

双馈风机自适应神经分散协调预测控制

李晓明^{1†}, 牛玉广², 王世林¹, 林忠伟², 李明扬²

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 目前, 双馈感应发电机转子侧励磁控制系统均依据“孤立”模型设计。“孤立”模型忽略了各子系统之间、各控制器之间的相互作用, 因此这种控制器仅对改善本系统的控制特性有一定作用。针对以上情况, 提出了一种自适应神经分散协调控制策略, 并将其应用于双馈感应发电机转子侧励磁控制系统仿真研究中。首先, 利用电力关联测量法建立了基于本地变量的双馈风机关联测量模型。其次, 以关联测量模型作为预测模型, 采用多模型预测控制器对双馈风机转子侧励磁系统进行控制。最后, 利用可在线调整的人工神经网络作为多模型加权控制器以补偿双馈风机强非线性、工作区间变化范围大的特点。主导特征值分析和动态仿真表明: 该控制策略不仅实现了高精度的最大功率跟踪控制, 而且在电力系统故障时可提供持续的、充足的阻尼。

关键词: 双馈感应发电机; 分散协调控制; 神经网络; 模型预测控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive neural decentralized-coordinated predictive control of double fed induction generator

LI Xiao-ming^{1†}, NIU Yu-guang², WANG Shi-lin¹, LIN Zhong-wei², LI Ming-yang²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory for Alternate Electric Power System with Renewable Energy Source
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: At present, all designs of rotor-side excitation control system of double fed induction generator (DFIG) are based on the stand-alone machine model, in which the interactions between subsystems and existing controllers were not considered. In this situation, those “stand-alone machine”-based controllers will have only certain effects on improving the local system dynamics. Considering the problems above, we propose the adaptive neural decentralized-coordinated predictive control (ANDPC). Firstly, the interaction measurement method is introduced to build the local signal-based interaction measurement model (IMM) of DFIG. Secondly, a multiple model predictive control scheme based on the obtained IMM is proposed to control the rotor-side excitation system of DFIG. Finally, an artificial neural network (ANN) trained online is employed as a weighting controller to cope with the nonlinearities and the large operating range of DFIG. The dominant-eigenvalue analysis and dynamic simulations demonstrate that the proposed ANDPC scheme not only achieves an accurate maximum power point tracking (MPPT) control performance, but also provides a consistently enhanced contribution to network damping over the full operating range.

Key words: double fed induction generator; decentralized-coordinated control; neural network; model predictive control

1 引言(Introduction)

过去10年中, 风电是我国增长速度最快的发电机组和装机容量最大的新能源电源^[1]。目前风电装机容量占电网总装机容量的比例已达到较高的水平。在众多风电控制技术中, 变速恒频风力发电技术是目前公认的最优控制方式, 也是当前风力发电技术的主要发

展方向。其中, 双馈感应发电机(double fed induction generator, DFIG)是主要的发电机型^[2]。

电力系统是地域分布非常广阔的大规模系统, 其控制器设计一般根据分散控制原则。传统的分散控制根据“孤立”模型设计控制器。“孤立”控制器忽略了各子系统间的相互作用, 也不考虑系统中其他控制

收稿日期: 2014-10-17; 录用日期: 2015-04-13.

[†]通信作者. E-mail: lixiaoming@ncepu.edu.cn; Tel.: +86 15652391407.

国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)(2012CB215203); 国家自然科学基金项目(61203043); 新能源电力系统国家重点实验室项目(LAPS14014); 中央高校基本科研业务费专项基金资助。

Supported by National Basic Research Program of China (“973” Program) (2012CB215203), National Nature Science Foundation of China (61203043), State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (LAPS14014) and Fundamental Research Funds for the Central Universities in China.

器的存在及其交互作用. 因此这种控制器仅对改善本系统控制特性有一定的作用, 对相邻子系统的动态特性不可能有确定的改善, 相反在极端情况下存在因各控制器之间动作无法协同而使系统控制特性恶化的情况^[3].

分散协调控制是在限定控制器仅反馈本地变量的条件下, 科学合理的处理系统中各子系统间耦合作用, 并按照给定的性能指标在各分散控制器之间进行最优协调的一种设计方法. 由于分散协调控制很好的契合了电力系统大范围、分布式的特点, 因此人们对其在电力系统中的应用进行了深入的研究, 取得了大量成果. 韩英铎等人提出了输出反馈分散励磁控制器设计方法^[4], 解决了输出反馈分散协调控制在实际实施中所遇到一系列问题, 如全系统模型与控制算法^[5]; 权矩阵的协调作用、最优权矩阵的迭代计算方法^[6]; 反馈变量的选取与组合、分散协调控制器的装设地方确定问题^[7]等. 文献^[8]全面阐述了分散协调控制的基本理论和方法, 并将基于子系统关联测量模型和状态调节器的分散协调控制成功应用于汽轮机调门和同步机励磁系统的一体化控制. 文献^[9-10]利用分散协调控制理论整定电力系统稳定器, 使各电力系统稳定器可协同一致的提高系统阻尼, 从而改善系统暂态稳定性. 此外, 分散协调控制理论还广泛应用于水轮机励磁和调速系统^[11]、交直流互联系统换流器/逆变器控制系统^[12]和高压直流输电系统^[13]等.

本文将基于传统电力系统的关联测量法扩展到新能源电力系统, 提出了一种自适应神经分散协调预测控制(adaptive neural decentralized-coordinated predictive control, ANDPC)策略, 并将其应用于双馈风机转子侧变流器(rotor-side converter)控制系统. 该方法融合了人工神经网络(artificial neural network, ANN)控制、模型预测控制(model predictive control, MPC)、电力系统关联测量法的特点. 主导特征值分析和动态仿真表明: 该方法不仅可实现高精度的最大功率跟踪控制, 而且可在全工况范围内为系统提供充足的阻尼、改善新能源电力系统动态特性.

2 新能源电力系统关联测量模型(IMM of renewable power system)

电力系统的数学模型已被广泛研究, 此处不在赘述. 为在简化和控制精度之间取得良好的平衡, 本文所用DFIG模型为基于 $d-q$ 旋转坐标系的三阶模型^[14].

$$\dot{E}'_d = \frac{-r_r}{X_{rr}}(E'_d + \frac{X_m^2}{X_{rr}}I_{qs} + \frac{X_m}{X_{rr}}V_{qr}) + SE'_{q'}, \quad (1a)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{-r_r}{X_{rr}}(E'_q - \frac{X_m^2}{X_{rr}}I_{ds} + \frac{X_m}{X_{rr}}V_{dr}) - SE'_{d'}, \quad (1b)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}(T_e - T_m - F\omega_r). \quad (1c)$$

输出方程:

$$P_s = -E'_d I_{ds} - E'_q I_{qs}, \quad Q_s = E'_d I_{qs} - E'_q I_{ds}, \quad (2)$$

式中: X_s, X_r 分别为定子、转子电抗; X_m 为互抗, $X_{rr} = X_r + X_m, X' = X_s + X_m X_r / X_{rr}$; H 为转子惯性时间常数, F 为阻尼系数; ω_r 为转子角速度, $\omega_0 = 2\pi f_n$ 为同步角速度; T_e, T_m 分别为电磁、机械转矩; R_s, R_r 分别为定子、转子电阻; E'_d, E'_q 分别为 $d-q$ 轴暂态电压; $V_{ds}, V_{qs}, I_{ds}, I_{qs}$ 分别为定子电压、电流 $d-q$ 轴分量; V_{dr}, V_{qr} 分别为转子电压 $d-q$ 轴分量; P_s, Q_s 分别为定子有功无功功率; $S = 1 - \omega_r$ 为转差率.

