconnected power system with wind power based on PDNN

ZHANG Hong¹, YANG Yang¹, WANG Yingli¹, YUAN Lin¹, JIANG Delong²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132012, China)

Abstract: With the large-scale access of new energy to the power grid, in order to effectively solve the uncertainty of load frequency control caused by the energy's randomness and fluctuation, and to realize the optimal operation of the Load Frequency Control (LFC) system with multiple constraints, an LFC polytopical model with wind turbines is established to reduce the influence of model parameter uncertainty on the control system. The Tube-Robust Model Predictive Control (Tube-RMPC) strategy based on the Primal-Dual Neural Network (PDNN) is designed. Combining a nominal model predictive controller with an auxiliary feedback controller, the nominal model predictive controller is solved by PDNN in real time to ensure an optimal state trajectory for the LFC system. The auxiliary feedback controller is designed to counteract external disturbances so as to control the state of the actual system to be maintained in the tube with the nominal trajectory as the center. Finally, the simulation results of a three-area system with wind power shows that the proposed Tube-RMPC control strategy can not only effectively improve control accuracy, but also enhance the robustness of the system and improve the efficiency of real-time optimization.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777027) and Key Research and Development of Technology Plan of Jilin Province (No. 20180201010GX).

Key words: wind power uncertainty; load frequency control (LFC); Tube robust model predictive control (Tube-RMPC); primal-dual neural network

0 引言

为应对化石能源短缺及环境污染问题, 风电作

为发展最快的清洁能源^[1-2], 已对部分传统水火电机组完成能源替代。随着风电大规模接入电网, 风能的波动性造成系统功率供需不平衡, 系统频率出现偏差, 增加了新能源负荷频率控制的难度^[3], 对传统电力系统的安全稳定运行提出了挑战^[4]。因此, 保证风电机组并入电网后电力系统的频率稳定性,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777027); 吉林省科技计划重点研发项目资助(20180201010GX)

已成为电网负荷频率控制研究的一个重要课题。

在系统建模方面,文献[5-6]将风电有功输出作为随机扰动进行处理,以风电功率代替具体风电机组。风电功率预测方法带来的系统误差会对风电系统频率控制造成影响,因此有必要结合风机的动态模型对 LFC 系统进行研究。最近,国内外学者在双馈感应发电机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)基础上进行了研究,解决了传统 DFIG 的解耦控制不具备频率响应能力的问题,并提出许多不同的控制方法,如虚拟惯性控制^[7]、桨距角控制^[8-9]以及组合控制^[10],使风电参与频率控制成为可能,为风电机组参与 LFC 提供了依据。文献[11-12]提出了一种新的风电场频率控制模型,以提高风电场高渗透率情况下的惯性和阻尼,利用粒子群算法基于多目标函数对 PID 控制器参数进行优化。文献[13]针对负荷频率控制器参数优化整定问题,采用一种基于灰狼优化算法的参数整定设计方案,但不同智能优化算法不能在通用参数和算法优化效率等方面给出满意的求解方案。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)作为先进控制方法中的优秀代表,建模简单易实现,鲁棒性良好^[14],近年来已成功应用于含风力发电机组多区域电力系统的 LFC 设计中。文献[6]提出的分散预测控制,忽略了子系统之间的相互作用。为了获得更好的系统性能,需在不同子系统之间建立一定的通信,实现多区域互联系统的分布式控制。文献[15-16]提出了分布式模型预测(Distributed Model Predictive Control, DMPC)方法,将分散控制的优势保留,每个分布式控制器通过通信交换其测量值和预测值,通过协调算法提高了系统性能和稳定性。文献[17]提出了结合拉盖尔函数的 DMPC 方法,形成了频率超前控制的滚动优化机制。DMPC 在保证整个 LFC 系统稳定性的同时,还需关注实际系统的参数变化、建模偏差导致的不确定性问题,虽然滚动优化方式使 MPC 具有一定的鲁棒性,但系统存在的不确定性使控制性能难以保证。此外,对于互联电网 LFC 系统这种多约束多变量复杂控制过程的设计,滚动优化的计算方法存在耗时严重的问题,实时性较差,应加强其与人工智能方法的结合,提高实时优化效率。

综上所述,含风电多区域电力系统 LFC 方法应具有鲁棒性及适应不确定性的能力。本文建立了包含 DFIG 的 LFC 多胞模型处理模型的不确定性,提出了一种基于 PDNN 动态优化的 Tube-RMPC 策略,将标称 MPC 和辅助反馈控制器结合,通过 PDNN 实时求解标称 MPC 优化问题。最后对三区域风电

互联系统进行仿真研究,验证所提 Tube-RMPC 的正确性和有效性。

1 含风电互联电网负荷频率多胞模型

1.1 含风电互联电网 LFC 系统线性模型

多区域互联电力系统是由多个控制区域通过联络线连接而成的复杂系统,其中第 i 个区域的线性模型如图 1 所示。

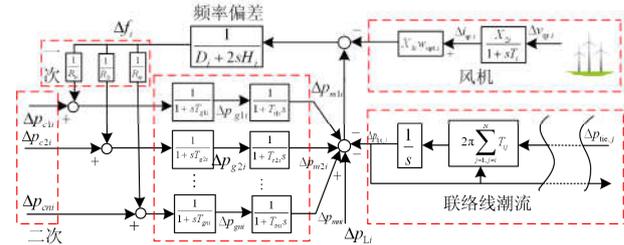


图 1 含风电的互联电网 LFC 框图

Fig. 1 LFC block diagram of interconnected power system considering wind power

第 i 个区域的动态方程表达式如下。

调速器动态方程为

$$\Delta \dot{P}_{gi} = -\frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} + \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{ci} \quad (1)$$

