

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202023

基于改进动态潮流的 DFIG 风电系统层级频率模型预测控制

黄杰杰¹, 李生虎¹, 孙婷婷²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 南通理工学院电气与能源工程学院, 江苏 南通 226002)

摘要: 电力系统原有同步发电机(SG)负责的调频可由双馈感应发电机(DFIG)提供。评估调频效果时, 相较详细时域仿真分析, 可采用动态潮流(DPF)算法减少运算量。提出包含上层频率预测与下层 DFIG 控制的层级频率控制。双层控制中皆引入模型预测控制(MPC), 通过预估控制效果确定控制目标。上层控制在 DPF 中引入 SG 调速器, 以提升频率预测精度, 基于此确定 DFIG 有功参考值, 在其中计及了 DFIG 机械暂态的变化率约束。下层控制提出采用基于 MPC 的直接转子电流控制, 追踪调频过程中的 DFIG 有功参考值, 并在频率预测中计及其控制响应。

关键词: 层级频率控制; 模型预测控制; 双馈感应发电机; 动态潮流; 机械暂态; 直接转子电流控制

Hierarchical frequency control for a power system with DFIG based on frequency prediction with improved dynamic power flow

HUANG Jiejie¹, LI Shenghu¹, SUN Tingting²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Electrical and Energy Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

Abstract: The frequency regulation previously undertaken by Synchronous Generators (SGs) may be provided by the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). To estimate the control effect, Dynamic Power Flow (DPF) is used to save the calculation effort of the detailed time domain analysis. A hierarchical frequency control with the upper level of the frequency prediction and the lower level of the DFIG control is proposed. Model Predictive Control (MPC) is applied to both levels to determine the control target with pre-evaluation of the control effect. At the upper level, the governor of the SG is included in the DPF to improve the accuracy of the frequency prediction, based on which the active power reference of the DFIG is determined. The mechanical transient of the DFIG with the change rate constraints is included. At the lower level, the MPC-based direct rotor current control of the DFIGs coordinated with frequency control is proposed to track the power reference, whose response is included in the frequency prediction.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877061).

Key words: hierarchical frequency control; model predictive control; doubly-fed induction generator; dynamic power flow; mechanical transient; direct rotor current control

0 引言

电力系统的调频能力通常由同步发电机(SG)提供。近年来风电渗透率逐步增长, 双馈感应发电机(DFIG)^[1]等风电机在运行过程中, 对系统频率变化不敏感。若仍仅依赖于 SG 实现调频控制, 系统频率稳定性会有所降低。DFIG 可通过虚拟惯性控制^[2-4]、下垂控制^[5]、以及两者的综合控制^[6-8], 调节

机组出力, 从而利用超速^[9]与变桨^[10-11]控制提供的有功备用, 增大系统惯性或参与一次调频^[12]。

DFIG 提供的有功支撑需限制在可用备用范围内, 否则会导致机组失速甚至失稳^[13-14]。为在可行范围内调整出力参与调频, 本文引入模型预测控制(MPC)^[15], 通过预估控制效果, 调节控制输入, 追踪控制目标^[16]。在调频场景下^[17-19], 通过预测系统频率, 确定机组有功出力调整量^[20]。

频率 MPC 的控制效果受预测模型精度的影响。现有研究中采用动态潮流(DPF)算法^[21-23], 基于系统

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877061)

等效惯量预测系统频率均值。相较基于完整模型的时域仿真^[24], 可减少预测模型的运算量。基于系统频率预测值, 调整机组出力参与调频。现有 DPF 对于 SG 与 DFIG 调频暂态过程的简化, 会降低预测模型精度, 影响频率 MPC 控制效果。具体体现在以下几个方面: (1) 现有 DPF 忽略 SG 调速器调节出力的控制延时, 采用稳态下垂系数描述机组出力变化^[25], 会导致频率响应分析结果的误差^[26-27]; (2) DFIG 通过变流器控制, 实现出力调节, 现有 DPF 算法未计及变流器控制暂态; (3) 现有 DPF 未计及 DFIG 机械环节与电磁环节在出力调节暂态过程中, 由于响应速度的不同引起的机械暂态, 无法在调频控制中引入机械环节参数的暂态变化率约束^[28]。

