

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

杨德友, 蔡国伟

(东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Decentralized Model Predictive Control Based Load Frequency Control for High Wind Power Penetrated Power Systems

YANG Deyou, CAI Guowei

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Because of the fluctuations of wind power, the much higher request is put forward for the load frequency control (LFC). After analyzing the characteristic of the output of wind generator and wind farm, the LFC model with the consideration of the wind power fluctuations was developed firstly. Then the multivariable decentralized model predictive control (DMPC) was proposed for the design of the LFC controllers to be against the wind power fluctuations based on the wide area measurement system (WAMS). The effectiveness and robustness of the presented decentralized MPC based LFC (DMPC-LFC) schemes were investigated carrying out on a two area test system with high penetration of wind power under various disturbance scenarios. Finally, a comparison between the presented schemes and conventional PI-LFC controllers has been done to represent the advantages of the proposed LFC scheme. Simulation results demonstrate that the proposed DMPC-LFC control scheme can provide better control performance than the conventional PI-LFC scheme. The fluctuations of wind power can be tracked accurately by using the proposed DMPC-LFC control scheme, thus the system frequency can be maintained to its nominal.

KEY WORDS: wind farm; load frequency control (LFC); model predictive control (MPC); decentralized control; automatic generation control (AGC)

摘要: 由于风电输出功率具有较强的随机性, 规模化风电场/群的并网对互联电网负荷频率控制提出了更高的要求。在

分析单一风电机组及规模化风电场有功输出特点的基础上, 建立计及风电场/群有功输出的互联电网负荷频率控制模型。以广域相量测量系统为技术平台, 建立基于模型预测控制的含规模化风电场/群互联电网的负荷频率分散预测控制模型。以典型双区域负荷频率控制模型为例, 考虑不同风电渗透率情况。仿真研究结果表明, 所提基于模型预测控制的负荷频率分散控制模型不但能够有效地跟踪风电输出功率的随机波动, 维持系统频率及区域间交换功率在较小的范围内变化, 并且控制效果明显优于常规 PI 型负荷频率控制器。

关键词: 风电场; 负荷频率控制; 模型预测控制; 分散控制; 自动发电控制

0 引言

作为发展最快的清洁能源形式, 规模化风电的利用已显现出明显的社会效益和环境效益^[1-2]。风电输出功率具有较强的不确定性, 且难于预测, 使得规模化风电的并网对电力系统运行的安全稳定提出了挑战^[3]。其中, 以有功平衡为基础的系统频率受风电有功输出不确定性的影响最为显著, 这也对互联电网负荷频率控制(load frequency control, LFC)提出了更高的要求^[4-5]。

区别于传统发电形式, 风电有功输出的可控性较差。虽然研究表明, 通过桨矩角控制能够实现风电有功输出的控制^[6-7], 但是由于风电的原动力(既风能)难以准确预测和控制, 使得风电有功输出的调节范围十分有限。同时, 现有主力风电机组(双馈感应风电机组和永磁同步风力发电机组)多采用有功解耦控制, 无法有效跟踪电网侧的频率变化。文献[8]将风电有功输出叠加至区域控制偏差(area

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177010, 51377017); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1114); 吉林省自然科学基金(20125164)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51177010, 51377017); Changjiang Scholars, Innovative Research Team in University (IRT1114); Natural Science Foundation of Jilin Province (20125164).

control error, ACE)信号中,通过ACE信号的变化反应风电不确定性对系统负荷频率控制的影响,该模型增加了作为控制器输入的ACE信号的不确定性,增大了基于模型的负荷频率控制器设计的难度。文献[9]根据常规发电机组动态轨迹,设计实现了以全状态时域仿真为基础的含高渗透率风电互联电网自动发电控制(automatic generation control, AGC)策略,但所提出的控制方法未计及ACE信号,具有一定的局限性。

模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种基于系统模型的优化控制技术,鉴于其易于建模且鲁棒性好,模型预测控制在建筑物节能控制、飞行控制、卫星姿态控制等复杂系统控制中得到了广泛应用^[10]。模型预测控制根据当前系统状态和未来输出状态,通过某一性能指标(如预测输出轨迹与参考轨迹的偏差)的最优来确定当前的控制动作,具有很强的预见性,控制效果优于经典反馈控制^[11]。

本文在对规模化风电场/群有功输出特征分析的基础上,将风电有功功率波动作为随机项引入互联电网负荷频率控制模型中,建立计及风电有功输出波动性的负荷频率控制模型。进而以广域相量测量系统(wide area measurement system, WAMS)为信息和技术平台,引入在负荷频率控制领域取得良好效果的模型预测控制技术^[12-13],提出含规模化风电场/群互联电网的广域分散预测控制模型,该模型充分集成了广域相量测量系统信息传输迅速可靠、覆盖面广和模型预测控制控制效果好、鲁棒性强的优点。最后,对不同风电渗透率情况下的双区域互联电网负荷频率控制进行仿真。

