

含大型风电场的弱同步电网协调控制策略

李超¹,王洪涛¹,韦仲康²,王春义³

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053; 3. 国网山东省电力有限公司, 山东 济南 250001)

摘要: 针对含大型风电场的弱同步电网频率稳定问题, 提出了一种基于模型预测控制(MPC)技术的风电机组多模型预测控制(MMPC)调频控制策略。该控制策略根据风速条件设定预测模型库, 能够在不同风速条件下协调控制桨距角与发电机转矩改变风电机组出力响应弱电网频率的变化, 从而有效提升风电机组的频率调节能力。同时, 针对弱同步电网的电压稳定问题, 引入静止同步补偿器(STATCOM)建立中心控制系统。通过中心控制系统实时的有功-无功协调控制, 可以保证在负荷波动和故障情况下风电机组不脱网并维持弱电网电压和频率的稳定。仿真分析表明所提出的控制策略的有效性。

关键词: 弱同步电网; 风电场; 多模型预测控制; 静止同步补偿器; 协调控制; 稳定性; 频率稳定; 电压稳定

中图分类号: TM 73; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.014

0 引言

近年来, 风电机组单机容量和风电场规模不断增大。由于良好的风源地一般位于远离负荷中心的位置, 大型风电场只能通过长线路接入电压和频率稳定性较差的弱同步电网。风电场逐渐成为弱同步电网中重要甚至单一的功率源, 维持弱同步电网公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)处电压和频率稳定成为风电场目前亟需解决的问题^[1-2]。

目前, 风电场多采用变速恒频运行的双馈感应发电机 DFIG(Doubly Fed Induction Generator), DFIG 可以通过转子励磁电流的调节实现有功、无功的解耦控制。当负荷波动或故障发生时, 弱电网不能像强电网一样对系统提供足够的功率支持, 这时 DFIG 风电场需要依靠有效的控制策略保证在弱电网环境下能够稳定运行, 同时向电网提供有功和无功的支撑^[3-6]。

基于 DFIG 的风能转换系统 WECS(Wind Energy Conversion System)是一个强耦合性多输入多输出 MIMO(Multiple-Input-Multiple-Output)系统, 其具有非线性、多约束性和风速的波动性等特点, 使得 WECS 的控制任务十分艰巨。变速恒频风电机组参与调频时, 通常采用比例-积分(PI)控制对发电机转速和有功功率进行控制^[7-9], 但 PI 控制无法有效应对系统的非线性。为此, 文献[10]采用变增益线性二次高斯控制调整 PI 参数, 能够改善 PI 控制的控制效果。但

PI 控制无法考虑系统特定的约束条件, 并且无法适应风速变化时有功与转速之间的良好协调控制。因此, 当传统的 PI 控制应用到风电机组调频控制中, 难以保证系统的强鲁棒性和高效率。针对 WECS 的非线性和多约束性等特点, 模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)能够很好地解决 MIMO 的控制问题^[11-14]。文献[14]针对不同的风速区间, 提出采用 MPC 协调控制桨距角和电磁转矩的方法, 相对于 PI 控制起到了良好的控制效果, 但该技术还没有应用到风电机组的调频控制中。MPC 算法适用性强, 且控制效果好、鲁棒性强, 便于考虑各种实际约束, 因此在解决 WECS 控制优化方面具有良好的应用前景^[15-17]。

本文提出了一种基于 MPC 技术的风电场多模型预测控制 MMPC(Multi-Model Predictive Control)调频控制策略。通过 MMPC 策略, 可实现基于 DFIG 的 WECS 在风速变化时系统性能的优化控制, 提升风电场的调频能力和稳定性。同时, 引入 STATCOM 建立中心控制系统, 通过中心控制系统实时的有功-无功协调控制, 可保证弱电网在负荷波动和故障情况下风电机组不脱网并维持电网电压和频率的稳定。

1 基于 DFIG 的 WECS 及模型

如图 1 所示, 基于 DFIG 的 WECS 模型可表示为相互连接的多个子系统。空气动力学模型表示风电机组将捕获的风能转换为机械能; 传动系统模型表示将叶片上的风轮机转矩作用到发电机组轴上的机械部分; 桨距角控制系统控制风机叶片的桨距角; 电气模型包括发电机、电力电子变换器和发电机控制系统。图中, 输入信号是发电机转矩设定值 T_g^* 和桨距角设定值 β^* , 输出值是发电机转速 ω_g 和有功功率 P_g 。

收稿日期: 2014-05-25; 修回日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177092); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A101)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177092) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A101)

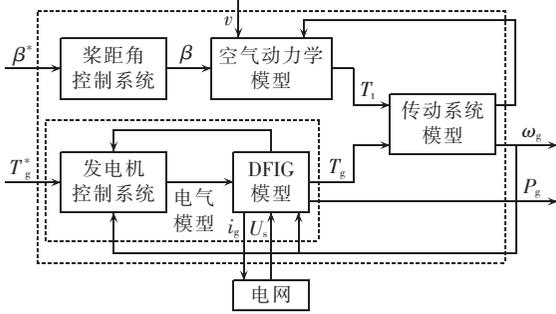


图 1 WECS 模型

Fig.1 WECS model

WECS 模型是非线性的,具体描述如下。

a. 桨距角控制系统。

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta^* \quad (1)$$

其中, τ 为桨距角控制系统时间常数; β 和 β^* 分别为桨距角的实际值和设定值。

b. 空气动力学模型。

$$T_1 = 0.5 \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \rho \pi R^3 v^2 \quad (2)$$