为了研究电网中各同步机间相对转子位置, 还需建立同步旋转参考 $X-Y$ 坐标系. 本文所用电网模型为仅包含电源节点的 $X-Y$ 坐标系下交流网络准稳态模型, 其中电力负荷以恒定阻抗表示且并入系统节点阻抗矩阵^[15].

$$\begin{bmatrix} V_{X1} \\ V_{Y1} \\ \vdots \\ V_{XN} \\ V_{YN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & -X_{11} & \cdots & R_{1N} & -X_{1N} \\ X_{11} & R_{11} & \cdots & X_{1N} & R_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ R_{N1} & -X_{N1} & \cdots & R_{NN} & -X_{NN} \\ X_{N1} & R_{N1} & \cdots & X_{NN} & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{X1} \\ I_{Y1} \\ \vdots \\ I_{XN} \\ I_{YN} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: V_{Xi}, V_{Yi}, I_{Xi} 和 I_{Yi} 分别为第 i 个节点 $X-Y$ 轴电压、电流分量; R_{ij} 和 X_{ij} 为第 i 和 j 节点之间互电阻、电抗. 为表示方便, 上式线性化、偏差化结果可简写为如下形式:

$$\Delta V_F = Z_F \Delta I_F, \quad (4)$$

式中 Δ 表示小偏差量. 包含 N_F 个双馈风场的新能源电力系统(发电机总数为 $N > N_F$)状态空间方程可写为如下形式:

发电机节点方程:

$$\dot{X} = A_1 X + A_2 \Delta I_T + BU + d_m, \quad (5a)$$

$$Y = C_1 X + C_2 \Delta I_T. \quad (5b)$$

电压平衡方程:

$$\Delta E' = \Delta V_T + Z_{dq} \Delta I_T, \quad (6)$$

式中: $X = [X_1 \cdots X_N]^T$ 为全系统发电机节点状态向量; $Y = [Y_1 \cdots Y_N]^T$ 为全系统发电机节点输出向量, X_i, Y_i 为第 i 台发电机状态向量和输出向量, $A_1, A_2, B, C_1, C_2, Z_{dq}, d_m$ 为分块对角矩阵, 这些矩阵中的第 i 个对角块对应于第 i 台发电机的有关方程.

第 i 台发电机电压、电流在 $d-q$ 和 $x-y$ 坐标系之间的关系如图1所示. 由图1可推得, 电压、电流向量在两种坐标系下有如下线性化关系:

$$\Delta V_F = \bar{T} \Delta V_T - \bar{T} V_{D0} \Delta \delta, \quad (7a)$$

$$\Delta I_F = \bar{T} \Delta I_T - \bar{T} I_{D0} \Delta \delta, \quad (7b)$$

式中: \bar{T} 为分块对角矩阵, 式(5)-(7)中变量详细表达式见附录A. 将式(7a)-(7b)代入式(4)得

$$\Delta V_T = Z_t \Delta I_T + K_z \Delta \delta, \quad (8)$$

式中: $Z_t = \bar{T}Z_F\bar{T}$, $K_Z = V_{D0} - Z_t I_{D0}$. 式(8)为网络方程的机端变量表达式, 为了进一步得到系统关联测量矩阵, 将式(8)代入式(6)得

$$\begin{aligned} \Delta I_T &= M_1 \Delta E' + M_2 \delta, \\ M_1 &= (Z_t + Z_{dq})^{-1}, \\ M_2 &= -(Z_t + Z_{dq})^{-1} K_Z. \end{aligned} \quad (9)$$

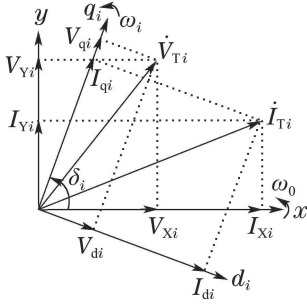


图1 电压电流向量在d-q和x-y坐标系中关系

Fig. 1 Terminal voltage and current in the d-q and x-y frames

显然, $\Delta E'$ 和 $\Delta \delta$ 与状态向量 X 具有如下关系:

$$\Delta E' = M_3 X, \quad \Delta \delta = M_4 X,$$

其中: M_3, M_4 表达式见附录A. 由此得到电力系统关联测量矩阵 M :

$$\Delta I_T = (M_1 M_3 + M_2 M_4) X = M X. \quad (10)$$

将式(10)代入式(5a)–(5b)即可得到包含双馈风机节点的新能源电力系统关联测量模型.

$$\dot{X} = A X + B U + d_m, \quad (11a)$$

$$Y = C X, \quad (11b)$$

式中: $A = A_1 + A_2 M, C = C_1 + C_2 M$. 式(11a)–(11b)为全系统关联测量模型. 为避免集中控制, 将式(10)展开得

$$\Delta I_T = M_{ii} X_i + \sum_{k=1, k \neq i}^N M_{ik} X_k. \quad (12)$$

展开式(5a)–(5b)并将式(12)代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= A_{1ii} X_i + A_{2ii} M_{ii} X_i + B_i U_i + \\ &A_{2ii} \sum_{k=1, k \neq i}^N M_{ik} X_k + d_{mi}, \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} Y &= C_{1ii} X_i + C_{2ii} M_{ii} X_i + \\ &C_{2ii} \sum_{k=1, k \neq i}^N M_{ik} X_k. \end{aligned} \quad (13b)$$

对比式(13a)–(13b)与式(11a)–(11b)的展开式, 可得到基于本地变量的双馈风机关联测量模型.

$$\dot{X}_i = A_{ii} X_i + B_i U_i + h_{xi} + d_{mi}, \quad (14a)$$

$$Y = C_{ii} X_i + h_{yi}, \quad (14b)$$

式中:

$$A_{ii} = A_{1ii} + A_{2ii} M_{ii}, \quad C_{ii} = C_{1ii} + C_{2ii} M_{ii},$$

$$h_{xi} = A_{2ii} \sum_{k=1, k \neq i}^N M_{ik} X_k = A_{2ii} (\Delta I_{Ti} - M_{ii} X_i),$$

$$h_{yi} = C_{2ii} \sum_{k=1, k \neq i}^N M_{ik} X_k = C_{2ii} (\Delta I_{Ti} - M_{ii} X_i),$$

从式(14a)–(14b)可看出, 矩阵 A_{ii} 和 C_{ii} 已不再是对角矩阵, 其中包含了各发电机间相互作用信息. 同“孤立”模型相比, 电力系统关联测量模型真实的反映了各电源点之间的相互作用情况, 更符合实际情况.

3 控制器设计(Controller design)

众所周知, 电力系统是一个强非线性系统. 特别对于新能源电力系统, 其工作区间和工作点变化频率均超过了传统电力系统. 为了应对这些问题, 本文采取了双控制器策略: 以基于关联测量模型的多模型MPC控制器作为主控制器, 保证各建模点工况的控制效果; 以Elman神经网络作为加权控制器, 从而保证ANDPC全工况范围的控制效果. 因此, ANDPC控制器设计过程可由4部分组成: 预测模型库、状态估计库、ANN加权控制器、MPC控制器, 如图2所示.