1 计及风电不确定性的互联电网负荷频率控制模型

1.1 风电场/群有功输出特性

图1(a)、(b)分别为某风电场单台机组和整个风电场有功输出的标幺值曲线。从图1可以看出,单台风电机组的有功输出的随机性较强,主要原因在

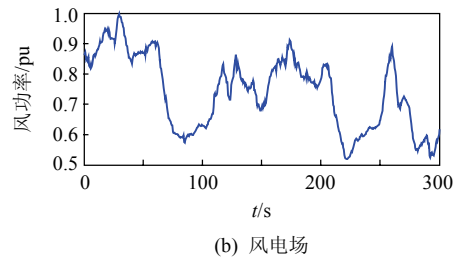
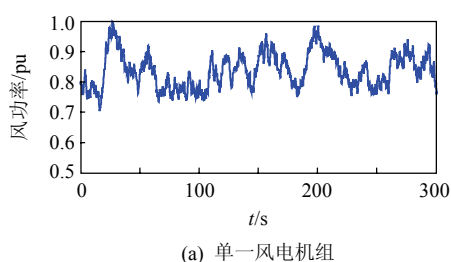


图1 某风电机组及风电场输出特性

Fig. 1 Output of wind generator and wind farm

于风电机组多采用桨矩角控制,跟踪最大功率输出,但由于风电场/群汇集效应^[14-15]和风电机组叶轮自身的转动惯性的存在,风电场/群有功输出的随机性能够在一定程度上得到平抑,因此,影响电网频率变化的风功率主要集中在中、低频范围内^[16]。

1.2 考虑风电不确定性的负荷频率控制模型

电力系统频率变化主要取决于系统总的有功功率平衡状态^[17]。对于含规模化风电场/群的电力系统,系统遭受有功扰动后的能量守恒方程可表示为

$$\Delta P_e - \Delta P_{\text{wind}} = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (1)$$

式中: ΔP_e 为发电机电磁功率变化量; ΔP_{wind} 为风电有功输出与预测值间之间的偏差; ΔP_L 为有功负荷变化量; $D\Delta\omega$ 为有功负荷与频率相关部分的变化量。

则系统的转子运动方程可以描述为

$$\sum \Delta P_g - \Delta P_{\text{wind}} - \Delta P_L = 2Hs\Delta\omega + D\Delta\omega \quad (2)$$

式中: $\sum \Delta P_g$ 为系统内全部发电机机械功率变化量; H 为系统等效转动惯量; $\Delta\omega$ 为系统频率偏差。

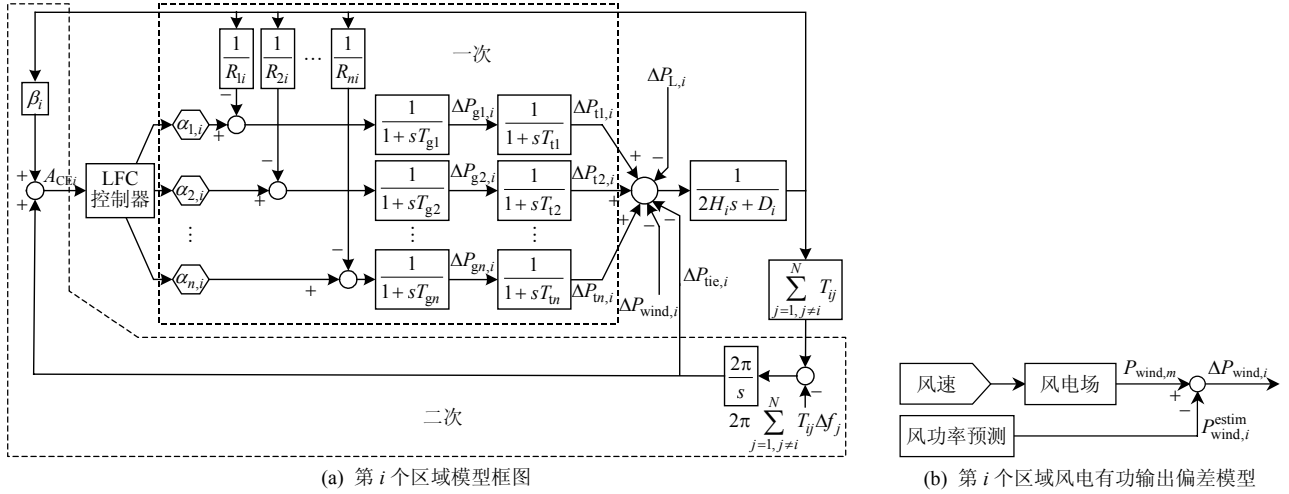
对于区域互联系统,维持各区域频率在额定值附近与控制联络线上的交换功率在协议规定数值的任务主要由AGC系统完成^[18]。由于现有多数风电机组运行过程中,采用是有功与电网频率间解耦控制,为了简化分析并方便控制器设计,本文将对互联电网频率影响较大的风电有功功率的中、低频分量作为随机项引入互联电网负荷频率控制模型中。规模化风电场/群并网后,含AGC的互联系统负荷频率控制模型如图2所示。

如图2所示, N 区域电力系统第 i 个区域的动态过程为:

调速器:

$$\Delta \dot{P}_{gk,i} = -\frac{1}{T_{gk,i}} \Delta P_{gk,i} + \frac{1}{T_{gk,i}} \left(-\frac{1}{R_{k,i}} \Delta f_i + \alpha_{k,i} \Delta P_{C,i} \right) \quad (3)$$

汽轮机:

图2 含规模化风电场/群互联电网第 i 个区域负荷频率控制模型Fig. 2 Diagram of the i th control area with the consideration of wind power

$$\Delta \dot{P}_{tk,i} = -\frac{1}{T_{tk,i}} \Delta P_{tk,i} + \frac{1}{T_{tk,i}} \Delta P_{gk,i} \quad (4)$$

发电机:

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{D_i}{2H_i} \Delta f_i + \frac{1}{2H_i} \left(\sum_{k=1}^n \Delta P_{tk,i} - \Delta P_{tie,i} - \Delta P_{L,i} - \Delta P_{wind,i} \right) \quad (5)$$

区域间联络线功率偏差:

$$\Delta P_{ij} = T_{ij} (\Delta \delta_i - \Delta \delta_j) \quad (6)$$

式中 $\Delta \delta_i$ 和 $\Delta \delta_j$ 分别为联络线两端相角变化量。又有 $\Delta \dot{\delta}_i = 2\pi \Delta f_i$, 则区域 i 与外区域间有功交换的变化率可表示为

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta \dot{P}_{ij} = 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (7)$$

第 i 个控制区域的状态空间模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{F}_i \mathbf{w}_i \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\dot{\mathbf{x}}_i = [\Delta f \quad \Delta P_{tie,i} \quad \Delta P_{t1,i} \quad \cdots \quad \Delta P_{tn,i} \quad \Delta P_{g1,i} \quad \cdots \quad \Delta P_{gn,i}]^T$; $\mathbf{y}_i = A_{CE}$; $\mathbf{u}_i = \Delta P_{c,i}$; $\mathbf{w}_i = [v_{1,i} \quad v_{2,i} \quad v_{3,i}]^T =$

$$[\Delta P_{L,i} \quad \Delta P_{wind,i} \quad \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} \Delta f_j]; \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{i11} & \mathbf{A}_{i12} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{i22} & \mathbf{A}_{i23} \\ \mathbf{A}_{i31} & 0 & \mathbf{A}_{i33} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_i = [0 \quad 0 \quad \mathbf{B}_{i3}]^T; \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} -1/(2H_i) & 0 & 0 \\ 0 & -1/(2H_i) & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_i =$$

$$[\beta_i \quad 1 \quad 0 \quad 0]。其中: \mathbf{A}_{i11} = \begin{bmatrix} -D_i/(2H_i) & -1/(2H_i) \\ -2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} \Delta f_j & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{i12} = \begin{bmatrix} 1/(2H_i) & \cdots & 1/(2H_i) \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{i22} = -\mathbf{A}_{i23} =$$

$$\text{diag}[-1/T_{t1,i} \quad \cdots \quad -1/T_{tn,i}]; \quad \mathbf{A}_{i31} = \begin{bmatrix} -1/(T_{g1,i} R_{li}) & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -1/(T_{gn,i} R_{ni}) & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{i33} =$$

$$\text{diag}[-1/T_{g1,i} \quad \cdots \quad -1/T_{gn,i}]; \quad \mathbf{B}_{i3} = [\alpha_{1,i}/T_{g1,i} \quad \cdots \quad \alpha_{n,i}/T_{gn,i}]^T, \quad \sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} = 1。$$

各个区域的 AEC 信号由本区域的频率偏差和净交换功率偏差综合构成, 定义 AEC 为

$$A_{CEi} = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (9)$$

由图2可以看出, LFC 控制器输出可表示为 ACE 信号的函数:

$$u_i = \Delta P_{c,i} = f_i(A_{CEi}) \quad (10)$$

式(8)—(10)共同构成了含规模化风电场/群互联电网负荷频率控制模型。

式(3)—(10)参数说明参见附录A中表A1。

2 分散 LFC 预测控制算法

2.1 预测模型

模型预测控制器设计过程中, 需首先将线性化模型进行离散化处理。在本文建立的计及风电有功输出随机性的互联电网负荷频率控制模型中, 将风电有功输出、负荷扰动以及与被研究区域 i 相关联的联络线功率均作为随机扰动进行处理, 则区域 i 的离散化状态方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{A}_{i,d} \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{B}_{i,d} \mathbf{u}_i(k) \\ \mathbf{y}_i(k+1) = \mathbf{C}_{i,d} \mathbf{x}_i(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $A_{i,d}$ 、 $B_{i,d}$ 和 $C_{i,d}$ 分别为连续状态空间模型式(8)离散化后对应的状态矩阵、控制矩阵及观测矩阵。