汽轮机动态方程为

$$\Delta \dot{P}_{mi} = \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{mi} \quad (2)$$

频率偏差表示为

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{D_i}{2H_i} \Delta f_i - \frac{1}{2H_i} \Delta P_{tie,i} + \frac{1}{2H_i} \Delta P_{mi} - \frac{1}{2H_i} \Delta P_{Li} - \frac{X_{3i} W_{opt,i}}{2H_i} \Delta i_{qr,i} \quad (3)$$

联络线功率偏差表示为

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^M T_{ij} \Delta f_i - 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^M T_{ij} \Delta f_j \quad (4)$$

风力发电机动态方程为

$$\Delta \dot{i}_{qr,i} = -\frac{1}{T_i} \Delta i_{qr,i} + \frac{X_{2i}}{T_i} \Delta v_{qr,i} \quad (5)$$

为了将频率偏差及区域间的联络线交换功率维持在计划值^[18],采用由频率和联络线交换功率合成的信号,称之为区域控制偏差(Area Control Error, ACE)^[19],作为负荷频率的控制信号。控制区域 i 的 ACE_i 可以表示为

$$ACE_i = K_{Bi} \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (6)$$

式中, K_{Bi} 为频偏因子。

联立以上各式,区域 i 的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M A_{ij} x_j(t) + F_i d_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_i = [\Delta P_g \ \Delta P_{mi} \ \Delta f_i \ \Delta P_{tie,i} \ \Delta i_{qr,i} \ \Delta w_i]^T$ 为状态向量; $d_i(t) = [\Delta P_{Li} \ \Delta v_m]^T$ 为干扰向量; ΔP_{Li} 为区域 i 的负荷增量变化; Δv_m 为风速; $u_i = [\Delta P_{ci} \ \Delta V_{qr}]^T$ 为控制输入, 且

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{R_i T_{gi}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{ii}} & -\frac{1}{T_{ii}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_i} & -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{1}{2H_i} & -\frac{X_{3i} w_{opt,i}}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^M T_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{X_3}{2H_i} & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{2H_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$C_i = [0 \ 0 \ K_{Bi} \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{gi}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{X_{2i}}{T_i} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.2 含风电互联电网 LFC 系统多胞模型

LFC 系统线性模型描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \\ y(k) = Cx(t) \end{cases} \quad (8)$$

定义: $x(t) = (x_1(t), x_M(t))^T$, $u(t) = (u_1(t), \dots, u_M(t))^T$, $F = \text{block diag}(F_1(t), \dots, F_M(t))$, $y(t) = (y_1(t), \dots, y_M(t))^T$, $f(t) = (d_1(t), \dots, dM(t))^T$, $B = \text{block diag}(B_1, \dots, B_M)$,

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_{12} & \dots & A_{1M} \\ A_{21} & A_2 & \dots & A_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1} & A_{M2} & \dots & A_M \end{bmatrix}, \quad C = \text{block diag}(C_1, \dots, C_M).$$

由于系统(8)的参数可变, 所以状态方程系数矩阵 A 、 B 具有不确定性, 可用凸多胞体约束来表示, 由于鲁棒模型预测控制算法优化时采用的是状态方程系数矩阵, 为适应状态变量的变化对系统控制造成的影响, 采用便于优化运算的状态空间多胞体形式描述系统模型不确定性, 真实反映模型不确定的影响。被控对象工作在多个多胞顶点, 并且每个顶点处可以看作是一个线性参变模型。

多胞不确定线性系统的状态空间表达式为

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) + F(k)f(k) \quad (9)$$

输入和状态约束满足:

$$x(k) \in X, u(k) \in U \quad (10)$$

式中, X 和 U 分别为标称状态和输入约束。

矩阵 $[A(k), B(k), F(k)]$ 属于一个多面体集合 Ω , 且 $\Omega = \text{Co}\{[A_1, B_1, F_1], [A_2, B_2, F_2], \dots, [A_l, B_l, F_l]\}$, 在任意时刻 k , 矩阵 $[A(k), B(k), F(k)]$ 可以由多面体集合的顶点加权表示, 如式(11)所示。

$$[A(k), B(k), F(k)] = \sum_{l=1}^{\lambda} \beta_l(k) [A^{(l)}, B^{(l)}, F^{(l)}]$$

$$\sum_{l=1}^{\lambda} \beta_l(k) = 1, 0 \leq \beta_l(k) \leq 1 \quad (11)$$

式中: $[A^{(l)}, B^{(l)}, F^{(l)}]$ 表示第 l 个线性模型; λ 表示不确定性线性模型的个数。

2 基于 Tube 的鲁棒模型预测控制器设计

基于 Tube 的 RMPC 是一种双层控制策略, 把对实际系统的控制转化为对标称系统的控制, 将鲁棒 Tube 思想融入控制器设计中, 与鲁棒预测控制相结合, 保证系统的闭环稳定性。设计目的是对于实际不确定系统, 在满足输入约束的条件下, 设计辅助状态反馈控制律, 使得带扰动系统的轨迹始终处于以标称轨迹为中心的 Tube 内。Tube 的存在保证了实际系统对约束的满足, 提高系统鲁棒性。控制结构如图 2 所示, 外环标称模型预测控制器为 LFC 系统提供最优状态轨迹; 内环是局部鲁棒反馈控制器, 补偿实际状态与标称状态之间的偏差, 抵消幅值较大的外部干扰, 维持系统频率偏差及区域间联络线交换功率在较小的范围内变化, 实现 LFC 系统的快速稳定控制。