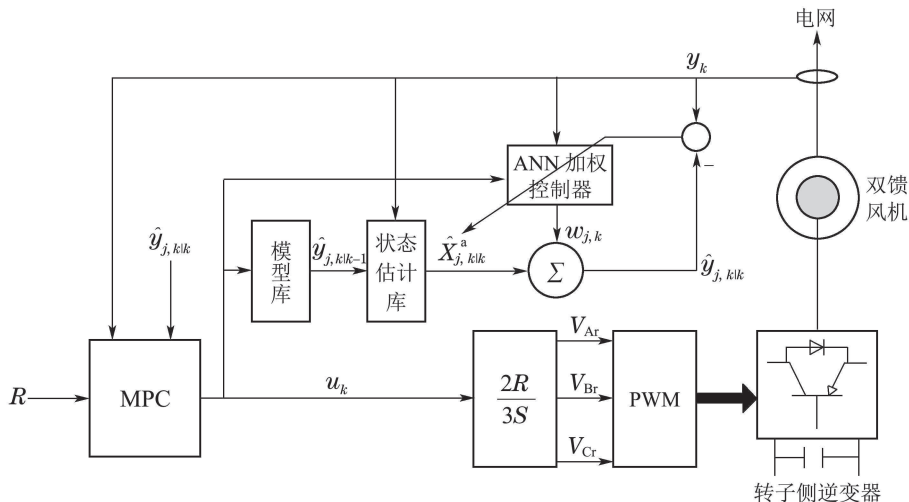


图2 双馈风机转子侧逆变器ANDPC控制策略

Fig. 2 Scheme of the ANDPC control of rotor-side converter

3.1 预测模型库(Predictive model bank)

多模型预测控制是基于离散域的一种控制方法. 因此首先将式(14a)–(14b)离散化, 得到

$$\hat{X}_{j,k+1} = F_j \hat{X}_j + G_j U_k + \hat{h}_{xj,k} + B_{dj} d_{mj,k}, \quad (15a)$$

$$\hat{Y}_{j,k+1} = H_j \hat{X}_{j,k+1} + \hat{h}_{yj,k+1}. \quad (15b)$$

每一个线性模型用来充分描述一小段子区间内的动态过程. 这样, 整个非线性工作区间就由这样 n 个线性子空间张成. 为了简化公式表达式, 在以下推导过程中省略了代表发电机编号的下角标 i .

3.2 状态估计库(State estimation bank)

本文中, 双馈感应发电机输入机械转矩被看作“可测扰动”. 为了提高励磁控制系统抵抗这种“可测扰动”的能力, 状态变量将以增广的形式更新, 具体方法如下: 风机侧输出机械转矩线性化方程为

$$\hat{X}_{dj,k+1} = F_{dj} \hat{X}_{dj} + G_{dj} n_{dj,k}, \quad (16a)$$

$$\hat{d}_{mj,k+1} = H_{dj} \hat{X}_{dj,k+1}, \quad (16b)$$

式中: d_m 为风机侧输出机械转矩, 即双馈感应发电机侧输入机械转矩(忽略齿轮箱等处的摩擦), 风机模型见附录A. 综合式(15a)–(15b)和(16a)–(16b)可得

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_{j,k+1} \\ \hat{X}_{dj,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{j,k} & B_{dj} H_{dj} \\ o & F_{dj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_{j,k} \\ \hat{X}_{dj,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_j \\ 0 \end{bmatrix} U_k + \begin{bmatrix} G_{dj} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{n}_{dj,k} + \begin{bmatrix} \hat{h}_{xj,k} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17a)$$

$$\hat{Y}_{j,k+1} = [H_j \ 0] \begin{bmatrix} \hat{X}_{j,k+1} \\ \hat{X}_{dj,k+1} \end{bmatrix} + \hat{h}_{yj,k+1}. \quad (17b)$$

定义增广状态向量 $\hat{X}_{j,k}^a = [\hat{X}_{j,k} \ \hat{X}_{dj,k}]^T$, 则式(17a)–(17b)的紧凑形式为

$$\hat{X}_{j,k+1}^a = F_j^a \hat{X}_{j,k}^a + G_j^a U_k + \hat{h}_{xj,k}^a + G_{dj}^a n_{dj,k}, \quad (18a)$$

$$\hat{Y}_{j,k+1} = H_j^a \hat{X}_{j,k+1}^a + \hat{h}_{yj,k+1}^a. \quad (18b)$$

本文利用卡尔曼滤波法更新增广状态向量, 则预测/校正方程为

$$\hat{X}_{j,k|k-1}^a = F_j^a \hat{X}_{j,k-1|k-1}^a + G_j^a U_{k-1} + \hat{h}_{xj,k-1}^a + G_{dj}^a n_{dj,k-1}, \quad (19a)$$

$$\hat{X}_{j,k|k}^a = \hat{X}_{j,k|k-1}^a + L_j (y_k - H_j^a \hat{X}_{j,k|k-1}^a), \quad (19b)$$

$$\hat{Y}_{j,k|k}^a = H_j^a \hat{X}_{j,k|k}^a + \hat{h}_{yj,k|k}^a, \quad (19c)$$

式中: L_j 为第 j 个模型的卡尔曼增益, 可从第 j 个模型的稳态黎卡提方程求得^[16].

3.3 自适应神经网络加权控制器(Adaptive ANN controller)

Elman神经网络的数学模型为^[17]

$$v_k = W_k^U (u_k + y_k) + W_k^C x_k^C, \quad (20a)$$

$$x_k^H = f(v_k), \quad (20b)$$

$$x_k^C = \alpha x_{k-1}^H, \quad (20c)$$

$$w_k = W_k^Y x_k^H, \quad (20d)$$

式中: W_k^U, W_k^C, W_k^Y 分别为输入层、承接层、输出层权值矩阵; u_k, y_k 为输入神经网络输入向量; w_k 为神经网络输出向量, 即各模型权值矩阵; v_k, x_k^H 分别为隐层输入、输出向量; x_k^C 为承接层输出向量; $f(\cdot)$ 为激发函数; α 为承接层自反馈系数.

神经网络加权控制器的输出为各工况点量模型权值, 以保证集中模型拟合精度, 因此网络误差函数定义为

$$J_{E,k} = \frac{1}{2} (y_k - \hat{y}_{k|k})^T (y_k - \hat{y}_{k|k}). \quad (21)$$

利用梯度下降法, 可得到Elman神经网络权值在线调整学习算法.

$$W_k^x = W_{k-1}^x - \eta \nabla_{W_k^x} J_{E,k}, \quad (22)$$

式中: $x = U, C, Y, \eta$ 为学习率,

$$\nabla_{W_k^x} J_{E,k} = \frac{\partial J_{E,k}}{\partial u_k} \frac{\partial u_k}{\partial w_k} \frac{\partial w_k}{\partial W_k^x}$$

为 $J_{E,k}$ 对 W_k^x 的梯度. 其中 $\frac{\partial w_k}{\partial W_k^x}$ 可根据式(20a)–(20d)由误差反传算法得到; $\frac{\partial u_k}{\partial w_k}$ 可根据最优控制律

得到; $\frac{\partial J_{E,k}}{\partial u_k}$ 为双馈风机雅各比矩阵(Jacobian matrix), 可由双馈风机模型经过求导得到或用其符号矩阵代替^[18]. 为了加强学习算法的稳定性, 在学习过程中引入动量因子 λ , 则 $\nabla_{W_k^x} J_{E,k}$ 可重写为

$$\begin{aligned} \nabla_{W_k^x} J_{E,k} = \\ \nabla_{W_{k-1}^x} J_{E,k-1} + (1 + \lambda) \nabla_{W_{k-2}^x} J_{E,k-2}. \end{aligned} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)即可得到Elamn网络在线更新算法.