根据模型控制算法原理, 首先需要根据系统当

$$\begin{cases} y_i(k+1|k) = C_{i,d}A_{i,d}x_i(k) + C_{i,d}B_{i,d}u_i(k|k) \\ y_i(k+2|k) = C_{i,d}A_{i,d}x_i(k+1) + C_{i,d}B_{i,d}u_i(k+1|k) = C_{i,d}A_{i,d}^2x_i(k) + C_{i,d}A_{i,d}B_{i,d}u_i(k|k) + C_{i,d}B_{i,d}u_i(k+1|k) \\ \vdots \\ y_i(k+N_p|k) = C_{i,d}A_{i,d}^{N_p}x_i(k) + C_{i,d}A_{i,d}^{N_p-1}B_{i,d}u_i(k|k) + \cdots + C_{i,d}(A_{i,d}^{N_p-N_u} + \cdots + I)B_{i,d}u_i(k+N_u-1|k) \end{cases} \quad (12)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} C_{i,d}B_{i,d} & 0 & \cdots & 0 \\ C_{i,d}A_{i,d}B_{i,d} & C_{i,d}B_{i,d} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_{i,d}A_{i,d}^{N_p-1}B_{i,d} & C_{i,d}A_{i,d}^{N_p-2}B_{i,d} & \cdots & C_{i,d}(A_{i,d}^{N_p-N_u} + \cdots + I)B_{i,d} \end{bmatrix}$$

式中: N_u 为控制时域, $N_u \leq N_p$; $y_i(k+j|k)$ 为 k 时刻预测的 $k+j$ 时刻的系统输出响应, $j=1,2,\dots,N_p$; $u_i(k+j|k)$ 为 k 时刻控制变量的计算值, $j=0,1,\dots,N_u-1$; I 为单位矩阵; 当 $N_u \leq j \leq N_p$ 时, $u_i(k+j|k) = u_i(k+N_u-1|k)$ 。

式(12)的矩阵形式可以表示为

$$Y_i = G_i x_i(k) + H_i U_i \quad (13)$$

式中: $Y_i = [y_i(k+1|k), y_i(k+2|k), \dots, y_i(k+N_p|k)]^T$; $U_i = [u_i(k|k), u_i(k+1|k), \dots, u_i(k+N_u-1|k)]^T$; $G_i = [C_{i,d}A_{i,d}, C_{i,d}A_{i,d}^2, \dots, C_{i,d}A_{i,d}^{N_p}]^T$ 。

式(13)即为区域 i 分散式负荷频率预测控制器中的预测模型。

2.2 滚动优化

模型预测控制算法主要利用预测模型对系统其未来输出进行预测, 并通过优化得到从当前时刻到控制时域内的一系列的控制动作, 但在每个预测周期只实施优化得到的控制序列中的第1个控制, 到下一个预测周期重复前面的步骤重新计算控制动作序列^[19]。可见, 模型预测控制就是不断滚动的局部优化和不断滚动实施控制作用的交替过程。

控制时域内, 区域 i 的负荷频率控制器二次性能指标函数为

$$\begin{cases} J = \min(Y_r - Y_i)^T Q(Y_r - Y_i) + U_i^T R U_i \\ \text{s.t.} \quad x_{i,\min} \leq x_i(k) \leq x_{i,\max} \\ y_{i,\min} \leq y_i(k) \leq y_{i,\max} \\ u_{i,\min} \leq u(k) \leq u_{i,\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: Y_r 为被控系统在目标时域的参考响应(本文中为 ACE 信号的控制目标, 其值为 0); Q 和 R 为对角加权矩阵。

将式(13)代入式(14)可得:

前时刻(即 k 时刻)的状态信息 $x_i(k+1)$ 及状态方程(11), 在预测时域 N_p 内对系统响应 $y_i(k+N_p|k)$ 进行预测, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} J = \min(Y_r - G_i x_i(k))^T Q(Y_r - G_i x_i(k)) - 2U_i^T H_i^T Q(Y_r - G_i x_i(k)) + U_i^T (H_i^T Q H_i + R) U_i \\ \text{s.t.} \quad x_{i,\min} \leq x_i(k) \leq x_{i,\max} \\ y_{i,\min} \leq y_i(k) \leq y_{i,\max} \\ u_{i,\min} \leq u(k) \leq u_{i,\max} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)及约束条件构成了二次规划问题, 采用滚动优化策略, 取最优控制序列的第一个元素作为系统实际控制动作。在 $k+1$ 时刻, 重新测量系统状态信息, 再次启动优化程序, 并重复上述过程。

2.3 基于广域信息的分散负荷频率控制

基于分散式 MPC 的 LFC 对电力系统运行状态信息的采集及传输的快速性和准确性提出了更高的要求。以全球定位系统(global positioning system, GPS)为基础的 WAMS 的广泛应用为基于分散式 MPC 的 LFC 提供可靠的数据平台^[20]。

图3为基于 WAMS 的互联电网 LFC 分散预测控制策略框图。图3所示的 LFC 控制策略中, 主要由 WAMS 平台向分散在各个区域内 MPC 控制器提供系统状态信息和 ACE 信号, 各 MPC 控制器根据系统状态信息和 ACE 信号计算得到相应的控制量, 并分配至区域内 AGC 机组, 从而实现互联电网 LFC 的分散预测控制。