DFIG 出力需迅速到达调频控制设定的参考值, 以确保理想的系统频率响应。基于 DFIG 潮流模型, 可获得对应出力调节的转子电流参考值。现有转子电流 PI 控制在不同的系统运行状态下, 依赖控制环节增益的调节维持电流控制效果。相较而言, MPC 具有优良的鲁棒性^[29-30], 可改善转子电流控制效果。

本文针对 DFIG 并网风电系统调频, 提出层级 MPC 控制方案。上层 MPC 实现系统频率预测, 确定 DFIG 有功参考值。通过在 DPF 中计及 SG 调速器控制延时, 提升预测模型精度。引入 DFIG 机械暂态, 拓展 DPF 算法, 进而在 MPC 中引入机械环节参数暂态变化率约束。下层 MPC 通过直接转子电流控制, 实现 DFIG 出力调节参与调频。推导变流器控制暂态的解析表达, 以描述 DFIG 调频响应。

1 基于层级 MPC 的频率控制

基于层级 MPC 的频率控制策略如图 1 所示。上层 MPC 基于系统频率预测结果确定 DFIG 有功参考值, 下层 MPC 通过直接转子电流控制, 实现 DFIG 的有功出力调节。

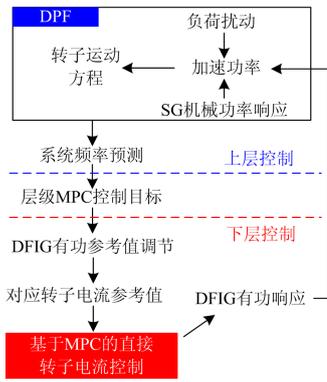


图 1 DFIG 层级 MPC 调频策略

Fig. 1 Hierarchical model predictive control for frequency regulation strategy of DFIG

1.1 基于频率预测值确定 DFIG 有功参考值

MPC 通过提前预估 DFIG 的有功出力响应对系统频率的影响, 确定 DFIG 有功输出参考值 P_{DFIG} 调整量, 以参与系统调频。

针对含 m 台 SG 的电力系统, 系统频率均值 f_{sys} 可用 SG 转速的惯性加权均值近似表示^[31], 如式(1)所示, SG 转速可基于转子运动方程(2)进行预测。

$$f_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^m 2H_{\text{SG},i} f_{\text{SG},i}}{2H_{\text{SG,sum}}} \approx \frac{\sum_{i=1}^m 2H_{\text{SG},i} p_{\text{SG},i} \omega_{\text{SG},i}}{4\pi H_{\text{SG,sum}}} \quad (1)$$

$$2H_{\text{SG},i} p \omega_{\text{SG},i} = (P_{\text{M},i} - P_{\text{E},i}) / \omega_{\text{SG},i} \quad (2)$$

式中: $H_{\text{SG},i}$ 、 $f_{\text{SG},i}$ 、 $\omega_{\text{SG},i}$ 、 $p_{\text{SG},i}$ 分别为惯性、频率、转速与极对数; P_{M} 与 P_{E} 分别为机械功率与电磁功率; p 为微分运算符; 下标 sum 代表总和。

在调频控制步长 T_f 的结束时刻, SG 转子转速的预测值可基于式(3)得到。

$$\omega_{\text{SG},i}^{(n+1)} = \frac{T_f (P_{\text{M},i}^{(n)} - P_{\text{E},i}^{(n)})}{2H_{\text{SG},i} \omega_{\text{SG},i}^{(n)}} + \omega_{\text{SG},i}^{(n)} \quad (3)$$

式中: 上标 (n) 与 $(n+1)$ 分别代表第 n 个控制步长初始时刻与结束时刻对应的值。

DFIG 参与调频增发的有功, 可基于机组惯性在系统 SG 中进行分配。联立式(1)与式(3), 计及 DFIG 调频响应, 系统频率预测值可表示为

$$f_{\text{sys}}^{(n+1)} = f_{\text{sys}}^{(n)} + \frac{1}{4\pi H_{\text{SG,sum}}} \sum_{i=1}^m \left[\int_{t^{(n)}}^{t^{(n)}+T_f} \frac{P_{\text{SG},i}}{\omega_{\text{SG},i}} (P_{\text{M},i} - P_{\text{E},i}^{(n)} + H_{\text{SG},i} \Delta P_{\text{DFIG}} / H_{\text{SG,sum}}) dt \right] \quad (4)$$