$$C_P(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

其中, T_1 为风轮机转矩; R 为叶片半径; $C_P(\lambda, \beta)$ 为功率因数, 叶尖速比 $\lambda = \omega_1 R / v$, ω_1 为低速转轴转速, v 为风速。

c. 传动系统模型。

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\frac{N_M}{J_1} T_{1\omega} + \frac{1}{J_1} T_1 \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{J_g} T_{1\omega} - \frac{1}{J_g} T_g \quad (6)$$

$$\frac{dT_{1\omega}}{dt} = k_s N_M \omega_1 - k_s \omega_g - \left(\frac{N_M^2 B_s}{J_1} + \frac{B_s}{J_g} \right) T_{1\omega} +$$

$$\frac{N_M B_s}{J_1} T_1 + \frac{B_s}{J_g} T_g \quad (7)$$

其中, J_1 和 J_g 分别为风轮机和发电机的惯性时间常数; $T_{1\omega}$ 为驱动轴的扭转转矩; k_s 和 B_s 分别为低速轴的刚性系数和阻尼系数; N_M 为齿轮比; τ_g 为发电机时间常数; T_g 为发电机转矩; ω_g 为发电机转速。

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{1}{\tau_g} T_g + \frac{1}{\tau_g} T_g^* \quad (8)$$

$$P_g = T_g \omega_g \eta \quad (9)$$

其中, P_g 为发电机输出有功功率; η 为发电效率。发电机和变换器模型采用 PSCAD/EMTDC 软件中给定的模型。

线性化处理如下^[12]:

$$\begin{aligned} \delta T_1 &= L_\omega(\omega_1, v, \beta) \delta \omega_1 + L_v(\omega_1, v, \beta) \delta v + \\ &L_\beta(\omega_1, v, \beta) \delta \beta \end{aligned} \quad (10)$$

$$L_\omega(\omega_1, v, \beta) = \left. \frac{\partial T_1}{\partial \omega_1} \right|_{(\omega_1, v, \beta)}, \quad L_v(\omega_1, v, \beta) = \left. \frac{\partial T_1}{\partial v} \right|_{(\omega_1, v, \beta)}$$

$$L_\beta(\omega_1, v, \beta) = \left. \frac{\partial T_1}{\partial \beta} \right|_{(\omega_1, v, \beta)} \quad (11)$$

其中, δ 为在运行点的微分。由于稳态值 ω_1 和 β 都与 v 有关系, 因此 WECS 的运行点完全由 v 决定。

线性化处理, WECS 的线性状态空间模型可以用式(12)~(14)表示。其中状态矢量、输入量和输出量如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_u \mathbf{u}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_v \delta v(t) \\ \mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{L_\omega}{J_1} & 0 & -\frac{N_M}{J_1} & 0 & \frac{L_\beta}{J_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_g} & -\frac{1}{J_g} & 0 \\ k_s N_M + \frac{N_M B_s}{J_1} L_\omega & -k_s & -\left(\frac{N_M^2 B_s}{J_1} + \frac{B_s}{J_g} \right) & 0 & \frac{N_M B_s}{J_1} L_\beta \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}}_v = \begin{bmatrix} \frac{L_v}{J_1} \\ 0 \\ \frac{N_M B_s}{J_1} L_v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & T_g \\ 0 & 0 \\ 0 & \omega_g \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$\mathbf{x}^{\text{def}} = [\delta \omega_1 \quad \delta \omega_g \quad \delta T_{1\omega} \quad \delta T_g \quad \delta \beta]^T \in \mathbf{R}^5$$

$$\mathbf{u}^{\text{def}} = [\delta T_g^* \quad \delta \beta^*]^T \in \mathbf{R}^2 \quad (15)$$

$$\mathbf{y}^{\text{def}} = [\delta \omega_g \quad \delta P_g]^T \in \mathbf{R}^2$$

通过上式可以看出, WECS 模型是一个 MIMO 模型, 并且系统的动态特性随风速的变化而变化。

2 基于 MMPC 的 DFIG 频率控制

2.1 MPC 基本原理

MPC 利用被控对象的数学模型预测其未来输出, 并通过优化得到从当前时刻到预定预测时间内的一系列控制动作, 但在每个预测周期只实施控制序列中的第一个控制。MPC 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^[18], 其基本原理如图 2 所示。

2.2 基于 MMPC 的 DFIG 频率控制

DFIG 风电机组的减载调频曲线如图 3 所示, 图中各实线代表了一定风速条件(v_1, v_2, v_3 分别表示低、

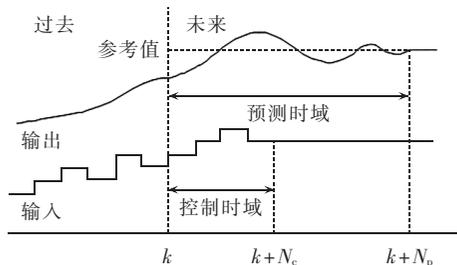


图 2 模型预测控制基本原理

Fig.2 Basic principle of MPC

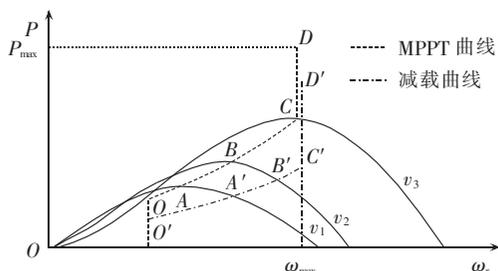


图 3 DFIG 卸载调频曲线

Fig.3 Load shedding and frequency regulation curves of DFIG

中、高 3 种不同的风速条件下,不同桨距角时风电机组输出功率与转子转速间的关系。增大桨距角和运行点右移均可减小风电机组的有功出力,实现卸载运行。但二者适用的情况不同:变桨法多适用于风电机组为额定功率输出的情况,即风速在额定风速以上;超速法适用于风电机组处于非额定功率运行的情况,即风速在额定风速以下^[7-8]。