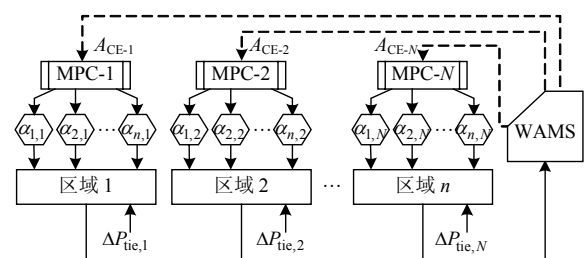


图3 基于广域信息的互联电网负荷频率分散预测控制框图

Fig. 3 Proposed DMPC-LFC scheme based on WAMS

3 仿真计算

3.1 仿真参数

为验证本文设计的基于 WAMS 的 LFC 分散预测控制策略在处理含规模化风电场/群的互联电网负荷频率控制问题的有效性,通过 Matlab/Simulink 软件对如图 4 所示的含风电双区域 LFC 系统进行了仿真研究。系统参数见附录 A 中表 A2。

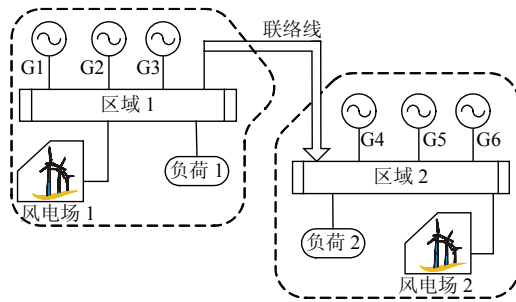


图 4 双区域 LFC 仿真系统

Fig. 4 Diagram of interconnected two-area power system

在模型预测控制算法中,需首先确定预测时域 N_p 、控制时域 N_u 及对角加权矩阵 Q 和 R 。依据 MPC 算法控制参数选取的一般原则^[10,21],经多次仿真比较,确定本文中 MPC 控制器相关参数如下:离散点间隔为 0.1 s,预测时域 $N_p=50$,控制时域 $N_u=10$,输出权矩阵 $Q=1 \times I_{N_p \times N_p}$,控制权矩阵 $R=0.1 \times I_{N_u \times N_u}$ 。

仿真中分别考虑了单一区域风功率波动和双区域风功率波动两种情况以及负荷突增扰动,并将本文提出的分散式 LFC 预测控制策略(DMPC-LFC)与常规 PI 型 LFC 控制策略(PI-LFC)的控制效果进行了对比分析。

3.2 风功率随机波动

1) 单区域风功率随机波动。

假设如图 4 所示双区域互联系统中,只有区域 1 内含有规模化风电场/群,区域 2 内无风电接入。在计及风电场/群汇聚效应的基础上,根据文献[14]中的方法,生成风功率序列。生成的风功率与预测值间偏差的标幺值(基准功率为 100 MVA)如图 5 所示。

利用本文建立的计及风功率波动的互联电网 LFC 模型及 DMPC-LFC 控制策略对图 5 所示风功率随机波动情况下,双区域系统频率动态过程进行仿真,区域 1 及区域 2 的 LFC 响应如图 6—8 所示。观察图 5 所示的风功率波动特性及图 6 所示的动态频率响应曲线,可以看出,本文建立的计及风功率

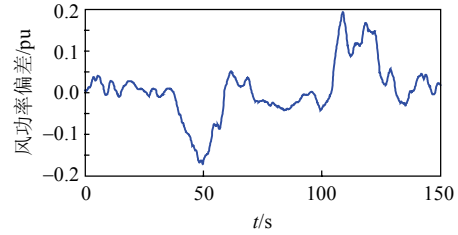


图 5 风功率与预测值间偏差标幺值曲线

Fig. 5 Wind power deviation (pu) in area 1

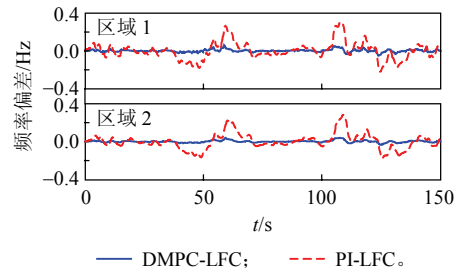


图 6 单一区域风功率波动时的频率响应

Fig. 6 Frequency responses for signal area integrated wind power

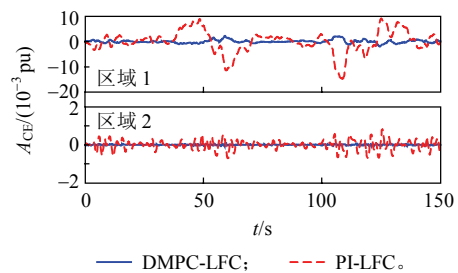


图 7 单一区域风功率波动时的 ACE 响应

Fig. 7 ACE responses for signal area integrated wind power

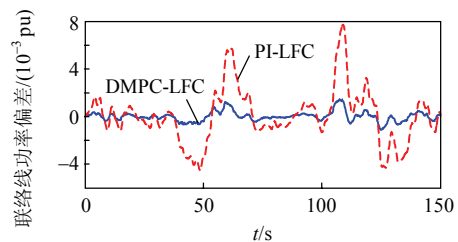


图 8 单一区域风功率波动时的联络线功率响应

Fig. 8 Tie-line active power responses for signal area integrated wind power

波动的互联电网 LFC 模型能够很好的反映规模化风电场/群有功输出随机波动对系统 LFC 动态响应的影响。

由图 6—8 可见,在区域 1 内风电有功输出随机波动时,本文提出的 DMPC-LFC 策略能够很好的跟踪风功率波动,为区域内 AGC 机组提供适应

风电功率随机波动的最优控制量,进而保证系统频率和 ACE 在较小范围内波动,而常规 PI-LFC 控制策略中,系统频率恢复速度较慢,系统频率和 ACE 的变化范围较大,PI-LFC 控制策略不能够保持系统频率在安全运行限值内,无法保证规模化风电场/群并网后系统的安全稳定运行。