式中, $t^{(n)}$ 为第 n 个控制步长的起始时刻。

基于系统频率预测值, 负荷扰动场景下 DFIG 有功出力调节的控制目标设定为最小化频率偏移。

$$\min |\Delta f| = |f_{\text{N}} - f_{\text{sys}}^{(n+1)}| \quad (5)$$

式中, f_{N} 为系统频率额定值。

1.2 基于 MPC 直接转子电流控制调节 DFIG 出力

DFIG 的拓扑结构如图 2 所示, 图中: V 、 I 分别为电压与电流; 下标 s、r、g 分别代表定子、转子与网侧变流器(GSC)。

DFIG 的电压与磁链方程为

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + p \psi_s + j \omega_s \psi_s \\ V_r = R_r I_r + p \psi_r + j s_r \omega_s \psi_r \\ \psi_s = (L_{\text{gs}} + L_m) I_s + L_m I_r = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = (L_{\text{or}} + L_m) I_r + L_m I_s = L_r I_r + L_m I_s \\ \psi_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_r = L_m \psi_s / L_s + L_r' I_r \end{cases} \quad (6)$$

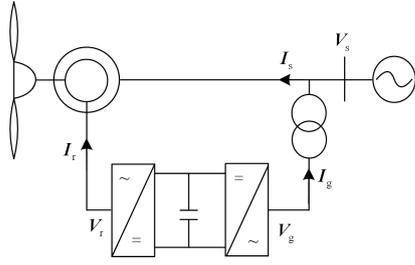


图 2 DFIG 拓扑结构

Fig. 2 Configuration of DFIG

式中： ψ 、 R 分别为磁链与电阻； L_m 为励磁电感； L_s 、 L_r 为定转子自感； $L_{\sigma s}$ 、 $L_{\sigma r}$ 为定转子漏感； s_r 为感应发电机转差； ω_s 为同步转速。

DFIG的有功出力调节通过转子侧变流器(RSC)控制实现。为具备调频能力，DFIG不工作在最大功率点追踪状态，其出力大小可由电网调度决定，以保留部分旋转备用容量。基于设定出力的DFIG潮流模型^[32]，可求解得到转子电流参考值。采用基于MPC的直接转子电流控制^[33]，可在转子电流与电压关系式的基础上，对转子电流进行直接量化求解。

$$\frac{I_r^{(n+1)} - I_r^{(n)}}{T_{MPC}} = -\frac{R_r}{L_r'} I_r^{(n)} - j s_r \omega_s \left(\frac{L_m}{L_s L_r'} \psi_s^{(n)} + I_r^{(n)} \right) - \frac{L_m}{L_s L_r'} \left(V_s^{(n)} - R_s I_s^{(n)} - j \omega_s \psi_s^{(n)} \right) + \frac{V_r^{(n)}}{L_r'} \quad (7)$$

式中， T_{MPC} 为直接转子电流控制的控制步长。

基于式(7)，可计算得到将转子电流控制至参考值所需的转子电压。

DFIG基于MPC的直接转子电流控制框图如图3所示，图中上标ref代表参考值，下标 d 、 q 分别代表直轴与交轴。由于MPC可实现对转子电流的直接量化分析，因此其控制效果不像PI控制那样受控制增益参数设定的影响。