本文提出的基于 MMPC 的 DFIG 调频控制策略如图 4 所示。该控制策略的主要思想是,不同风速条件下,根据系统给定的初始卸载水平 $d_0\%$,通过优化调节桨距角参考值 β^* 和发电机转矩设定值 T_g^* 跟踪图 3 所示的卸载曲线运行;当系统频率变化时,由频率响应环节调节卸载水平值,优先应用超速法改变风电机组的有功出力,当超速法无法满足卸载需求时再启用变桨法,从而达到维持电网频率稳定的目的。卸载调频过程中,为了应对 WECS 的非线性和风速引起的运行点的不断变化,本文将运行区域分成 M 个子运行区域,每一个运行区域都采用线性的 MPC 进行优化。MMPC 控制策略主要包括模型预

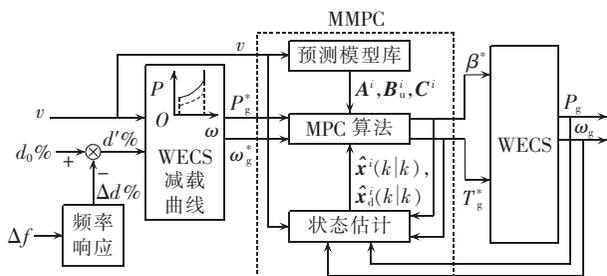


图 4 基于 MMPC 的调频控制策略

Fig.4 Frequency control strategy based on MMPC

测、优化求解和状态估计 3 个部分。

a. 预测模型:包含 M 个 WECS 线性模型的预测模型表达式如式(16)所示,状态矢量 $\mathbf{x}^i(k)$ 、输入矢量 $\mathbf{u}(k)$ 和输出矢量 $\mathbf{y}^i(k)$ 如式(17)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}^i(k+1) = \mathbf{A}^i \mathbf{x}^i(k) + \mathbf{B}_u^i \mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_d^i \mathbf{d}^i(k) \\ \mathbf{y}^i(k) = \mathbf{C}^i \mathbf{x}^i(k) + \mathbf{D}_d^i \mathbf{d}^i(k) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}^i(k) \stackrel{\text{def}}{=} [\delta\omega_i^i(k) \quad \delta\omega_g^i(k) \quad \delta T_{\omega}^i(k) \quad \delta T_g^i(k) \quad \delta\beta^i(k)]^T \in \mathbf{R}^5 \\ \mathbf{u}(k) \stackrel{\text{def}}{=} [\delta T_g^*(k) \quad \delta\beta^*(k)]^T \in \mathbf{R}^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{y}^i(k) \stackrel{\text{def}}{=} [\delta\omega_g^i(k) \quad \delta P_g^i(k)]^T \in \mathbf{R}^2$$

其中, $i=1, 2, \dots, M$ 。

用 2 阶虚拟不可测干扰 $\mathbf{d}^i(k)$ 表示不可测干扰对系统的影响并作为系统的输出,如式(18)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_d^i(k+1) = \bar{\mathbf{A}}^i \mathbf{x}_d^i(k) + \bar{\mathbf{B}}^i n_d(k) \\ \mathbf{d}^i(k) = \bar{\mathbf{C}}^i \mathbf{x}_d^i(k) + \bar{\mathbf{D}}^i n_d(k) \\ \bar{\mathbf{B}}_d = \bar{\mathbf{B}}_u, \bar{\mathbf{D}}_d = 0, \bar{\mathbf{A}} = \bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{I}_2, \bar{\mathbf{D}} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $n_d(k)$ 为高斯白噪声; \mathbf{I}_2 为 2 阶单位矩阵。

式(12)的矩阵可以通过线性连续模型的离散化得出,如式(19)所示。

$$\mathbf{A} = e^{\tilde{\mathbf{A}}T_s}, \quad \mathbf{B}_u = \int_0^{T_s} e^{\tilde{\mathbf{A}}\tau} d\tau \tilde{\mathbf{B}}_u, \quad \mathbf{C} = \tilde{\mathbf{C}} \quad (19)$$

其中, T_s 为采样周期。

联立式(16)~(18),预测模型的增广矩阵如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k+1) \\ \mathbf{x}_d^i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^i & \mathbf{B}_u^i \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}_d^i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_u^i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} n_d(k) \\ \mathbf{y}_k^i(k+1) = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}_d^i(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

b. 优化问题:假设已知 k 时刻的 $\mathbf{x}^i(k)$ 和 $\mathbf{x}_d^i(k)$ 或它们的估计值,则 MMPC 求解的二次优化问题如式(21)~(23)所示。

$$\min_{\Delta T_g^*(k+j), \Delta\beta^*(k+j)} \sum_{j=1}^{N_c} \|\mathbf{e}^i(k+j)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\Delta\mathbf{u}(k+j)\|_{\mathbf{R}}^2 \quad (21)$$

$$\begin{cases} \mathbf{e}^i(k) \stackrel{\text{def}}{=} [\omega_g^*(k) - \omega_g^i(k) \quad P_g^*(k) - P_g^i(k)]^T \\ \Delta\mathbf{u}(k) \stackrel{\text{def}}{=} [T_g^*(k) - T_g^*(k-1) \quad \beta^*(k) - \beta^*(k-1)]^T \end{cases} \quad (22)$$