2) 双区域风功率随机波动。

为了深入分析高渗透率情况下本文提出的 DMPC-LFC 控制策略的控制效果,考虑如图 9 所示的风功率偏差随机波动分别接入区域 1 和区域 2 时。在两个区域均有风电接入的情况下,2 个区域内的风电波动功率会出现“叠加”和“抵消”现象,从而增大或减小接入全系统风电有功输出的波动幅值。如图 9 所示,在时段 1 和时段 2 内分别出现了功率“叠加”和“抵消”现象。

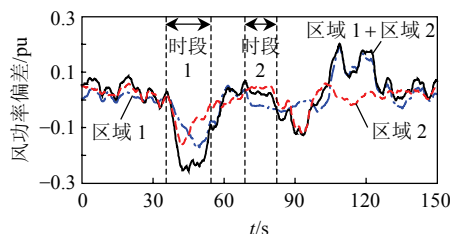


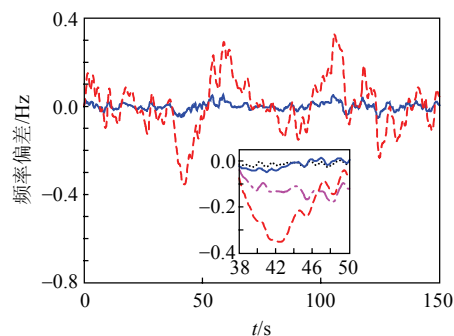
图 9 区域 1 和区域 2 内风功率与预测值间偏差标幺值曲线

Fig. 9 Wind power deviation (pu) in area 1 and are 2

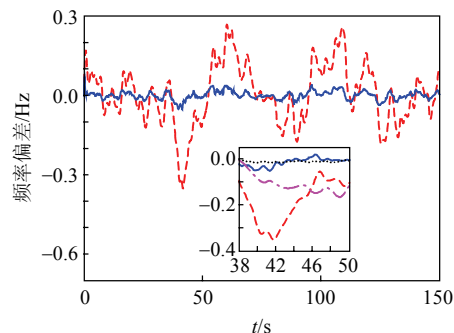
双区域风功率波动情况下,算例互联系统的 LFC 动态过程和控制效果如图 10—12 所示。其中图 10 中的子图为单一区域风功率波动和双区域风功率波动两种情况下,在两个区域风功率出现“叠加”现象时段的控制效果对比。

由如图 10—12 可以看出:在时段 1 内的 LFC 动态响应中,系统频率变化的幅值明显大于单一区域接入风电的情况,主要原因在于时段 1 内两个区域内的风功率波动产生了叠加,增大了功率波动幅值。

图 10—12 所示仿真结果表明:在风电接入容量较大的情况下,本文提出的 DMPC-LFC 控制策略同样能够有效的跟踪风功率的随机变化,将频率和区域间交换功率波动维持在较小的范围内,而常规 PI-LFC 控制策略无法快速跟踪风功率的随机变化,不能够保证系统频率在安全运行范围内,无法保证系统的安全稳定运行。同时,由图 10 子图可以看出,在单区域风功率波动和双区域风功率波动(2 个区域风功率出现“叠加”现象时段扰动最大)两种情况下,本文提出的 DMPC-LFC 控制策略都能够取得理想的控制效果,且控制效果较为接近;



(a) 区域 1



(b) 区域 2

— 双区域风功率波动+PI-LFC; — 单区域风功率波动+PI-LFC;
— 双区域风功率波动+DMPC-LFC;
····· 单区域风功率波动+DMPC-LFC。

图 10 双区域风功率波动时的频率响应

Fig. 10 Frequency responses for two areas integrated wind power

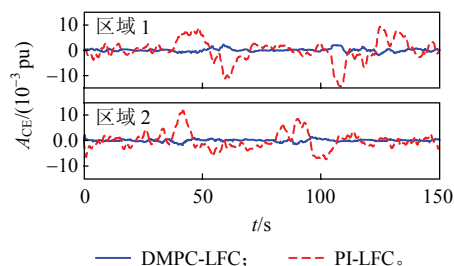


图 11 双区域风功率波动时的 ACE 响应

Fig. 11 ACE responses for two areas integrated wind power

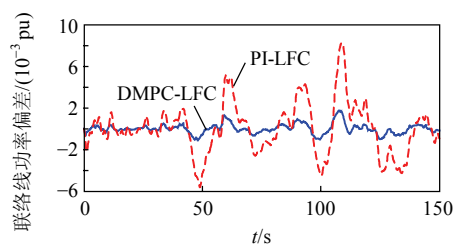


图 12 双区域风功率波动时的联络线功率响应

Fig. 12 Tie-line active power responses for two area integrated wind power

而随着扰动的增大,常规 PI-LFC 控制策略的控制

效果与理想状态的偏差也逐渐增大,且两种情况下的控制效果相差较大,该结果表明本文提出的 DMPC-LFC 控制策略具有较强的适应性,在不同的风功率扰动情况下均能够取得理想的控制效果。