2.1 Tube 不变集

Tube-RMPC 的控制思想是通过设计控制律, 将实际不确定系统的状态轨迹保持在以标称轨迹为中心的“Tube”管内, Tube 管由一系列集合构成, 其管道宽度就是 Tube 不变集的大小, 下面给出不变集的定义。

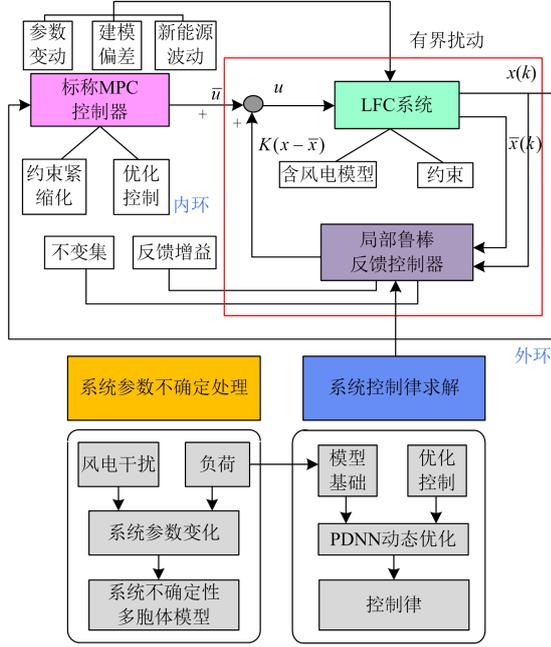


图2 含风电的互联电网负荷频率鲁棒控制框架

Fig. 2 Robust control framework for load frequency of interconnected power grids with wind power

定义 1^[20]: 假设实际不确定系统为 $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + \omega(k)$, 对应的标称系统为 $\bar{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + B\bar{u}(k)$, 如果 k 时刻实际系统的状态 $x(k) \in \bar{x}(k) \oplus S$, 则采用控制输入 $u = K(x - \bar{x}) + \bar{u}$, 可保证对 $\forall \omega(k) \in \Psi$, 都有 $x(k+1) \in \bar{x}(k+1) \oplus S$ 成立, 则 S 称为不确定系统的 Tube 不变集。

由定义 1 可以看出, 控制律由两部分构成, \bar{u} 为针对标称系统设计的控制律, 驱动标称状态趋于平衡点, K 为辅助反馈控制律, 以控制序列 u 来引导不确定系统状态处于以标称轨迹为中心的 Tube 不变集 S 内, 且 S 的中心点即为系统的平衡点。为了保证系统的控制性能, S 必须要尽量小, 选取最小鲁棒正不变集作为不变集 S 。根据文献[21], 最小鲁棒正不变集表达式为

$$S = \sum_{i=0}^{\infty} (A + BK)^i \Psi = \Psi \oplus (A + BK)\Psi \oplus (A + BK)^2 \Psi \oplus \dots \oplus (A + BK)^3 \Psi \oplus \dots \quad (12)$$

2.2 标称模型预测控制器设计

式(10)对应的不受外部干扰的标称系统为

$$\bar{x}(k+1) = A(k)\bar{x}(k) + B(k)\bar{u}(k) \quad (13)$$

式中: $\bar{u}(k) \in R^m$; $\bar{x}(k) \in R^n$ 分别为标称控制输入和状态变量。在每一个采样时刻 k , 标称 MPC 为未来预测的状态和输入产生一个没有外部干扰的可行轨迹。在多胞模型的基础上, 将 MPC 优化问题转化

为二次规划(Quadratic Programming, QP)问题进行求解。

预测量定义为

$$\begin{aligned} \tilde{\bar{x}}(k) &= [\bar{x}(k+1|k), \dots, \bar{x}(k+N|k)]^T \\ \tilde{\bar{u}}(k) &= [\bar{u}(k), \bar{u}(k+1|k), \dots, \bar{u}(k+N_u-1|k)]^T \\ \Delta \tilde{\bar{u}}(k) &= [\Delta \bar{u}(k), \dots, \Delta \bar{u}(k+N_u-1|k)]^T \end{aligned} \quad (14)$$

将预测状态定义为

$$\tilde{\bar{x}}(k) = L\bar{x}(k) + V\bar{u}(k-1) + D\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \quad (15)$$

式中:

$$L = \begin{bmatrix} A(k) \\ A(k+1)A(k) \\ \vdots \\ \prod_{i=k}^{i=k+N-1} A(i) \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} B(k) \\ B(k+1) + A(k+1)B(k) \\ \vdots \\ B(k+N-1) + \dots + \prod_{i=k+1}^{i=k+N-1} A(i)B(k) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} B(k) & \dots \\ A(k+1)B(k) & \dots \\ \dots & \dots \\ B(k+N-1) + \dots + \prod_{i=k+1}^{i=k+N-1} A(i)B(k) & \dots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ B(k+N-1) + \dots + \prod_{i=k+N_u+1}^{i=k+N-1} A(i)B(k+N_u) \end{bmatrix}$$