约束:

$$\begin{cases} \Delta\beta_{\min} \leq \Delta\beta^*(k+j) \leq \Delta\beta_{\max} \quad j=1, 2, \dots, N_c \\ \beta_{\min} \leq \beta^*(k+j) \leq \beta_{\max} \quad j=1, 2, \dots, N_c \\ 0 \leq T_g^*(k+j) \leq T_{g,\max}^* \quad j=1, 2, \dots, N_c \\ P_g^i(k+j) \leq P_{g,\max} \quad j=1, 2, \dots, N_p \\ \omega_g^i(k+j) \leq \omega_{g,\max} \quad j=1, 2, \dots, N_p \end{cases} \quad (23)$$

其中, N_p 为预测时域; N_c 为控制时域; $\mathbf{e}^i(k)$ 为跟踪误差; $\Delta\mathbf{u}(k)$ 为控制变化量; 目标函数各项表达式的形式为 $\|\mathbf{p}\|_M^2 = \mathbf{p}^T \mathbf{M} \mathbf{p}$, 代表一个加权范数, 矩阵 \mathbf{M} 即对

应目标函数中的权重系数矩阵 Q^i 和 R^i ; 权重系数矩阵 Q^i 和 R^i 定义如式(24)所示。

$$Q^i = \text{diag}(q_1^i, q_2^i), R^i = \text{diag}(r_1^i, r_2^i) \quad (24)$$

MPC 模型有 q_1^i, q_2^i, r_1^i 和 r_2^i 4 个权重值, 改变其取值, 可以达到不同的控制目标。在不同的风速条件下, 通过设置合理的权重值, 可以提高风电机组调频的快速性和有效性。

c. 状态估计: 用如式(25)、(26)所示的状态观测器计算估计值, 其中 K^i 通过卡尔曼滤波技术得出^[4]。

$$\begin{bmatrix} \hat{x}^i(k|k) \\ \hat{x}_d^i(k|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}^i(k|k-1) \\ \hat{x}_d^i(k|k-1) \end{bmatrix} + K^i(y(k) - C^i \hat{x}^i(k|k-1)) \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}^i(k+1|k) \\ \hat{x}_d^i(k+1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^i & B_u^i \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}^i(k|k) \\ \hat{x}_d^i(k|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_u^i \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (26)$$

2.3 MMPC 模型库

模型库分为 M 个子运行区域, 模型运行点由实时风速值决定, 风速范围为切入风速到切出风速: $v_{ci} \leq v \leq v_{co}$ 。全部运行范围和子运行区域划分如下:

$$\underbrace{v_{ci} \leq v \leq v_{co}}_{\text{全部运行区域}} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{子区域 1: } v_{ci} \leq v < v_1 \\ \text{子区域 2: } v_1 \leq v < v_2 \\ \vdots \\ \text{子区域 } M: v_{M-1} \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (27)$$

理论上, 增加子区域个数并相应减小每一个子区域的范围, 能够提高预测的准确度和控制精度, 但会增加计算的复杂度和控制器的计算时间。

根据 MMPC 减载调频控制的主要思想, 子区域权重设置依据如下。

在低风速区间, 主要任务是控制转速保持对减载功率的跟踪, 而桨距角应保持为初始值(接近于 0), 以获得较快的调节速度。因此, β^* 对应的权重值 r_2^i 应取很大的值, 而 T_g^* 对应的权重值 r_1^i 和转速偏差对应的权重值 q_1^i 取较小值从而保证对转速的有效跟踪控制, 有功输出偏差对应的权重值 q_2^i 可取为 0。

在中风速区间, 转速仍有一定的安全运行范围时, 但当转速达到额定限值时将通过桨距调节装置承担功率调节任务。因此, q_1^i, q_2^i 和 r_1^i 取与低风速时接近的值, 而 r_2^i 应取相对于低风速时较小的值, 从而使桨距系统参与到功率调节过程中。

在高风速区间, 转速已经达到额定限值, 主要任务是由桨距系统完成有功输出的有效调节。因此, r_2^i 应取更小的值, r_1^i 取较大值, q_1^i 取相近的值, q_2^i 的值相对增大。

3 弱电网下双馈风电场控制策略

3.1 中心控制系统结构及模式

基于 MMPC 的 DFIG 风电机组可以保证弱电网频率的稳定, 并具有良好的调频性能, 同时为了维持弱电网电压的稳定, 需要注入一定的无功功率。DFIG 风电场的无功输出极限与有功输出功率有关, 因此需根据有功功率确定相应的无功输出。无功功率的需求量取决于短路比和阻抗比, 当二者很小时, 需要的无功功率很大。虽然 DFIG 风电场具有一定的无功调节能力, 但其有功出力的随机波动使得无功功率输出亦存在较强的波动性, 并且电网扰动或故障情况导致电压跌落时, DFIG 风电场无功功率调节范围的波动问题更为严重^[4]。此时单靠风电场发出相应的无功难以维持 PCC 电压的稳定。对此, 本文采用具有连续、快速无功调节能力的 STATCOM 补偿单元配合 DFIG 风电场实现弱电网的无功补偿, 其控制策略采用目前广泛认可的三级无功控制^[19]。因此, 本文通过引入 STATCOM 建立了如图 5 所示的中心控制系统。图中, β_l^* 和 $T_{g,l}^*$ 分别为风电机组 l 的桨距角参考值和电磁转矩参考值; Q_s 和 U_s 分别为补偿单元 STATCOM 输出的无功功率和其出口电压, $U_{l,l}$ 为风电机组 l 的机端电压, $Q_{RSC,l}^*$ 和 $Q_{GSC,l}^*$ 分别为为