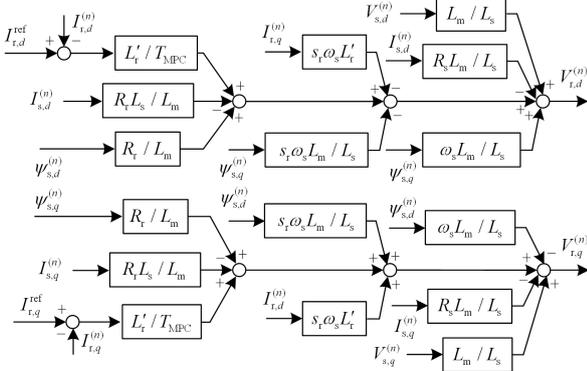


图 3 用于 DFIG 有功控制的直接转子电流 MPC 控制

Fig. 3 MPC-based direct rotor current control for active power control of DFIG

考虑到基于MPC的直接转子电流控制的快速响应，转子电流可迅速到达参考值，此时转子电压方程可转化为定子电流的一阶微分方程表达式。

$$L_s p I_s + R_s I_s + j \omega_s L_s I_s = V_s - j \omega_s L_m I_r \quad (8)$$

求解式(8)，可得到式(9)所示的定子电流解析表达，基于此可量化定子有功输出。式(9)中上标ini、 ∞ 分别代表初始值与稳定终值。

$$\begin{cases} I_s^{ini} = (\psi_s^{ini} - L_m I_r^{ini}) / L_s \\ I_s^\infty = (V_s - j \omega_s L_m I_r^{ref}) / (R_s + j \omega_s L_s) \\ I_s = I_s^\infty + (I_s^{ini} - I_s^\infty) e^{-(R_s / L_s + j \omega_s) t} \end{cases} \quad (9)$$

MPC同样可用于GSC维持直流母线电压^[34-35]。

此时忽略变流器损耗，可近似认为RSC与GSC有功输出相等。基于式(9)中的定子电流解析表达，转子电压可由式(10)计算得到，进而可量化RSC有功输出。综合定子与GSC有功，可得DFIG整体有功输出。

$$\begin{cases} V_r = L_m p I_s + R_r I_r + j s_r \omega_s (L_r I_r^{ref} + L_m I_s) \\ p I_s = -(R_s / L_s + j \omega_s) (I_s^{ini} - I_s^\infty) e^{-(R_s / L_s + j \omega_s) t} \end{cases} \quad (10)$$

2 计及调速器与 DFIG 机械暂态的改进 DPF

SG 调速器控制延时会影响机械功率响应，进而影响系统频率动态。在 DPF 算法中引入调速器延时有助于提升频率预测的精度。此外，现有 DPF 算法忽略了 DFIG 调整出力参与调频的机械暂态，无法在控制中引入机械环节参数的暂态变化率约束。本文对现有 DPF 的改进如图 4 所示。

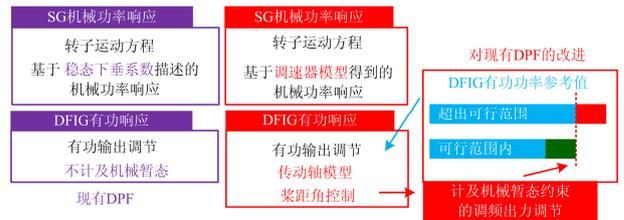


图 4 计及调速器延时与 DFIG 机械暂态的改进 DPF

Fig. 4 Improved DPF incorporating governor delay and mechanical transient of DFIG

2.1 计及 SG 调速器

调速器的控制框图如图 5 所示。图中： K_δ 为测量环节增益； K_i 为反馈环节增益； μ 为汽轮机浇口位置； α 为高压涡轮的功率系数； T_{ser} 、 T_{CH} 、 T_{RH} 分别

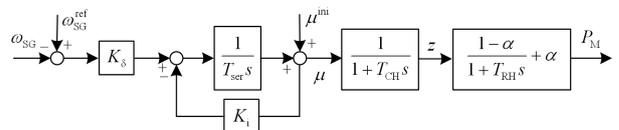


图 5 计及机械暂态延时的调速器

Fig. 5 Governor to incorporate delay in mechanical transient

为伺服系统、蒸汽室、再热器的时间常数; z 为中间变量; s 为 Laplace 运算符。

现有 DPF 算法中忽略调速器延时, SG 机械功率响应稳态下垂系数表示为式(11), 这会导致频率预测结果的误差。

$$\Delta P_M = K_\delta (\omega_{SG}^{\text{ref}} - \omega_{SG}) / K_i \quad (11)$$