预测时域内预测终端状态描述为

$$\bar{x}(k+N|k) = \bar{L}\bar{x}(k) + \bar{V}\bar{u}(k-1) + \bar{D}\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \quad (16)$$

式中: \bar{L} 、 \bar{V} 、 \bar{D} 分别为 L 、 V 、 D 的最后一列,

MPC 优化问题可以描述为

$$\begin{aligned} \min & \left\| L\bar{x}(k) + V\bar{u}(k-1) + D\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \right\|_Q^2 + \\ & \left\| \Delta \tilde{\bar{u}}(k) \right\|_R^2 + \left\| \bar{x}(k+N) \right\|_P^2 \\ \text{s.t.} & \Delta \tilde{\bar{u}}_{\min} \leq \Delta \tilde{\bar{u}}(k) \leq \Delta \tilde{\bar{u}}_{\max} \\ & \bar{u}(k-1) + I\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \in \bar{U} \\ & L\bar{x}(k) + V\bar{u}(k-1) + D\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \in \bar{X} \\ & \bar{L}\bar{x}(k) + \bar{V}\bar{u}(k-1) + \bar{D}\Delta \tilde{\bar{u}}(k) \in \bar{X}_f \\ & \bar{X}_f = \{ \bar{x}(k+N) | \bar{x}(k+N)^T P\bar{x}(k+N) \leq \sigma \} \end{aligned} \quad (17)$$

$$P_\phi(\varepsilon_i) = \begin{cases} \varepsilon_i^-, & \varepsilon_i < \varepsilon_i^- \\ \varepsilon_i, & \varepsilon_i^- \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_i^+ \\ \varepsilon_i^+, & \varepsilon_i > \varepsilon_i^+ \end{cases}$$

PDNN 动态方程表示为

$$\dot{\varepsilon}_1 = \gamma_1(I + J_1^T)\{P_\phi(\varepsilon_1 - (J_1\varepsilon_1 + p_1)) - \varepsilon_1\} \quad (33)$$

式中, γ 为调节神经网络收敛速度的正设计参数。

3.3 PDNN2 求解反馈增益

为实时计算反馈增益, 一种有效的方法是使用神经网络进行鲁棒极点配置^[24]。根据矢量化技术和 Kronecker 积, 可以将方程 $AZ - ZA + BG = 0$ 重写为

$$Hz = 0 \quad (34)$$

式中: $z = [z_1^T, z_2^T, \dots, z_n^T, g_1^T, \dots, g_m^T]^T$, 且 z_i, g_i 分别为 Z, G 的第 i 列, H 为与 A, B, A 组成的相关矩阵。式(26)可以写成标准形式

$$\min \kappa^2(Z) = \frac{1}{2} \kappa^T(Z)W\kappa(Z) \quad (35)$$

$$\text{s.t. } Hz = 0 \quad (36)$$

式中: W 为权重矩阵; $Z^T Z$ 是对称且正定的。对于式(36)中的约束, 相应的对偶决策向量被定义为 δ , 原对偶决策向量 $\varepsilon_2 = [\kappa(Z) \delta]^T$ 。神经网络动态方程表示为

$$\dot{\varepsilon}_2 = \gamma_2(I + J_2^T)\{P_\phi(\varepsilon_2 - (J_2\varepsilon_2 + p_2)) - \varepsilon_2\} \quad (37)$$

式中: $J_2 = \begin{bmatrix} W & -H^T \\ H & 0 \end{bmatrix}$ 为系数矩阵; 且向量 $p_2 = 0$;

γ_2 为正设计参数。基于 PDNN 的含风电互联电网 LFC 系统的 Tube-RMPC 结构框图如图 4 所示。

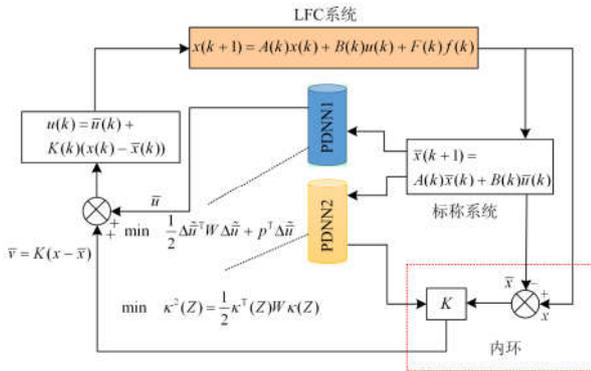


图 4 基于 PDNN 的 Tube-RMPC 结构框图

Fig. 4 Block diagram of Tube-RMPC based on PDNN

4 算例验证

4.1 仿真参数

为验证 Tube-RMPC 方法在含风电负荷频率控制中的有效性, 本文进行了三区域互联电网 LFC 的

仿真研究, 示意图如图 5 所示。每两个区域通过一根联络线传输功率, 所有子系统都包含时变参数, 变化边界列于表 1。

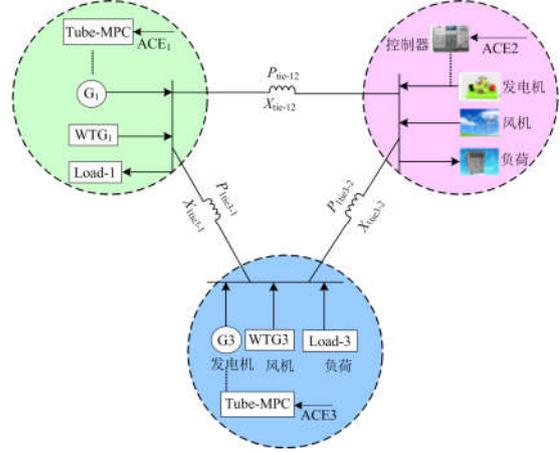


图 5 三区域互联电网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the three-area interconnection power system