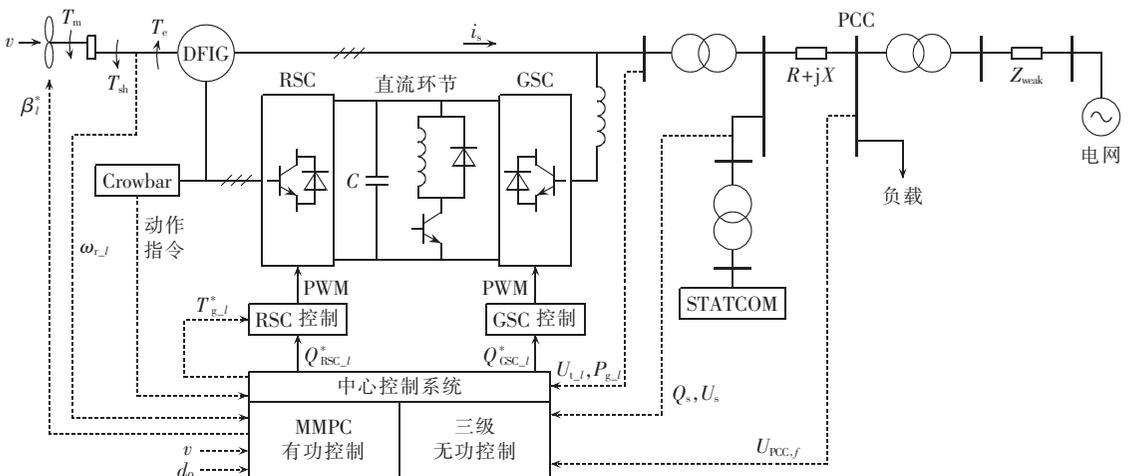


图 5 中心控制系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of central control system

电机组 l 的转子侧和网侧无功功率参考值。中心控制系统通过对风电场、补偿单元及并网系统进行实时协调控制,实现三者有功功率和无功功率平衡的控制目标。

中心控制系统包括正常运行、故障运行及负荷扰动运行 3 种运行模式下的控制策略。正常运行状态时采用功率控制模式,保持弱电网的有功和无功平衡;故障运行时根据 Crowbar 保护动作的情况选用功率控制模式或电压控制模式,电压控制模式的目的是保证风电机组的不脱网运行;负荷扰动运行时,根据电网频率的变化量由风电场承担调频任务,同时采用与故障运行时相同的控制方式进行无功补偿。其中,功率控制模式为风电场和 STATCOM 共同承担无功调节任务,电压模式时风电机组为保证自身安全退出无功调节模式^[20]。中心控制流程如图 6 所示。

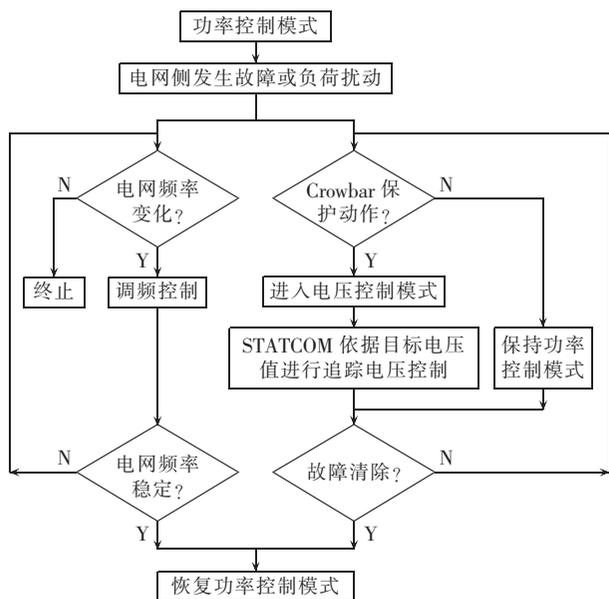


图 6 中心控制流程图

Fig.6 Flowchart of central control

3.2 风电场功率分配方式

有功控制模式下,中心控制系统需要将有功需求量分配到各风电机组。根据本文采用的减载调频控制方法,可以通过统一改变各风电机组的减载水平实现有功的合理分配,操作简单有效。减载水平响应系统频率变化如式(28)所示:

$$\begin{cases} \Delta P_{WF} = \frac{f - f_{ref}}{R_f} \\ \Delta d\% = \frac{\Delta P_{WF}}{\sum_{l=1}^n P_{MPPT-l}} \end{cases} \quad (28)$$

其中, f 、 f_{ref} 分别为电网实测频率和参考频率; R_f 为频率响应特性系数; ΔP_{WF} 为响应电网频率的风电场有功出力变化量; P_{MPPT-l} 为风电机组 l 当前的最大可用有功功率。根据实时频率差值确定风电场需要调整