计及转子运动方程与调速器动态, SG 的状态空间方程如式(12)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{p}\mathbf{x}_{SG} = \mathbf{A}_{SG}\mathbf{x}_{SG} + \mathbf{B}_{SG}\mathbf{y}_{SG} \\ \mathbf{x}_{SG} = [\omega_{SG} \ \mu \ z \ P_M]^T \end{cases} \quad (12)$$

式中: \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 为状态变量与控制变量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为系数矩阵。

采用梯形法对式(12)进行差分化处理得到式(13), 可预测 SG 机械功率对系统频率偏移的响应, 将其引入 DPF 可改善系统频率预测精度, 式中 T_p 为预测步长。

$$\frac{\mathbf{x}_{SG}^{(n+1)} - \mathbf{x}_{SG}^{(n)}}{T_p} = \mathbf{A}_{SG} \frac{\mathbf{x}_{SG}^{(n+1)} + \mathbf{x}_{SG}^{(n)}}{2} + \mathbf{B}_{SG}\mathbf{y}_{SG}^{(n)} \quad (13)$$

2.2 计及 DFIG 机械暂态

为分析 DFIG 利用超速与变桨控制提供的有功备用, 参与系统调频的转速与桨距角暂态, 可在现有 DPF 中引入传动轴与桨距角控制模型。

变流器与机械环节在调整出力暂态过程中响应速度的差异, 会在 DFIG 传动轴上产生扭转转矩, 为此需在 DPF 中引入传动轴模型对其进行分析。

DFIG 的双质量块传动轴模型方程为

$$\begin{cases} 2H_{WT}\mathbf{p}\omega_{WT} = P_{WT} / \omega_{WT} - D_s(\omega_{WT} - \omega_r) - K_s\gamma \\ 2H_r\mathbf{p}\omega_r = -T_{em} + D_s(\omega_{WT} - \omega_r) + K_s\gamma \\ \mathbf{p}\gamma = \omega_{WT} - \omega_r \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_{WT} 为风力机(WT)的捕获机械功率; T_{em} 为 DFIG 电磁转矩; ω_{WT} 、 ω_r 分别为 WT 与转子的转速; H_{WT} 、 H_r 分别为 WT 与转子的惯性; D_s 、 K_s 分别为阻尼与刚度系数; γ 为扭转角。

针对 DFIG 通过变桨控制释放有功备用参与调频的暂态过程, 现有 DPF 算法忽略了桨距角控制的延时。计及控制延时的桨距角系统如图 6 所示。图中 β 为桨距角; $K_{\beta p}$ 、 $K_{\beta i}$ 为比例与积分环节增益; $T_{\beta s}$ 为桨距角控制时间常数。

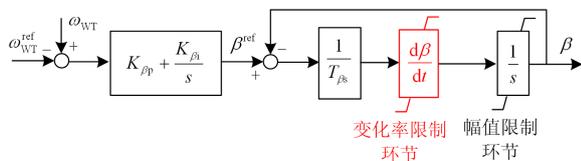


图 6 计及控制延时的桨距角系统

Fig. 6 Pitch angle system considering control delay

综合传动轴与桨距角控制模型, DFIG 状态空间方程如式(15)所示。采用梯形法进行差分化处理, 基于式(16)可预测 DFIG 调频过程中的机械暂态。

$$\begin{cases} \mathbf{p}\mathbf{x}_{DFIG} = \mathbf{A}_{DFIG}\mathbf{x}_{DFIG} + \mathbf{B}_{DFIG}\mathbf{y}_{DFIG} \\ \mathbf{x}_{DFIG} = [\omega_{WT} \ \omega_r \ \gamma \ \beta \ \beta^{\text{ref}}]^T \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\mathbf{x}_{DFIG}^{(n+1)} - \mathbf{x}_{DFIG}^{(n)}}{T_p} = \mathbf{A}_{DFIG} \frac{\mathbf{x}_{DFIG}^{(n+1)} + \mathbf{x}_{DFIG}^{(n)}}{2} + \mathbf{B}_{DFIG}\mathbf{y}_{DFIG}^{(n)} \quad (16)$$