3.4 多模型预测控制器(Multiple MPC controller)

设第 j 个模型的权值为 w_j , 则加权合成后 $(k + 1|k)$ 至 $(k + P|k)$ 时刻的模型预测输出向量为

$$\begin{aligned} \bar{Y} = S_x + S_c S_e \Delta U + S_c U_0 + \\ S_{hx} + S_{hy} + S_d. \end{aligned} \quad (24)$$

模型预测控制器的目标函数可写为

$$J = (\text{Tr} - \bar{Y})^T Q (\text{Tr} - \bar{Y}) + \Delta U^T R \Delta U. \quad (25)$$

根据式(25), 最优控制律为

$$\Delta U = (S_e^T S_c^T Q S_c S_e + R)^{-1} S_e^T S_c^T W_y (\text{Tr} - S_x - S_c U_0 + S_d) - G, \quad (26)$$

式中: Tr 为设定值, Q, R 为加权矩阵,

$$G = (S_e^T S_c^T Q S_c S_e + R)^{-1} S_e^T S_c^T Q (S_{hx} + S_{hy}),$$

以上公式中所用变量声明及证明详见附录B.

由式(25)可以看出, ANDPC控制律由两部分组成: 前一部分为常规多模型MPC控制律; 后一部分 G 为关联测量项对最终控制律中的影响. 从以上推导过程可以看出, 最终控制律仅包含本地可测变量. G 可看作协调信号, 各分散控制器在 G 的协调下趋同一致的工作, 使性能函数最优. 因此该方法为一种分散协调预测控制方法. 又因为协调信号 G 是本地可测状态变量, 如机端电压、电流的线性组合, 是在本地实时测得的. 网络参数变化将引起这些本地可测变量的变化, 从而控制器能够根据 G 的变化自适应的调整控制律, 从而快速平抑系统扰动; 同时神经网络控制器可根据系统所处工况自适应的调整各模型权值, 提高模型拟合精度, 因此该方法可被看作为神经自适应分散协调预测控制.

由以上推导过程可看出, 本文所提出的ANDPC控制器不仅可用于双馈风机励磁控制系统, 同时也可用于同步发电机励磁控制系统和汽轮机调速控制系统. 当应用于汽轮发电机组时, 只需将式(15a)–(15b)所示双馈风机关联测量模型改为汽轮发电机组关联测量模型即可^[8].

4 仿真分析(Simulation and analysis)

由于同步机转子磁链随转子本身同步的旋转, 因此同步机励磁控制系统中只有转子磁链幅值可控. 同步机自动电压控制(automatic voltage control, AVR)和电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的被控变量均为转子磁链幅值. 显然, 这两个控制回路之间必然存在的强烈的耦合, 导致其PSS回路的整定必须在电压调节和系统阻尼之间取折中结果. 而双馈风机本身为异步电机, 其转子磁链的角度和幅值均可参与控制. 这个特点决定了双馈风机励磁控制系统更为灵活, 尤其在暂态控制方面, 双馈风机具有巨大的潜力. 同时, 双馈风机转子侧励磁控制系统也更为复杂, 在保证一定精度的最大功率跟踪控制的前提下, 还要对电网提供必要的运行支持, 如进行端电压调节, 为电力系统提供一定的阻尼等.

为了说明双馈风机安装ANDPC后在以上所述方面的控制效果, 本文在MATLAB/Simulink环境下搭建了一个简化的、具有普遍意义的新能源电力系统模型, 如图3所示. 图中: 母线B3连接外部电力系统, 负荷1和负荷2以恒定阻抗表示, SG1为汽轮发电机组, WF为基于双馈风机的风电场, T1–T2为升压变压器, L1–L3表示架空线路, 以上各模型具体参数见附录A.

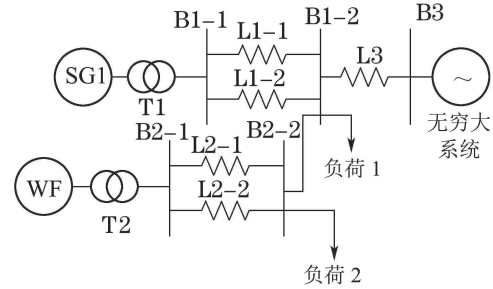


图3 新能源电力系统结构

Fig. 3 Configuration of renewable power system

需要说明的是: 在以下的特征值分析和动态仿真中, 本文所提出的ANDPC仅用于控制双馈风机转子侧变流器(rotor-side converter), 其网侧变流器(gridside converter)、桨距角控制器(pitch controller)均采用传统PID控制策略^[19].

4.1 特征值分析(Eigenvalue analysis)

双馈风机不同转差率(S)下的新能源电力系统主导特征值如图4所示. 从图4中可以看到, 当双馈风机安装忽略关联的传统多模型预测控制器(classical multiple model predictive controller, CMMPC)时, 系统主导特征值的实部均位于 -1.58 至 -1.62 之间, 对应的阻尼为 0.1125 至 0.1242 ; 当双馈风机安装多模型分散协调预测控制(multiple model decentralized coordinated predictive control, MMDPC)后, 主导特征值向复平面左边移动, 系统主导特征值大多位于 -1.72 至 -2.1 之间. 双馈风机安装ANDPC后, 系统主导特征值向复平面左半部分移动了很大一段距离, 说明系统的阻尼得到了极大提高. 例如, 当 $S = 0.2$ 时(对应最低工作点), ANDPC控制下的主导特征值实部为 -2.11 , 对应的阻尼系数为 0.214 ; 当 $S = -0.2$ 时(对应最高工作点), 系统主导特征值实部为 -2.238 , 对应的阻尼系数为 0.273 . 以上各控制方式见表1.