3.3 负荷突增

为了进一步验证本文提出的 DMPC-LFC 控制策略适应性,本节对负荷突增扰动情况下算例系统的 LFC 动态过程和响应进行了计算和分析。对算例系统施加如图 13 所示的负荷突增扰动,区域 1 及区域 2 的 LFC 动态过程和响应如图 14—16 所示。

由如图 14—16 所示仿真结果可以看出,本文提出的 DMPC-LFC 控制策略对负荷突增扰动同样有效,且频率恢复时间和频率偏差幅值等控制效果明显优于常规 PI-LFC 控制策略。结果表明本文提出的 DMPC-LFC 控制策略不仅能够跟踪风功率的随机波动,同时对典型负荷突增扰动同样有效,进

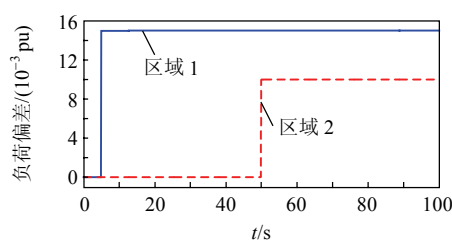


图 13 负荷突增标么值曲线(基准功率为 100 MVA)

Fig. 13 Load disturbance (pu) (base is 100 MVA)

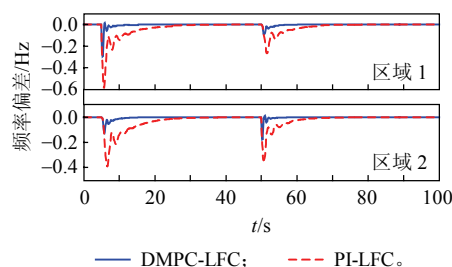


图 14 负荷突增时的频率响应

Fig. 14 Frequency responses for load disturbance

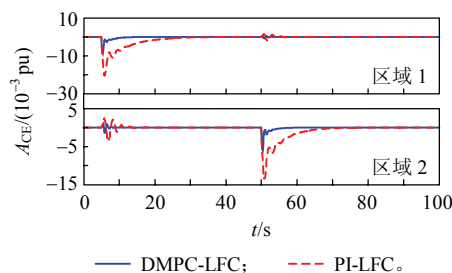


图 15 负荷突增时的 ACE 响应

Fig. 15 ACE responses for load disturbance

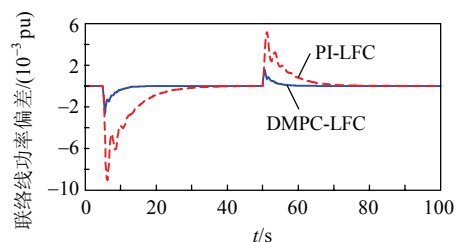


图 16 负荷突增时的联络线功率响应

Fig. 16 Tie-line active power responses for load disturbance

一步验证了提出的 DMPC-LFC 控制策略的适应性。

4 结论

本文针对规模化风电场/群并网后互联电网负荷频率控制问题,建立了计及风功率波动的互联电网 LFC 模型,该模型中将风功率波动作为随机项并入传统互联电网 LFC 模型中,有效地避免了将风功率波动叠加至 ACE 信号中引起的模型不确定性增大问题。同时以模型预测控制器技术为基础,提出了 DMPC-LFC 控制策略。2 种不同风电渗透率情况下的仿真结果表明:

1) 本文建立的计及风功率波动的互联电网 LFC 模型能够真实的反映风功率波动对互联电网 LFC 动态响应的影响;

2) 本文提出的 DMPC-LFC 控制策略能够有效的跟踪风功率的随机波动,维持系统频率和区域间交换功率在较小的范围内波动,控制效果明显优于常规型 PI-LFC 控制策略。

提高风功率预测精度是优化含规模化风电场/群互联电网负荷频率控制效果的另一有效手段,本文提出的 DMPC-LFC 控制策略是建立在风功率预测精度能够满足应用要求的基础上的,研究并建立适应于本文控制策略的高精度风功率预测模型是今后需要进一步开展的研究工作。

参考文献

- [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): 1-9.
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): 1-9(in Chinese).
- [2] Global Wind Energy Council. Global installed wind power capacity (MW): regional distribution 2009[R/OL]. [2009-05-06]. <http://www.gwec.net>.
- [3] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的