表 1 三区域系统参数

Table 1 Parameters of three-area power system

区域	R_i	T_{gi}	T_n	$2H_i$	D_i	T_y
1	3.00~	0.08~	0.40~	0.1667~	0.015~	$\begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.25 \\ 0.20 & 0 & 0.15 \\ 0.25 & 0.15 & 0 \end{bmatrix}$
	3.20	0.09	0.45	0.1720	0.017	
2	2.73~	0.06~	0.44~	0.2017~	0.016~	
	3.0	0.065	0.49	0.2151	0.018	
3	2.82~	0.07~	0.30~	0.1247~	0.015~	
	3.02	0.08	0.35	0.1530	0.016	

采用文献[16]中 DFIG 详细结构模型, 参数如表 2 所示。

表 2 风机参数

Table 2 Parameters of the wind generator

变量	取值范围	变量	取值范围
w_{si}	1.17~1.20	R_{ri}	0.00552~0.00570
R_{si}	0.00491~0.00520	$L_{rs,i}$	0.10~0.13
L_{si}	0.09273~0.0940	L_{mi}	3.9654~4.120

从表 1 和表 2 可以看出, 每区域含风电电力系统都有两个多面体类型的顶点, 当系统参数采用上边界和下边界时, 获得的系统矩阵分别为 $A^{(1)}$ 、 $B^{(1)}$ 、 $F^{(1)}$ 和 $A^{(2)}$ 、 $B^{(2)}$ 、 $F^{(2)}$, 式(7)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \sum_{k=1}^2 \alpha_k A^{(k)} x(t) + \sum_{k=1}^2 \alpha_k B^{(k)} u(t) + \sum_{k=1}^2 \alpha_k F^{(k)} f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

其中, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 且 $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ 。由于不确定性变量是不可预测的, α_1 在 $(0, 1)$ 内取随机值。

参数设置如下: 预测时域 $N=10$, 控制时域 $N_u=$

2. 约束满足如下: GRC 取值为每分钟 10% p.u., $\Delta P_g \leq \alpha = 0.0017$ p.u., 调速器死区的最大值规定为 0.05%, 频率偏差 $\Delta f_{\max} = 0.25$ p.u., $\Delta f_{\min} = -0.25$ p.u.。采样周期 $T = 0.1$ s, 正设计参数 $\gamma = 10^5$, $\bar{u}_{\min} = -\bar{u}_{\max} = [-0.3 \ 0.3]^T$, $\Delta \bar{u}_{\min} = -\Delta \bar{u}_{\max} = [-0.1, 0.1]^T$ 。

4.2 仿真分析

1) 工况 1: 瞬时负荷干扰

将瞬时负荷加于区域 2, 区域 1 和区域 3 负荷增量为零。瞬时负荷变化曲线如图 6 所示, 在瞬时负荷变化下, 频率偏差的动态响应如图 7 所示。可以看出, PID 控制下频率偏差波动的剧烈程度较大, 而本文方法使响应曲线快速衰减, 收敛于平衡点附近。区域 2 的频率偏差性能指标, 如响应时间 t_s 、峰值超调 f_p 、频偏下降值 f_n 等的对比结果如表 3 所示。虽然系统参数和瞬时负荷在变化, 但所设计的控制器显著改善了三区域频率响应的动态性能, 使频率偏差始终维持在 ± 0.05 Hz 范围内, Tube-RMPC 方法的各项性能指标最小。由此看来, 所设计的控制器具有适应瞬时负荷变化的能力。

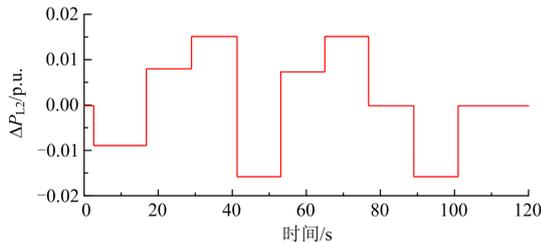


图 6 瞬时负荷变化曲线图

Fig. 6 Curve diagram of the change of instantaneous load

表 3 区域 2 频率偏差性能比较

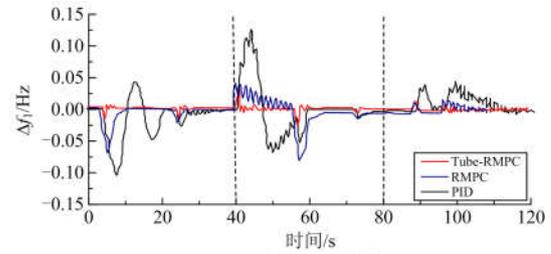
Table 3 Comparison frequency division performance indexes for area 2

	t_s			f_p			f_n		
	PID	RMPC	Tube-RMPC	PID	RMPC	Tube-RMPC	PID	RMPC	Tube-RMPC
时段 1	35.2	31.2	27.1	0.04	0.01	0.007	-0.08	-0.047	-0.05
时段 2	77.6	74.3	65.1	0.09	0.05	0.04	-0.12	-0.097	-0.066
时段 3	113.2	109.4	103.6	0.04	0.025	0.016	-0.018	-0.008	-0.002