基于转速与桨距角的预测值, 可评估其对风力机捕获机械功率的影响。

$$\begin{cases} P_{WT} = 0.5\rho\pi r^2 v_w^3 c_1 (c_2 / \lambda_i - c_3\beta - c_4\beta^{c_5} - c_6) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + c_8\beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} = \frac{1}{\frac{\omega_{WT}r}{v_w} + c_8\beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (17)$$

式中: ρ 为空气密度; v_w 为风速; r 为风力机半径; λ 为叶尖速比; λ_i 为中间变量; $c_1 \sim c_9$ 为 C_p 函数系数。

传动轴扭转转矩与桨距角控制分别涉及扭转角与桨距角暂态, 其变化率约束可引入调频 MPC 控制。控制目标设定为在频率跌落阶段抑制系统频率偏移; 在频率回升阶段快速恢复有功备用。

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} |f_N - f_{\text{sys}}^{(n+1)}|, & \text{频率跌落阶段} \\ |P_{DFIG}^{(n+1)} - P_{DFIG}^{\text{ini}}|, & \text{频率回升阶段} \end{cases} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} |\Delta\gamma| < (d\gamma/dt)^{\max} T_f, \\ |\Delta\beta| < (d\beta/dt)^{\max} T_f, \end{cases} \quad t^{(n)} \leq t \leq t^{(n)} + T_f \end{aligned} \quad (18)$$

式中, 上标 \max 代表最大值。

风速变化引起的风力机捕获机械功率的波动可基于式(17)进行描述, 进而分析其对 DFIG 调频机械暂态的影响, 在风速波动的场景下实现调频控制。

3 算例分析

算例采用的两区域四机系统^[36]如图 7 所示, 其中节点 7 处接入 80 台 1.5 MW DFIG; 节点 9 处接

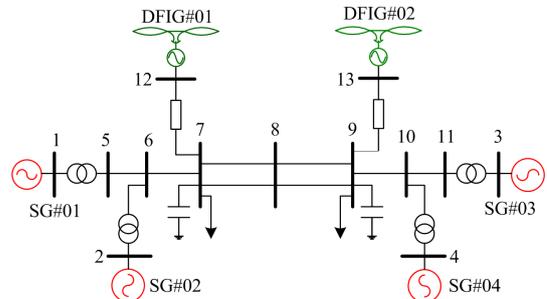


图 7 含 DFIG 风电场的两区域四机系统

Fig. 7 Two-area four-SG system with DFIG-based wind farms

表 1 SG 参数

Table 1 Parameters of SG				
参数	SG#01	SG#02	SG#03	SG#04
H_{SG}	6.5 s	6.5 s	6.175 s	6.175 s
K_{δ}	20	25	20	25
T_{ser}	0.2 s	0.15 s	0.2 s	0.15 s
K_i	1	1.2	1	1.2
T_{CH}	0.3 s	0.4 s	0.3 s	0.4 s
T_{RH}	8 s	6 s	8 s	6 s
α	0.3	0.4	0.3	0.4

表 2 DFIG 参数

Table 2 Parameters of DFIG					
参数	DFIG#01	DFIG#02	参数	DFIG#01	DFIG#02
L_{os}	0.171 4 p.u.	0.158 4 p.u.	D_s	25.5 p.u.	24 p.u.
L_m	2.9 p.u.	3.827 2 p.u.	K_s	10 p.u./rad	8 p.u./rad
L_{or}	0.156 3 p.u.	0.066 p.u.	H_{WT}	3 s	3.5 s
R_s	0.007 1 p.u.	0.009 2 p.u.	H_r	0.5 s	1 s
R_r	0.005 p.u.	0.007 6 p.u.	$K_{\beta p}$	10	6
v_w	14 m/s	13 m/s	$K_{\beta i}$	1	1
$T_{\beta s}$	0.05 s	0.03 s	—	—	—