- 相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9(in Chinese).
- [4] Bevrani H. Robust power system frequency control[M]. New York: Springer, 2009: 191-206.
- [5] 韩民晓, 崔立军, 姚蜀军, 等. 大量风电引入电网时的频率控制特性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 29-33. Han Minxiao, Cui Lijun, Yao Shujun, et al. Frequency control characteristics for a power system with large amounts of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 29-33(in Chinese).
- [6] G Lalor, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [7] Moutis P, Papathanassiou S A, Hatziaargyriou N D. Improved load-frequency control contribution of variable speed variable pitch wind generators[J]. Renewable Energy, 2012, 48(12): 514-523.
- [8] Bevrani H, Daneshmand P R. Fuzzy logic-based load-frequency control concerning high penetration of wind turbines[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 173-180.
- [9] Varianni M H, Tomsovic K. Distributed automatic generation control using flatness-based approach for high penetration of wind generation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2013, 28(3): 3002-3009.
- [10] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 127-173. Shu Diqian. Predictive control system and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 127-173(in Chinese).
- [11] 刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制: 现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 79-85. Liu Xiangjie, Kong Xiaobing. Present situation and prospect of model predictive control application in complex power industrial process[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 79-85(in Chinese).
- [12] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于多变量广义预测理论的互联电力系统负荷频率协调控制体系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 101-107. Wu Yunliang, Sun Yuanzhang, Xu Jian, et al. Coordinated load-frequency control system in interconnected power system based on multivariable generalized predictive control theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 101-107(in Chinese).
- [13] Mojtaba Shiroei, Mohammad Reza Toulabi, Ali Mohammad Ranjba. Robust multivariable predictive based load frequency control considering generation rate constraint[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46(3): 405-413.
- [14] 穆钢, 崔杨, 严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 15-19. Mu Gang, Cui Yang, Yan Gangui. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 15-19(in Chinese).
- [15] Thomas Ackermann. Wind power in power systems[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005: 34-40.
- [16] Luo C, Ooi B. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-716.
- [17] Kundur P. Power system stability and control[M]. The EPRI Power System Engineering Series Book, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994: 581-623.
- [18] 周京阳, 于尔铿. 能量管理系统(EMS)第5讲 自动发电控制[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 75-78. Zhou Jingyang, Yu Erkeng. Energy management system (EMS) part five: automatic generation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 75-78(in Chinese).
- [19] 平续斌, 丁宝苍, 韩崇昭. 动态输出反馈鲁棒模型预测控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(1): 31-37. Ping Xubin, Ding Baocang, Han Chongzhao. Dynamic output feedback robust model predictive control[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(1): 31-37(in Chinese).
- [20] Terzija V, Valverde G., Cai Deyu, et al. Wide-area monitoring, protection and control of future electric power networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 80-93.
- [21] 童一飞, 金晓明. 基于广义预测控制的循环流化床锅炉燃烧过程多目标优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 38-43. Tong Yifei, Jin Xiaoming. Optimal control of multi-objective in circulating fluidized bed boiler combustion process based on generalized predictive control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 38-43(in Chinese).

附录 A

表 A1 参数说明

Tab. A1 Introduction of parameters	
变量	注释
Δf_i	区域 i 的频率偏差(相对额定频率)
$\Delta P_{tk,i}$	气门开度变化量
$\Delta P_{gk,i}$	汽轮机输出功率变化量
$\Delta P_{tie,i}$	与区域 i 联接的联络线功率偏差
$\Delta P_{L,i}$	负荷偏差

变量	注释
$\Delta P_{wind,i}$	风功率偏差
H_i	区域 i 等效转动惯量
D_i	区域 i 内负荷调节系数
$T_{gk,i}$	调速器时间常数
$T_{tk,i}$	汽轮机时间常数
$R_{k,i}$	发电机下垂特性系
$\alpha_{k,i}$	发电机机斜坡因子

表 A2 两区域算例系统参数

Tab. A2 Parameter of interconnected two-area power system									
参数	额定容量/MW	$D/(\text{pu}/\text{Hz})$	$T_p/(\text{pu}/\text{s})$	T_I/s	T_H/s	$R/(\text{Hz}/\text{pu})$	α	$B/(\text{pu}/\text{Hz})$	$T_{12}/(\text{pu}/\text{Hz})$
G1	1 000	0.015	0.166 7	0.40	0.08	3.000 0	0.4	$B_1 = 1.207\ 6$	0.18
G2	800	0.014	0.120 0	0.36	0.06	3.000 0	0.4		
G3	1 000	0.015	0.200 0	0.42	0.07	3.300 0	0.2		
G4	1 100	0.016	0.2017	0.44	0.06	2.727 3	0.6	$B_2 = 1.414\ 1$	
G5	900	0.014	0.150 0	0.32	0.06	2.666 7	0.0		
G6	1 200	0.014	0.196 0	0.40	0.08	2.500 0	0.4		



杨德友

收稿日期：2014-08-06。

作者简介：

杨德友(1983)，男，博士研究生，实验师，主要从事电力系统稳定与控制、新能源电力系统控制技术方面的教学和研究工作，eedyyang@hotmail.com；

蔡国伟(1968)，男，工学博士，教授，博士生导师，主要从事电力系统稳定与控制、电力系统规划及新能源并网技术方面的教学和研究工作，caigw@mail.nedu.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)