从图4中可以看到, 同忽略关联的传统多模型预测控制相比, 基于关联测量法的预测控制均取得较好的控制效果. 其中, 由于ANDPC采用了神经自适应加权控制方法, 因此在双馈风机全工况范围内均取得了较好的控制效果. 而MMDPC仅在建模点

($S = 0.2, S = 0.02, S = -0.2$) 同ANDPC取得了相近的阻尼控制效果。

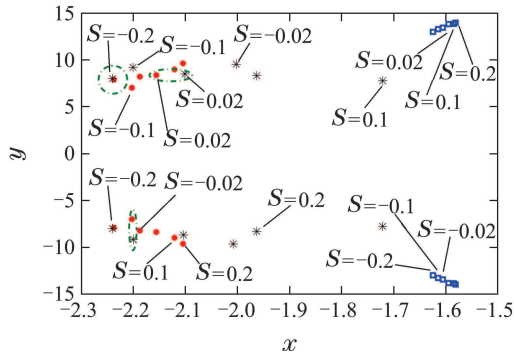


图 4 DFIG全工况范围内新能源电力系统主导特征值: $P_{SG1} = 7.3 \text{ MW}$

Fig. 4 Dominant eigenvalue analysis of renewable power system over full operating region of DFIG: $P_{SG1} = 7.3 \text{ MW}$

表 1 各MPC控制器算法结构

Table 1 Structure of various MPC

| 预测模型 | 状态估计 | 加权方法 | 控制律 |
|--------------|-------|------|--------------|
| CMMPC “孤立”模型 | 式(19) | 贝叶斯 | 式(26), $G=0$ |
| MMDPC 关联测量模型 | 同上 | 贝叶斯 | 式(26) |
| ANDPC 同上 | 同上 | 自适应 | 式(26) |

由于双馈风机电磁暂态过程远远快于其机械暂态过程, 因此在电磁暂态控制中, 机械过程可视为常量. 由此, 预测控制器性能函数式(25)可变为如下形式:

$$J = \Delta \bar{Y}^T Q \Delta \bar{Y} + \Delta U^T R \Delta U. \quad (27)$$

由附录B式(32)可知, \bar{Y} 与 $\sum_{j=0}^n w_{ij} \hat{X}_{ij}^a$ 具有线性关系. 因此式(27)必可写为如下形式:

$$J = \left(\sum_{j=0}^n w_{ij} \hat{X}_{ij}^a \right)^T Q_e \left(\sum_{j=0}^n w_{ij} \hat{X}_{ij}^a \right) + \Delta U^T R_e \Delta U = \bar{X}^T Q_e \bar{X} + \Delta U^T R_e \Delta U. \quad (28)$$

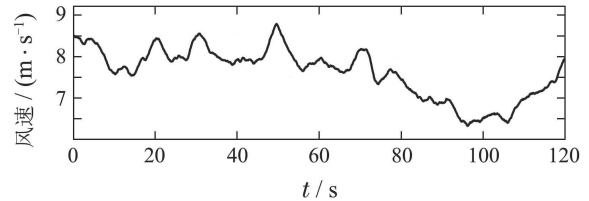
由上式可知, 在暂态控制中该性能指标由输出跟踪器转化为标准的状态调节器. 暂态控制中, 如令式(27)取最小, 则必然为主导特征值大幅度左移. 这就解释了双馈风机控制器采用式(25)作为性能指标可提高系统阻尼的原理.

4.2 最大功率跟踪控制仿真(MPPT simulation)

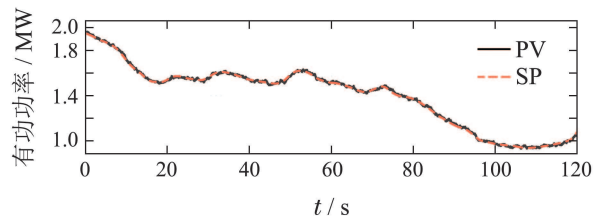
最大功率跟踪控制是实现风能转化的主要控制手段, 其跟踪控制精度直接影响风能转化效率. 本文使用真实风速模型^[20], 以尽可能的接近实际风速变化情况. 在高、低两种风速情况下进行最大功率跟踪控制进行仿真, 仿真结果见图5-6. 仿真所用风速

模型参数为: 低风速模式平均风速为8 m/s, 扰动量为15%; 高风速模式平均风速13 m/s, 扰动量为30%.

从图5-6可知, 在双馈风机全工况范围内, ANDPC控制均保持了较高精度的最大功率跟踪控制. 为了进一步说明MPPT控制效果, 表2列出了高风速模式下有功功率输出值和设定值若干采样点数据. 从中可以看出, ANDPC最大功率跟踪控制误差低于2%, 以至于在图中无法区分这两条曲线.



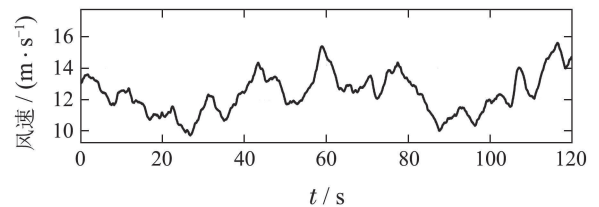
(a) 低风速模型曲线



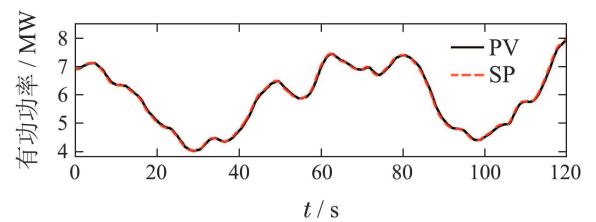
(b) DFIG有功功率输出

图 5 低风速模式仿真

Fig. 5 Simulation under low effective wind speed



(a) 高风速模型曲线



(b) DFIG有功功率输出

图 6 高风速模式仿真

Fig. 6 Simulation under high effective wind speed

表 2 高风速响应曲线采样值

Table 2 Sample values for the response of high effective wind speed

| 时间/s | 0 | 1 | 10 | 50 | 100 | 120 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 设定值 | 6.8927 | 6.9426 | 6.3570 | 6.4133 | 4.5480 | 8.0086 |
| 过程值 | 6.8901 | 6.9270 | 6.3535 | 6.4395 | 4.5107 | 7.9892 |

4.3 系统扰动仿真(System disturbance simulation)

为了验证ANDPC在电力系统扰动下的控制效果,本文分别在不同工况下、在新能源电力系统不同位置施加多种扰动,如端电压设定值扰动、三项接地故障扰动和线路切除、重合扰动。

情况 1 在双馈风机 $S = 0.2$ 工况点(对应最低工作点)对电压设定值进行阶跃扰动仿真,其扰动幅值为 8 V ,持续时间均为 1 s ,仿真结果见图7。图7中: $d-V_t$ 为双馈风机端电压偏差值。由图7可知,基于关联测量模型的MPC控制效果均优于基于“孤立”模型的MPC控制。

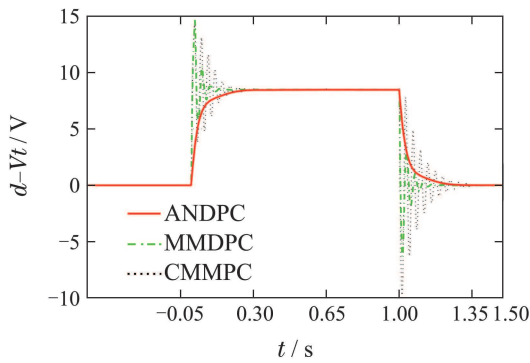
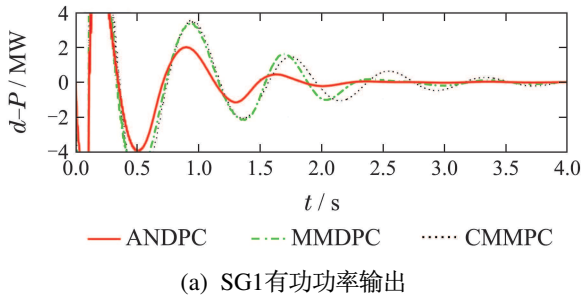