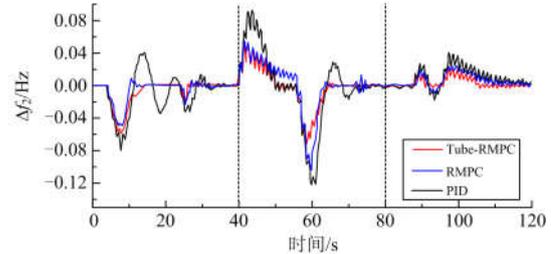
2) 工况 2: 三区域风电随机干扰

为验证本文方法处理外部干扰的有效性, 将风电机组参与到负荷频率控制中, 图 8 展示了可变风速模式。

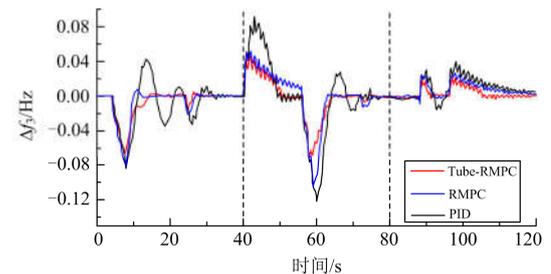
频率偏差的动态响应如图 9 所示, 即使在风速干扰持续作用下, Tube-RMPC 方法有效跟踪风速波动的随机变化。将三区域分为不同的时段, 以便清晰地体现本文方法应对外部干扰的能力。不同时段的性能指标值如图 10 所示, 以区域 1 为例, 相对于



(a) 区域 1 频率偏差



(b) 区域 2 频率偏差



(c) 区域 3 频率偏差

图 7 瞬时负荷作用下三区域频率偏差

Fig. 7 Three-area frequency deviation when considering instantaneous load

PID 而言, 时段 1 t_s 、 f_p 、 f_n 分别减少了 41.2%、63.6%、61.1%。可以看出, 三个区域的三个时段内, 本文提出算法的各项性能指标值显著减少, 将频率偏差维持在较小的范围内, 在系统扰动发生时, 控制器快速地执行控制动作, 有效抑制外部干扰的影响。

图 11 显示了区域 1 的控制输入, 由于有界外部扰动和参数变动的持续作用, 使得实际控制输入不是一个固定常值, 具有 Tube 的 LFC 系统可以自适应地近似系统不确定性的边界, 使得控制输入的曲

线更平稳, 维持在一定范围内。

为了验证 Tube-RMPC 的鲁棒性, 下面给出关于区域 1 频率偏差 x_{13} 和联络线功率偏差 x_{14} 两个状

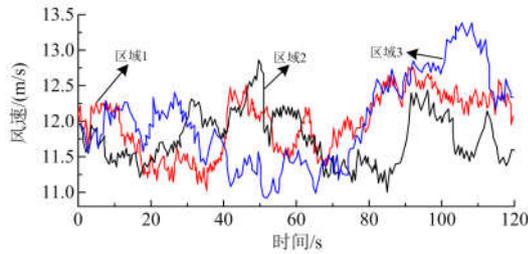
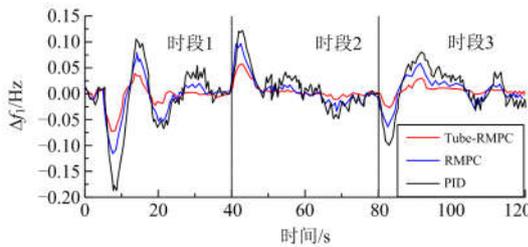
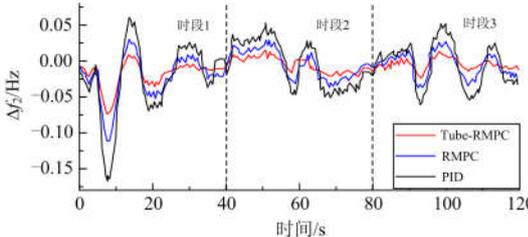