的有功出力值,然后确定减载水平改变量分配到各风电机组。

无功控制模式下,首先根据并网点电压 U_{pcc} 计算系统的无功需求,然后控制系统需对风电场内部、风电场与补偿单元间进行三级分配:一级是将网侧制定的无功需求容量,根据风电场的无功调整范围及补偿单元的无功容量状况在两者间进行协调分配,优先采用补偿单元进行无功补偿;二级是将分配到风电场的无功容量,根据各机组有功输出功率确定无功功率实时调节范围进行逐一分配;三级是在各机组内部定子侧与网侧变换器(GSC)之间进行无功优化分配。

4 仿真分析

为了验证中心控制策略在弱电网故障或负荷投切时的有效性,本文以西北某风电系统为例,在 PSCAD/EMTDC 中建立了 60×1.5 MW 风电场以及地区接入弱电网系统的仿真模型,如图 7 所示,并利用 MATLAB 编译求解了 MMPC 优化问题。PCC 处短路容量为 $540 \text{ MV} \cdot \text{A}$,短路比为 6。风电场经箱变和集中升压变升至 110 kV ,经升压变 T_3 升至 220 kV ,接入 220 kV 输电网;STATCOM 接入 110 kV 母线侧,经 100 km 的架空传输线接入大电网,大电网采用理想电压源等效模拟。

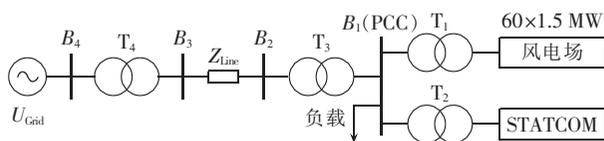


图 7 风电场接入弱电网仿真示意图

Fig.7 Simulation model of weak grid with wind farm

4.1 中心控制下的频率调节仿真

4.1.1 MMPC 取不同权重值对比仿真分析

为了验证式(21)中的权重值对 MMPC 调频控制调节性能的影响,本文选定权重值 q_1 分别为 0.5、1.0 和 2.0, $q_2=0.1$, $r_1=5$, $r_2=1$, 仿真风速设定为 12 m/s (中风速), $t=10 \text{ s}$ 时,负荷投入 20 MW , 仿真结果如图 8 所示(转速和有功功率为标么值,后同)。

由图 8 可以看出,当其他权重取值固定时, q_1 的取值越大,转速的调节特性越好;同时会使有功功率和桨距角的波动性增大。因此,为了综合选取较好的调节性能,兼顾控制精度和计算时间,基于权重设置原则和实验仿真结果,本文设定 MMPC 的子区域及其权重值如表 1 所示。

4.1.2 MMPC 与 PI 调频控制调节性能对比仿真分析

为了验证本文提出的风电机组 MMPC 调频控制策略的有效性,本文分别仿真并比较了 MMPC 调

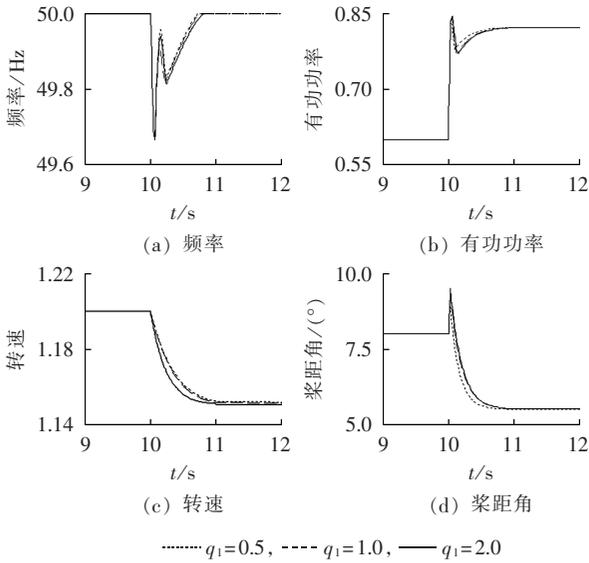


图 8 不同权重值仿真结果

Fig.8 Simulative results for different weights

表 1 子区域及其权重值

Table 1 Subregions and corresponding weight data

子区域	$v/(m \cdot s^{-1})$	q_1^i	q_2^i	r_1^i	r_2^i
1	[4, 8.7]	2	0	1	1000
2	(8.7, 11]	2	0	1	5
3	(11, 13]	1	0.1	5	1
4	(13, 18.4]	1	5	1000	0.1
5	(18.4, 22]	1	5	1000	0.1

频控制策略和 PI 调频控制策略^[8]在调频过程中调节性能。 $t=10\text{ s}$ 时,负荷投入 20 MW,选取其中 3 个代表性风速条件模拟不同风速条件时中心控制系统的调频性能,即 8 m/s(低风速)、10 m/s(中风速)、14 m/s(高风速),仿真结果如图 9—11 所示。