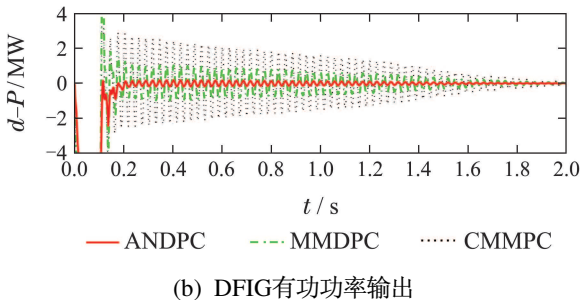
图 7 DFIG端电压设定值扰动($S = 0.2$)

Fig. 7 Set point disturbance of terminal voltage of DFIG ($S = 0.2$)

情况 2 在线路L2-1中间处施加持续时间为 0.1 s 的三项接地故障,系统动态响应曲线如图8所示。



(a) SG1有功功率输出



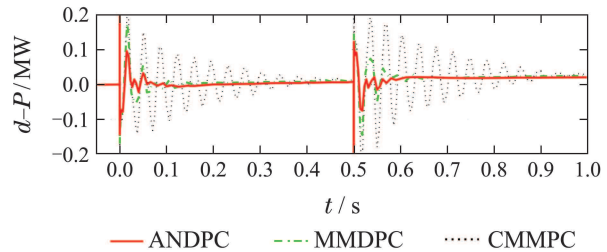
(b) DFIG有功功率输出

图 8 三项接地故障仿真($P_{SG1} = 6.67\text{ MW}$, $P_{DFIG} = 8.08\text{ MW}$, $S = -0.2$)

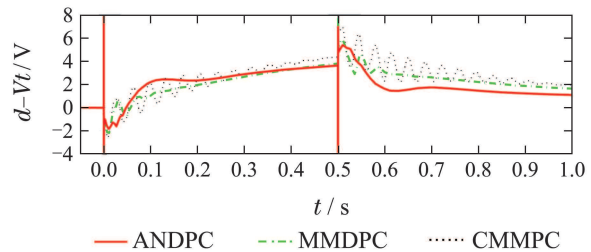
Fig. 8 Three-phase ground fault simulation ($P_{SG1} = 6.67\text{ MW}$, $P_{DFIG} = 8.08\text{ MW}$, $S = -0.2$)

图8中: $d-P$ 为发电机输出有功功率偏差值,本仿真中MMDPC和ANDPC同时控制双馈风机转子励磁系统和汽轮发电机组调门和励磁系统。从图8可以看出,同CMMPC和MMDPC相比,系统阻尼在ANDPC控制下得到极大提高。例如,在ANDPC控制下,汽轮发电机组在故障后经过两个波峰后(约 1.5 s)进入稳态;双馈风机则在故障后经过一个波峰(约 1.7 s)后即进入稳态,其过渡时间明显地小于MMDPC和CMMPC。

情况 3 通过切除、投入线路L2-1以验证控制器ANDPC在电网参数变化时的控制效果。仿真过程为:在 $t = 0\text{ s}$ 时断开线路L2-1两端断路器, 0.5 s 后自动重合该线路两端断路器,仿真结果见图9。当断路器断开后,风电场出口连接线的阻抗同未切除前比增加了 0.5 pu ,断路器自动重合后,系统参数恢复到扰动前状态。



(a) DFIG有功功率输出



(b) DFIG端电压曲线

图 9 线路L2-1参数扰动响应曲线($S = -0.003$)

Fig. 9 Response of parameter disturbance from transmission line L2-1 ($S = -0.003$)

由图9可知,即使在线路参数发生较大扰动的情况,分散协调预测控制表现出了较好的控制效果,其中ANDPC控制效果优于MMDPC。

图7-9验证了图4所示主导特征值分析结果。由于传统多模型预测控制忽略了各发电机节点之间的相互作用,造成各控制器均“孤立”的工作,无法协调一致,因此很难取得令人满意的控制效果。而基于关联测量法的预测控制充分考虑了各子系统、各分散控制器之间的相互作用,因此可保证各控制器在性能指标的约束下,协调统一的工作,从而取得较好的控制效果。

从第4.1节特征值分析中, 可以发现在建模工况点MMDPC和ANDPC表现出相近的阻尼控制效果. 但从动态仿真结果来看, ANDPC在各种扰动仿真中表现明显优于MMDPC, 其中的原因可归结为以下两点:

1) 当系统遭遇各种扰动时, 电网的架构和参数均会发生变化. 而特征值分析所对应的系统工况均为稳态工作点, 无法全面反映这种扰动下的系统暂态动态特性.

2) 基于贝叶斯概率的加权方法, 本质是一种线性拟合方法. 因此, 利用线性模型和线性加权算法去拟合一个强非线性过程, 其拟合精度很难令人满意. 尤其在系统遭遇大扰动时, 这种线性加权方法的弱点就更为明显. 而ANDPC则利用人工神经网络为加权控制器, 由于人工神经网络本身为非线性, 再加上在线调整算法, 从而使得ANDPC能够根据电网的变化自适应的调整控制器输出以实现高精度的拟合, 从而使控制器能够快速平抑系统扰动.

5 结论(Conclusion)

本文在电力系统关联测量法的基础上, 将基于汽轮发电机组的传统电力系统分散协调控制扩展到新能源电力系统中, 提出了一种自适应神经分散协调预测控制策略, 并将其应用于双馈风机转子励磁控制系统仿真研究. 主导特征值分析和动态仿真研究表明: 该方法在双馈风机全工况范围内保持了较好的控制效果, 不仅实现了较高精度的最大功率跟踪控制, 提高了风能转化效率, 而且还改善了双馈风机动态特性, 增强了新能源电力系统阻尼.

参考文献(References):