图 8 风速模式曲线图

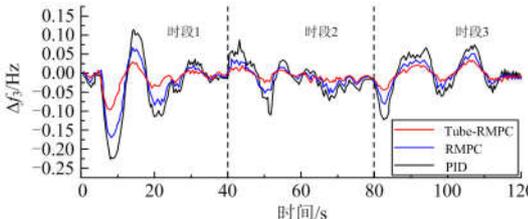
Fig. 8 Curve of wind speed variations



(a) 区域1频率偏差



(b) 区域2频率偏差



(c) 区域3频率偏差

图 9 风电随机干扰发生时的频率偏差响应曲线

Fig. 9 Dynamic frequency deviation responses for wind power random disturbance

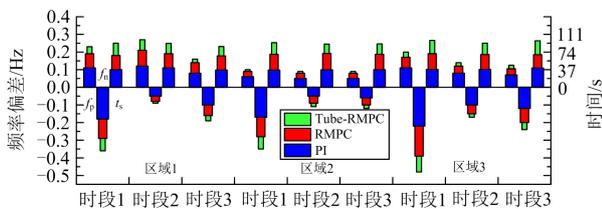
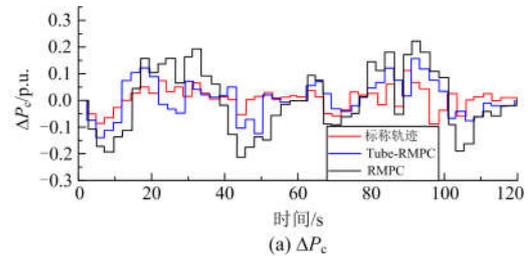
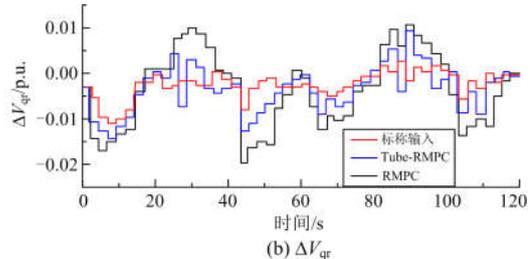


图 10 性能指标比较图

Fig. 10 Comparison of performance index



(a) ΔP_c



(b) ΔV_{qr}

图 11 区域 1 控制输入曲线

Fig. 11 Control inputs curve of the area 1

态量的不变集, 图 12 展示了 Tube S_i 的大小演变。可以看出, 随着预测时域的增加, Tube 的大小不断变大, 但最后几乎恒定, 不会超过 S_3 。另外, Tube 系统状态轨迹如图 13 所示。从图中可以看出, 带有界扰动的不确定系统的状态轨迹始终保持在 Tube S_3 内, Tube 的中心为标称系统的预测状态轨迹, 更新的控制律可以使 LFC 系统具有渐进稳定性。

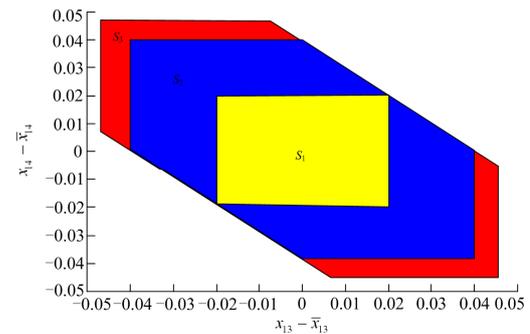


图 12 Tube S 大小演变示意图

Fig. 12 Evolution of the size of Tube S

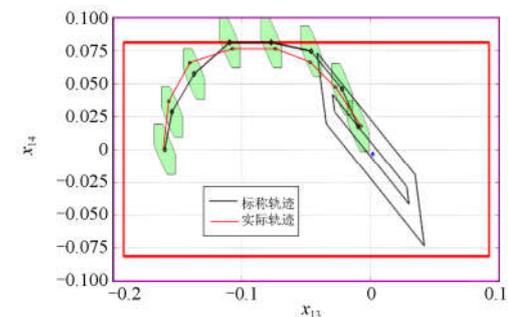


图 13 系统状态轨迹图

Fig. 13 State trajectories of the system

优化求解的计算复杂度及计算时间是值得关注的问题。当采用 SQP 时, 需要重复计算 Hessian 矩阵来求解二次规划, 计算时需要执行 $O(N^4+N+(6N_u+6N)\times N_u^2+(7N_u+6N)^3)$ 次, 而本文 PDNN 方法执行 $O(7(6N_u+6N)+2(6N_u+6N)^2)$ 步操作, 从计算复杂度来看, 所提出的 PDNN 方法可以降低计算成本。在硬件配置为 Intel pentium E5700@3.00 GHz, 2 GB 内存的个人计算机环境下, 两种工况下的计算时间如图所 14 所示。在工况 2 时, 传统 SQP 方法的计算时间为 0.5 s, 而 PDNN 方法仅为 0.031 s, 与采样时间 0.1 s 相比更小, 因此可以看出 PDNN 方法可以在线实时地进行优化求解。

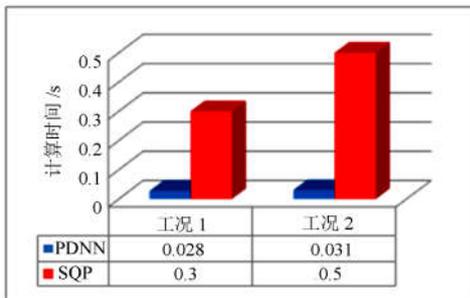


图 14 计算时间对比图

Fig. 14 Comparison chart of calculation time

5 结语

本文针对风电介入互联电网 LFC 面临的不确定性问题, 建立了包含 DFIG 的 LFC 多胞模型, 并进行了基于 Tube 的鲁棒模型预测控制器设计, 不同工况下的仿真结果表明:

1) 建立的多胞模型相比于只存在一个标量不确定性的模型而言, 能够真实地反映风电介入系统后模型参数的不确定性, 避免了根据单一运行点整定的 LFC 控制器性能下降的问题。

2) 将 Tube 的思想融于控制器的设计中, 所设计的反馈控制律能够有效地抑制风电等外部干扰, 使系统状态约束在 Tube 内, 从而实现了 LFC 系统在满足输入约束条件下的快速稳定运行。

3) 通过 PDNN 求解标称 MPC 优化问题, 避免了高阶非线性项的处理, 提高了实时优化效率。

本文提出的算法保证控制系统在模型参数不确定性和外部干扰的影响下, 仍能满足约束条件并有效提高控制精度, 在保证系统稳定性的同时, 解决了实时优化控制问题。但本文没有讨论开放式通信网络下时滞对 LFC 系统的影响, 这将是今后需要进一步开展的研究工作。

参考文献

[1] 刘立阳, 吴军基, 孟绍良. 基于预测控制的含风电滚动

优化调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 75-83.