由图 9—11 可知,MMPC 调频控制能自动识别风速模式,并选取对应的权重执行相应的控制策略。

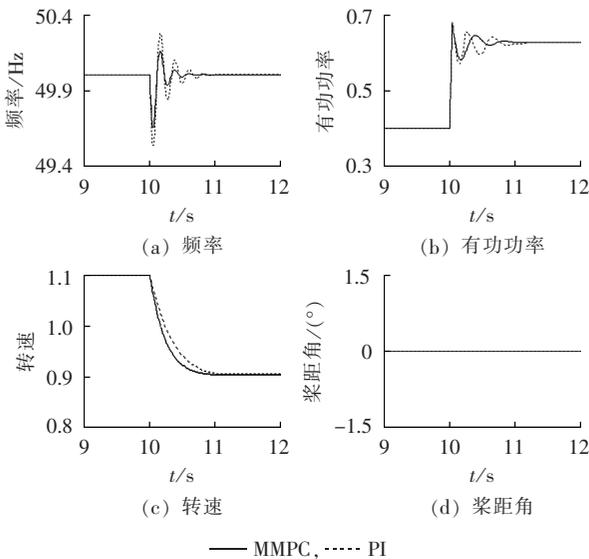


图 9 低风速情况仿真结果

Fig.9 Simulative results in low wind speed condition

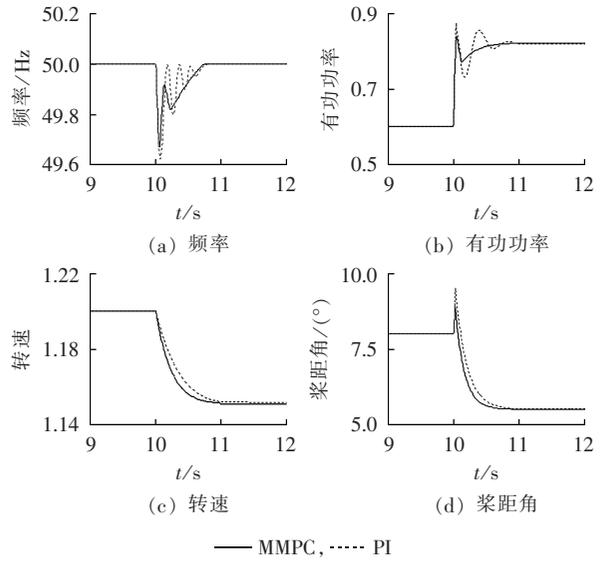


图 10 中风速情况仿真结果

Fig.10 Simulative results in medium wind speed condition

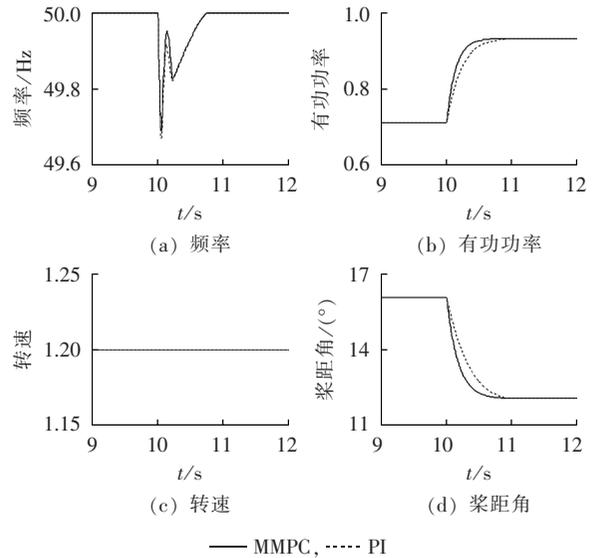


图 11 高风速情况仿真结果

Fig.11 Simulative results in high wind speed condition

同时,MMPC 调频控制策略能协调控制桨距角和电磁转矩,从而减小了有功功率和频率的波动,相对于 PI 调频控制^[8]起到了良好的控制效果。

4.2 中心控制下的电压调节仿真

$t=0.5\text{ s}$ 时,弱电网 PCC 处发生三相短路故障,故障持续时间 0.5 s,导致电压分别跌落 20%、50%。

故障导致电压跌落 20%时,依靠 STATCOM 的无功补偿作用,可快速向系统注入无功功率,提升 PCC 电压水平,如图 12(a)所示(电压为标么值)。优先采用 STATCOM 进行无功补偿,此时风电场保持恒功率因数运行状态,发出的无功功率为 0,无功功率发出情况如图 12(b)所示。