- [1] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1 – 8.
(LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(16): 1 – 8.)
- [2] 丁贵立, 王奔. 双馈感应风力发电机组的非线性变结构空载并网控制策略 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(5): 665 – 670.
(DING Guilin, WANG Ben. Nonlinear sliding-mode variable structure control for no-load double-fed induction generator cutting-in wind power grids [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(5): 665 – 670.)
- [3] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): T2 – T6.
(HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected north america power grid [J]. *Power System Technology*, 2003, 27(9): T2 – T6.)
- [4] 陈准金, 韩英铎, 王仲鸿. 多机电力系统分散最优励磁控制器研究 [J]. 控制理论与应用, 1989, 6(3): 31 – 38.
(CHEN Huaijin, HAN Yingduo, WANG Zhonghong. Decentralized optimal excitation controller in multimachine power system [J]. *Control Theory & Applications*, 1989, 6(3): 31 – 38.)
- [5] 陈准金, 韩英铎. 多机电力系统分散输出反馈励磁控制器研究之一: 模型与算法 [J]. 中国电机工程学报, 1990 10(2): 32 – 39.
(CHEN Huaijin, HAN Yingduo. Study on the decentralized output feedback excitation controllers in multimachine power system, Part 1: model and algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1990 10(2): 32 – 39.)
- [6] 陈准金, 韩英铎. 多机电力系统分散输出反馈励磁控制器研究之二: 权重矩阵的协调选择 [J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(5): 37 – 41.
(CHEN Huaijin, HAN Yingduo. Study on the decentralized output feedback excitation controllers in multimachine power system, Part 2: Coordinated selection of weighting matrix [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1990, 10(5): 37 – 41.)
- [7] 陈准金, 韩英铎, 王仲鸿. 多机电力系统分散输出反馈励磁控制器研究之三: 反馈量的选择及控制器装设地点的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(2): 23 – 28.
(CHEN Huaijin, HAN Yingduo, WANG Zhonghong. Study on the decentralized output feedback excitation controllers in multimachine power system, Part 3: selection of feedback variables and setting of controllers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1991, 11(2): 23 – 28.)
- [8] 韩英铎, 王仲鸿, 陈准金. 电力系统最优分散协调控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(HAN Yingduo, WANG Zhonghong, CHEN Huaijin. *Power System Optimal Decentralized Coordinated Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [9] QIU W, VITTAL V, KHAMMASH M. Decentralized power system stabilizer design using linear parameter varying approach [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(4): 1951 – 1960.
- [10] CHEN C L, HSU Y Y. Coordinated synthesis of multimachine power system stabilizer using an efficient decentralized modal control (DMC) algorithm [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1987, 2(3): 543 – 550.
- [11] LIN M J, HU W, LIU F, et al. Nonlinear coordinated control of excitation and governor for hydraulic power plants [J]. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 2005, 152(4): 544 – 548.
- [12] LI X, YAN Q, HU Y. Decentralized coordinated robust adaptive control for AC/DC inter-connected power systems based on WAMS [C] //2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2008: 1896 – 1899.
- [13] LI X, SHAO Z, TANG G. Study on decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC transmission systems [J]. *Proceedings-Chinese Society of Electrical Engineering*, 2005, 25(16): 8 – 12.
- [14] 张森, 李运德, 陈思哲, 等. 双馈感应风力发电机组的滑模直接电压控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 245 – 250.
(ZHANG Miao, LI Yunde, CHEN Sizhe et. al. Sliding mode direct voltage control of wind turbines based on double-fed induction generators [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 245 – 250.)
- [15] KUNDUR P. *Power System Stability and Control* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [16] CAMACHO E F, ALBA C B. *Model Predictive Control* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] BULUT E, EGRIOGLU E. A new partial least square method based on elman neural network [J]. *American Journal of Intelligent Systems*, 2014, 4(4): 154 – 158.
- [18] BEAUFAYN F, ABDEL-MAGID Y, WIDROW B. Application of neural networks to load-frequency control in power systems [J]. *Neural Networks*, 1994, 7(1): 183 – 194.
- [19] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation [J]. *IEE Electric Power Applications*, 1996, 143(3): 231 – 241.
- [20] CAMBLONG H, VIDAL M R, PUIGGALI J R. Principles of a simulation model for a variable-speed pitch-regulated wind turbine [J]. *Wind Engineering*, 2004, 28(2): 157 – 175.

附录A 新能源电力系统参数(Appendix A Parameters of renewable power system)

A1) 双馈风机模型(标么值, 额定容量为 $S_b = 9$ MW).

$$R_s = 0.00706, L_s = 0.171, R_r = 0.005,$$

$$L_r = 0.156, L_m = 2.9, H = 5.04, F = 0.01,$$

$$A_{1ii} = \begin{bmatrix} \frac{-\omega_0 F}{2H} & \frac{\omega_0 I_{qs0}}{2H} & \frac{\omega_0 I_{ds0}}{2H} \\ E'_{do} & \frac{-R_r}{X_{rr}} & \omega_0 - 1 \\ -E'_{do} & 1 - \omega_0 & \frac{-R_r}{X_{rr}} \end{bmatrix},$$

$$A_{2ii} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0 E'_{q0}}{2H} & \frac{\omega_0 E'_{d0}}{2H} \\ 0 & \frac{R_r X_m^2}{X_{rr}} \\ \frac{-R_r X_m^2}{X_{rr}} & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{2ii} = \begin{bmatrix} 2R_s I_{qs0} + E'_{q0} & 2R_s I_{ds0} + E'_{d0} \\ -2X'_s I_{qs0} + E'_{d0} & -2X'_s I_{ds0} - E'_{q0} \end{bmatrix},$$

$$C_{1ii} = \begin{bmatrix} 0 & -I_{qs0} & -I_{ds0} \\ 0 & -I_{qs0} & I_{qs0} \end{bmatrix}, B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-X_m}{X_{rr}} \\ 0 & \frac{X_m}{X_{rr}} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$Y_i = \begin{bmatrix} \Delta P_{si} \\ \Delta Q_{si} \end{bmatrix}, U_i = \begin{bmatrix} \Delta V_{qri} \\ \Delta Q_{dri} \end{bmatrix}, \Delta I_{Ti} = \begin{bmatrix} \Delta I_{qsi} \\ \Delta I_{dsi} \end{bmatrix},$$

$$\Delta E'_i = \begin{bmatrix} \Delta E'_{qi} \\ \Delta E'_{di} \end{bmatrix}, \Delta V_{Ti} = \begin{bmatrix} \Delta V_{qsi} \\ \Delta V_{dsi} \end{bmatrix},$$

$$\Delta Z_{dqi} = \begin{bmatrix} -R_{si} & -X'_i \\ -X'_i & -R_{si} \end{bmatrix}, X_i = [\Delta \omega_i \quad \Delta E'_{qi} \quad \Delta E'_{di}]^T,$$

$$d_{mi} = \left[\frac{\omega_{0i} \Delta T_{mi}}{H_i} \quad 0 \quad 0 \right]^T, i = 1, \dots, N_F.$$

A2) 同步机模型(标么值, 额定容量 $S_b = 25$ MW).

$$X_d = 0.3990, X'_d = 0.1495, X_q = 0.2395,$$

$$H = 7.13, T'_{d0} = 5.0, T_E = 0.13, D = 4.0,$$

$$X_i = [\Delta \delta_{Gi} \quad \Delta E'_{Gi} \quad \Delta \omega_{Gi} \quad \Delta P_{Gmi} \quad \Delta \mu_{Gi}]^T,$$

$$\Delta I_{Ti} = [\Delta I_{Gqi} \quad \Delta I_{Gdi}]^T, \Delta E'_i = [\Delta E'_{Gqi} \quad 0]^T,$$

$$\Delta V_{Ti} = [\Delta V_{qi} \quad \Delta V_{di}]^T,$$

$$Z_{dqi} = \begin{bmatrix} 0 & X'_{di} \\ -X'_{qi} & 0 \end{bmatrix}, i = N_F + 1, \dots, N,$$

式中: 下脚标0表示稳态值, $\delta_G, \omega_G, E'_{Gq}, P_{Gm}, \mu_G$ 分别为 q 轴与 X 轴的夹角、角速度、暂态电压 q 轴分量、汽轮机输出机械功率、汽轮机调门开度; X_q, X'_d 分别为 q 轴同步电抗、 d 轴暂态电抗; I_d, I_q 分别为 d - q 轴电流. 汽轮发电机组关联测量模型详见文献[8, 15].