LIU Liyang, WU Junji, MENG Shaoliang. A rolling dispatch model for wind power integrated power system based on predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 75-83.

[2] 张虹, 刘旭, 张思雨, 等. VSC-HVDC 变量软约束期望区间跟踪的 EMPC 设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 182-189.

ZHANG Hong, LIU Xu, ZHANG Siyu, et al. Design for explicit model predictive control based on expected interval tracking and variable soft constraint of VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 182-189.

[3] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.

[4] ZIPING W U, GAO W, GAO T, et al. State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2018, 6(1): 1-16.

[5] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1-7.

ZHOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load frequency control of power systems with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1-7.

[6] 杨德友, 蔡国伟. 含规模化风电场/群的互联电网负荷频率广域分散预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 583-591.

YANG Deyou, CAI Guowei. Decentralized model predictive control based load frequency control for high wind power penetrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 583-591.

[7] 肖固城, 唐飞, 廖清芬, 等. 一种可改善失步振荡模式的风电虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 61-70.

XIAO Gucheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. A virtual inertia control strategy of wind power to improve the out-of-step oscillation modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 61-70.

[8] WILCHESBERNAL F, CHOW J H, SANCHEZGAS CA J J. A fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1496-150.

[9] 严干贵, 赵伟哲, 张礼珏. 变速变桨距风电机组减载调频综合控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(5): 1-8.

- YAN Gangui, ZHAO Weizhe, ZHANG Lijue. Research on integrated control of deloading frequency regulation for variable speed and variable pitch angle wind turbines[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(5): 1-8.
- [10] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-3822.
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3815-3822.
- [11] GHOLAMREZAIE V, DOZEIN M G, MONSEF H, et al. An optimal frequency control method through a dynamic load frequency control (LFC) model incorporating wind farm[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 392-401.
- [12] 张俊武, 王德林, 陈斌, 等. 基于 PSO-GSA 算法的含 DFIG 互联系统 AGC 优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 48-54.
ZHANG Junwu, WANG Delin, CHEN Bin, et al. Research on PSO-GSA algorithm optimization for interconnected AGC system including DFIG wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 48-54.
- [13] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联电网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.
ZUO Jian, XIE Pingping, LI Yinhong, et al. Intelligent optimization algorithm based load frequency controller design and its control performance assessment in interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.
- [14] 薛花, 邓兴成, 王艳青, 等. 基于优化控制集模块化多电平变换器模型预测控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 9-18.
XU Hua, DENG Xingcheng, WANG Yanqing, et al. Optimized control set based model predictive control strategy for modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 9-18.
- [15] ZHANG Yi, LIU Xiangjie, QU Bin. Distributed model predictive load frequency control of multi-area power system with DFIGs[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 125-135.
- [16] MA Miaomiao, LIU Xiangjie, ZHANG Chunyu. LFC for multi-area interconnected power system concerning wind turbines based on DMPC[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2689-2696.
- [17] 孙铂皓, 汤涌, 仲悟之, 等. 基于分布式模型预测控制的包含大规模风电集群互联系统超前频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6291-6302.
- SUN Bohao, TANG Yong, ZHONG Wuzhi, et al. Multi-area interconnected power system advanced frequency control strategy considering large scale wind power cluster integration based on DMPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6291-6302.
- [18] LIU S, LIU P X, SADDIK A E. Modeling and stability analysis of automatic generation control over cognitive radio networks in smart grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(2): 223-234.
- [19] QIAN D, TONG S, LIU H, et al. Load frequency control by neural-network-based integral sliding mode for nonlinear power systems with wind turbines[J]. Neurocomputing, 2016: 875-885.
- [20] 秦伟伟, 刘刚, 王剑, 等. 基于鲁棒一步集的 Tube 不变集鲁棒模型预测控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1404-1411.
QIN Weiwei, LIU Gang, WANG Jian, et al. Robust MPC with tube invariant set based on robust one-step set[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7): 1404-1411.
- [21] RAKOVIC S V, KERRIGAN E C, KOURAMAS K I, et al. Invariant approximations of the minimal robust positively invariant set[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(3): 406-410.
- [22] TORRISI G, GRAMMATICO S, SMITH R S, et al. A variant to sequential quadratic programming for nonlinear model predictive control[C] // 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), December 12-14, 2016, Las Vegas, NV, USA: 2814-2819.
- [23] ZHANG Y, GE S S, LEE T H. A unified quadratic-programming based dynamical system approach to joint torque optimization of physically constrained redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics B, Cybernetics, 2004, 34(5): 2126-2132.
- [24] LE X, WANG J. Robust pole assignment for synthesizing feedback control systems using recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2017, 25(2): 383-393.

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-10-20

作者简介:

张虹(1973—), 女, 通信作者, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网发电技术、电力系统稳定与控制; E-mail: jdlzh2000@126.com

杨杨(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王迎丽(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 周金梅)