入 40 台 2 MW DFIG。SG 与 DFIG 的参数如表 1 与表 2 所示^[37-38]。基于整体捕获机械功率与输出有功,对风电场进行等效。算例中风速大于额定风速,DFIG 转速取最大值,通过增大桨距角使 DFIG 输出额定功率。负荷扰动时,可利用桨距角控制实现的有功备用参与调频。

节点 7 与 9 处有功负荷在 0.1~1 s 突增 20%,然后恢复初始值。在此场景下分析系统调频能力。系统状态预测、频率控制以及 DFIG 直接转子电流控制步长分别取 $T_p=0.001$ s、 $T_f=0.1$ s、 $T_{MPC}=0.001$ s。

3.1 改进 DPF 预测精度验证

针对调频过程中的 SG 与 DFIG 运行暂态,对比下述算法的分析结果:(1) 现有 DPF 算法;(2) 本文改进 DPF 算法;(3) 基于完整模型的时域仿真。DFIG 出力调节量在每个调频控制步长 T_f 中的控制目标设定为起始时刻的系统频率偏移乘以下垂系数 1 p.u./Hz。图 8—图 11 分别给出了 SG 转速、机械功率、DFIG 有功输出、系统频率的分析结果对比。

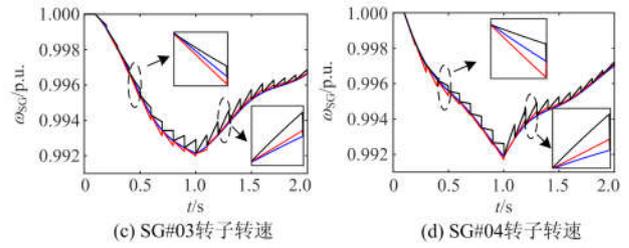
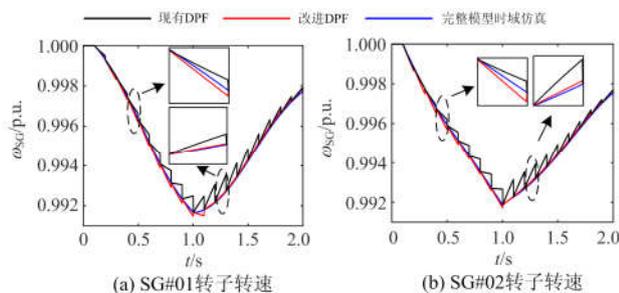


图 8 改进 DPF 对 SG 转速预测精度的提升

Fig. 8 Improvement to prediction accuracy of rotating speed of SGs with improved DPF

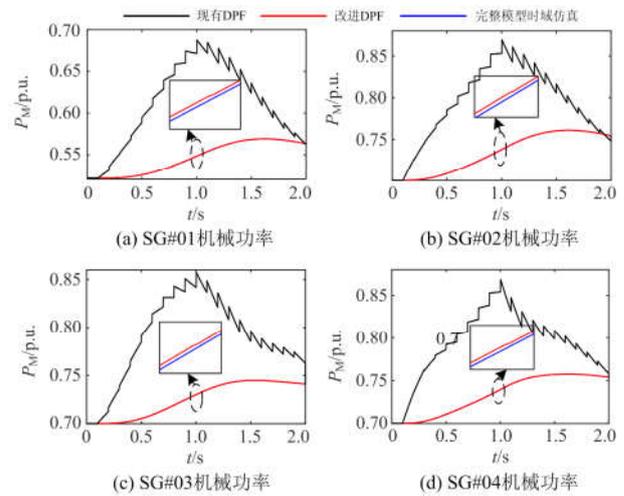


图 9 改进 DPF 对 SG 机械功率预测精度的提升

Fig. 9 Improvement to prediction accuracy of mechanical power of SGs with improved DPF

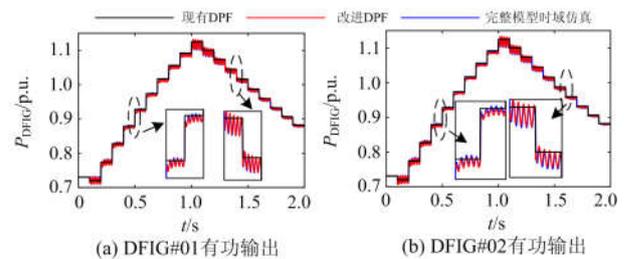


图 10 改进 DPF 对 DFIG 有功输出预测精度的提升

Fig. 10 Improvement to prediction accuracy of active power output of DFIGs with improved DPF