当电压跌落程度 50%时,STATCOM 的补偿容量无法满足电压调节要求,需要风电场配合进行无功

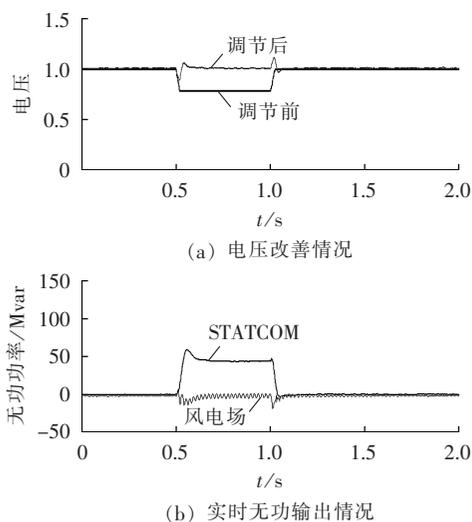


图 12 电压跌落 20% 时协调控制仿真结果

Fig.12 Simulative results of coordinated control for 20% voltage drop

补偿,电压改善情况和实时无功输出情况分别如图 13(a)和图 13(b)所示(电压为标幺值)。

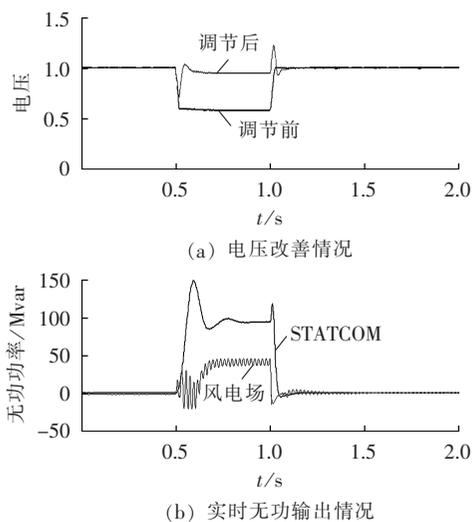


图 13 电压跌落 50% 时协调控制仿真结果

Fig.13 Simulative results of coordinated control for 50% voltage drop

5 结语

本文提出了一种基于 MPC 技术的风电机组 MMPC 调频控制策略。通过 MMPC 调频控制策略,可以实现基于 DFIG 的 WECS 在风速变化时的系统性能优化控制,提升风电场的调频能力和稳定性。该策略根据不同的风速条件设置了不同权值系数的预测模型库,协调控制桨距角和发电机转矩,从而实现输出功率与转速有效地响应系统频率的变化。同时,引入 STATCOM 建立中心控制系统,通过中心控制系统实时的有功-无功协调控制,可以保证弱电网在负荷波动和故障情况下风电机组不脱网并维持电

网电压和频率的稳定。考虑到风电场的功率补偿能力,本文的后续工作将主要进行大型风电场与常规机组协调控制维持电网稳定性方面的研究。

参考文献:

- [1] MULJADI E,BUTTERFIELD C P,PARSONS B,et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(1): 29-36.
- [2] 袁小明. 长线路弱电网情况下大型风电场的联网技术[J]. 电工技术学报,2007,22(7):29-36.
YUAN Xiaoming. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(7):29-36.
- [3] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):78-82.
CAO Jun,WANG Hongfu,QIU Jiayu. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(13):78-82.
- [4] 薛迎成,邵能灵,宋凯,等. 变速风力发电机提供调频备用容量研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):75-80.
XUE Yingcheng,TAI Nengling,SONG Kai,et al. Variable-speed wind turbines provide primary reserve for frequency control[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):75-80.
- [5] 孙伟伟,付蓉,陈永华. 计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):81-85.
SUN Weiwei,FU Rong,CHEN Yonghua. Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):81-85.
- [6] STRACHAN N P W,JOVCIC D. Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2779-2788.
- [7] de ALMEIDA R G,PEAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):944-950.
- [8] 张昭遂,孙元章,李国杰,等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):20-25.
ZHANG Zhaosui,SUN Yuanzhang,LI Guojie,et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated over speed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):20-25.
- [9] CHANG-CHIEN L R,YIN Y C. Strategies for operating wind power in a similar manner of conventional power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(4):926-934.
- [10] MUNTEANU I,CUTULULIS N A,BRATCU A I,et al. Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach[J]. Control Engineering Practice,2005,13(7):903-912.
- [11] SOLIMAN M,MALIK O P,WESTWICK D T. Multiple model multiple-input multiple-output predictive control for variable speed variable pitch wind energy conversion systems[J]. IET Renewable Power Generation,2011,5(2):124-136.
- [12] LIU Xiangjie,KONG Xiaobing. Nonlinear model predictive control for DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on

- Automation Science and Engineering, 2014, 11(4):1046-1055.
- [13] MUHANDO E B, SENJYU T, UCHIDA K, et al. Stochastic inequality constrained closed-loop model-based predictive control of MW-class wind generating system in the electric power supply[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(1):23-35.
- [14] SOLIMAN M, MALIK O P, WESTWICK D T. Multiple model predictive control for wind turbines with doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(3):215-225.
- [15] CASTAIGNET D, COUCHMAN I, POULSEN N K, et al. Frequency-weighted model predictive control of trailing edge flaps on a wind turbine blade[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4):1105-1116.
- [16] YARAMASU V, WU B, CHEN J. Model-predictive control of grid-tied four-level diode-clamped inverters for high-power wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6):2861-2873.
- [17] HENRIKSEN L C, HANSEN M H, POULSEN N K. Wind turbine control with constraint handling: a model predictive control approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(11):1722-1734.
- [18] 丁宝苍. 预测控制的理论与方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:10-15.
- [19] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19):16-23.
- LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19):16-23.
- [20] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):23-28.
- WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Reactive power and voltage control strategy for wind farm based on STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25):23-28.

作者简介:



李超

李超(1988—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事风力发电与并网方面的研究(E-mail:lichao2008@mail.sdu.edu.cn);

王洪涛(1973—),男,山东菏泽人,教授,博士,主要从事电力系统恢复与控制方面的研究(E-mail:whtwhm@sdu.edu.cn);

韦仲康(1972—),男,安徽肥东人,高级工程师,硕士,主要从事电网调度运行与

调度计划工作;

王春义(1980—),男,山东聊城人,高级工程师,博士,主要从事电力系统规划和运行分析工作。

Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms

LI Chao¹, WANG Hongtao¹, WEI Zhongkang², WANG Chunyi³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250001, China)

Abstract: A multi-model frequency regulation strategy based on the MPC (Model Predictive Control) technology is proposed for the wind turbine-generator set in the weakly-synchronized grid with large-scale wind farms, which sets the prediction model base according to the wind speed conditions. It can coordinate the pitch angle control and the generator torque control in different wind speed conditions to regulate the active power output of generation set for responding to the frequency variation of weak grid and improving the frequency regulation capability of wind turbine-generator set. A central control system with STATCOM is established for the voltage stability of weak grid, which coordinates the active power control and the reactive power control in real time to ensure the ride-through of wind turbine-generator set and the voltage and frequency stability of weak grid in the conditions of load fluctuation and fault. Simulative results show the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: weakly-synchronized grid; wind farms; multi-model predictive control; STATCOM; coordinated control; stability; frequency stability; voltage stability