A3) 文中公式详细表达式.

$$\Delta \delta = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \delta_{N_F+1} \quad \dots \quad \delta_{N+1}]^T,$$

$$\bar{T} = \text{blk}\{T_1 \quad \dots \quad T_{N_F} \quad T_{(N_F+1)0} \quad \dots \quad T_{N0}\}^T,$$

$$V_{D0} = \text{blk}\{O_1 \quad \dots \quad O_{N_F} \quad V_{(N_F+1)0} \quad \dots \quad V_{N0}\}^T,$$

$$I_{D0} = \text{blk}\{O_1 \quad \dots \quad O_{N_F} \quad I_{(N_F+1)0} \quad \dots \quad I_{N0}\}^T,$$

$$T_{0i} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{0i} & \sin \delta_{0i} \\ -\sin \delta_{0i} & -\cos \delta_{0i} \end{bmatrix}, O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$V_0 = \begin{bmatrix} -V_{d0} \\ V_{q0} \end{bmatrix}, I_0 = \begin{bmatrix} -I_{d0} \\ I_{q0} \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \text{blk}\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_1, \dots, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N_F} \right\},$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{N_F+1}, \dots, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_N \right\},$$

$$M_4 = \text{blk}\{[0 \ 0 \ 0]_1, \dots, [0 \ 0 \ 0]_{N_F}, [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]_{N_F+1}, \dots, [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]_N\},$$

其中blk表示分块对角矩阵.

A4) 风机模型.

风机捕获的机械功率 P_{ae} 为

$$P_{ae} = 0.5 C_p \pi R^2 \rho v^3,$$

$$\begin{cases} C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda} - 0.58\beta - 0.002\beta^2 - 13.2 \right) e^{\frac{18.4}{\lambda}}, \\ \lambda = \left(\frac{v}{\Omega R - 0.02\beta v} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}, \end{cases}$$

式中: ρ 为空气密度, C_p 为风能捕获系数, R 为风叶半径, v 为风速, λ 为叶尖速比, Ω 为风机转速, β 为桨距角.

风机传动机构模型为 $\dot{P}_m = (P_{ae} - P_m)/T_h$. P_m 为风机输出机械功率, T_h 为传动机构惯性时间常数. 综合以上各式可得风机连续线性化状态方程模型, 并离散化此方程可得到式(16a)-(16b)所示风机离散化模型.

A5) 电网模型参数.

变压器(T1):

$$V_1 = 230 \text{ kV}, R_1 = 5.878 \times 10^{-5} \Omega,$$

$$L_1 = 0.024 \text{ H}, V_2 = 10.5 \text{ kV}, R_2 = 4.444 \times 10^{-7} \Omega,$$

$$L_2 = 0 \text{ H}, R_m = 222.22 \Omega, L_m = 0.59 \text{ H}.$$

变压器(T2):

$$V_1 = 230 \text{ kV}, R_1 = 3.674 \Omega, L_1 = 0.292 \text{ H},$$

$$V_2 = 575 \text{ V}, R_2 = 6.89 \times 10^{-5} \Omega, L_2 = 5.482 \times 10^{-6} \text{ H},$$

$$R_m = 2.204 \times 10^6 \Omega, L_m = \infty \text{ H}.$$

以上各变量下脚标1表示高压侧参数, 2表示低压侧参数.

电力传输线路:

$$\text{每公里正序/零序电阻: } 0.053/1.61 \Omega/\text{km};$$

$$\text{每公里正序/零序电感: } 0.0014/3.32 \times 10^{-3} \text{ H/km};$$

$$\text{每公里正序/零序电容: } 11.33 \times 10^{-9}/5.01 \times 10^{-9} \text{ C/km};$$

长度: L1-1和L1-2的长度为10 km; L2-1和L2-2的长度为20 km; L3的长度为30 km.

附录B 加权和成预测模型(Appendix B Synthesized predictive model)

展开 $\bar{Y}_{i,k+1|k}$ 得到

$$\bar{Y}_{i,k+1|k} = \sum_{j=1}^n w_{ij,k} \hat{y}_{ij,k+1|k} =$$

$$w_{i1,k} (H_{i1}^a \hat{X}_{i1,k+1}^a + \hat{h}_{yi1,k+1}) + \dots +$$

$$w_{in,k} (H_{in}^a \hat{X}_{in,k+1}^a + \hat{h}_{yin,k+1}), \quad (29)$$

$$U_{i,k+1} = U_{i,k} + \Delta U_{i,k+1}. \quad (30)$$

将式(18a)-(18b)代入式(29)得到

$$\bar{Y}_{i,k+1|k} = w_{i1,k} (H_{i1}^a F_{i1}^a \hat{X}_{i1,k}^a + H_{i1}^a G_{i1}^a U_{i1,k} +$$

$$\begin{aligned}
 & H_{i1}^a \hat{h}_{xi1,k} + \hat{h}_{yi1,k+1}) + \dots + \\
 & w_{in,k} (H_{in}^a F_{in}^a \hat{X}_{in,k}^a + H_{in}^a G_{in}^a U_{in,k} + \\
 & H_{in}^a \hat{h}_{xin,k} + \hat{h}_{yin,k+1}). \tag{31}
 \end{aligned}$$

利用式(29)–(31)类似的可以得到: $\bar{Y}_{i,k+2|k}$ 到 $\bar{Y}_{i,k+N_p|k}$ 的表达式, 由此可得到预测输出向量 $\bar{Y}_i = [\bar{Y}_{i,k+1|k} \dots \bar{Y}_{i,k+N_p|k}]^T$ 的表示式:

$$\bar{Y}_i = Sx_i + Sc_i Se_i \Delta U_i + Sc_i U_{i0} + S_{hxi} + S_{hyi}, \tag{32}$$

式中:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= [U_{i,k-1} \dots U_{i,k-1}]_{1 \times N_{pi}}^T, \\
 \Delta U_i &= [\Delta U_{i,k} \Delta U_{i,k+1} \dots \Delta U_{i,k+N_{ui}-1}]_{1 \times N_{ui}}^T, \\
 S_{hxi} &= \sum_{j=1}^n w_{ij,k} \begin{bmatrix} H_{ij}^a & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ H_{ij}^a F & \dots & H_{ij}^a \end{bmatrix} \times \\
 & \begin{bmatrix} \hat{h}_{xij,k}^a \\ \vdots \\ \hat{h}_{xij,k+N_{pi}-1}^a \end{bmatrix}, \\
 S_{hyi} &= \sum_{j=1}^n w_{ij,k} \begin{bmatrix} \hat{h}_{yij,k}^a \\ \vdots \\ \hat{h}_{yij,k+N_{pi}-1}^a \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

$$Sx_i = \sum_{j=1}^n w_{ij,k} \begin{bmatrix} H_{ij}^a F_{ij}^a \\ H_{ij}^a F_{ij}^{a_2} \\ \vdots \\ H_{ij}^a F_{ij}^{a_{N_{pi}}} \end{bmatrix} \hat{X}_{ij,k|k}^a,$$

式中: 下角标 ij 表示第 i 台发电机组第 j 个模型, N_{pi} 和 N_{ui} 分别为第 i 个发电机组的预测时域和控制时域.

作者简介:

李晓明 (1982–), 男, 博士研究生, 工程师, 目前研究方向为新能源电力系统建模与控制, E-mail: lixiaoming@ncepu.edu.cn;

牛玉广 (1964–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 新能源电力系统国家重点实验室副主任, 目前研究方向为大型火电机组优化与控制、新能源电力系统建模与控制、故障诊断, E-mail: nyg@ncepu.edu.cn;

王世林 (1987–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为大系统优化与控制、故障诊断, E-mail: wangshilin@ncepu.edu.cn;

林忠伟 (1981–), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为随机控制、预测控制、系统辨识, E-mail: lzw@ncepu.edu.cn;

李明扬 (1983–), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向新能源电力系统建模与控制、虚拟发电厂, E-mail: limy@ncepu.edu.cn.