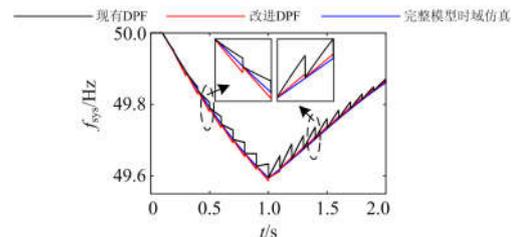


图 11 改进 DPF 对平均系统频率预测精度的提升

Fig. 11 Improvement to prediction accuracy of average system frequency with improved DPF

图 9 表明, 由于现有 DPF 算法忽略了调速器控制延时, 其预测得到的 SG 机械功率增发速度远高于时域仿真得到的实际值, 对应得到如图 8 与图 11 所示的偏乐观的 SG 转速与系统频率预测结果。图 11 表明, 改进 DPF 通过提升 SG 机械功率预测精度, 可避免对系统频率的乐观估计。在系统频率偏移存在可行范围的条件下, 改进 DPF 对频率预测精度的提升有助于确保调频效果的有效性。图 10 表明, 采用基于 MPC 的直接转子电流控制可有效调节 DFIG 出力, 但现有 DPF 算法无法反映变流器控制存在的暂态振荡。本文推导的变流器控制暂态解析表达与时域仿真结果一致, 可引入现有 DPF 算法中, 以细化 DFIG 通过变流器控制调节出力的控制暂态。

3.2 计及 DFIG 机械暂态约束

在 DFIG 释放有功备用参与调频的过程中, 传动轴扭转角与桨距角等参数的暂态变化率需要加以限制以减小机械元件的损耗。扭转角与桨距角的变化率约束分别取 0.025 rad/s 与 $1.5 (^\circ)/\text{s}$ 。

固定下垂系数控制与本文计及机械暂态约束的 MPC 控制方案下, DFIG#01 参与风电系统调频的效果对比如图 12 所示。下垂控制系数为 1 p.u./Hz 。

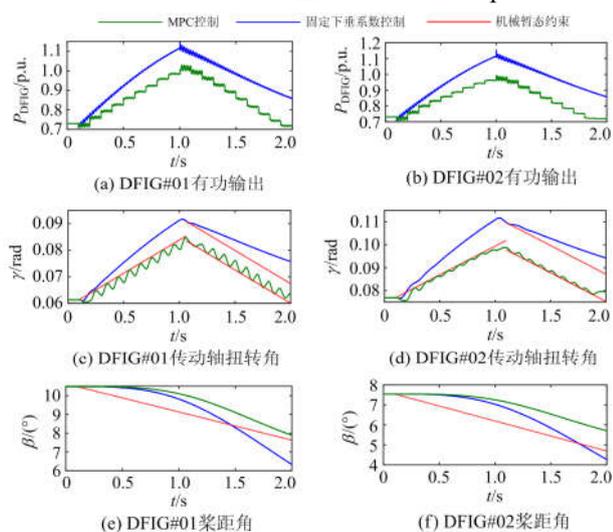


图 12 计及 DFIG 机械暂态约束的调频效果

Fig. 12 Effect of frequency regulation considering constraints related to mechanical transient of DFIG

由图 12 可以看出, 固定下垂系数控制存在安全约束越限的情况。考虑到机械环节较大的惯性, 需基于预测值提前调整 DFIG 出力, 使其在调频过程中不超出机械暂态约束范围。如图 12(a)、图 12(b) 所示, 通过减小 DFIG 有功增发量, 可缓解频率跌落阶段转子的减速以及桨距角的增长, 使 DFIG 在机械暂态约束范围内向系统提供有功支撑。在频率

恢复阶段, 在机械暂态约束范围内尽快恢复 DFIG 有功备用, 以应对未来负荷扰动。

3.3 相较固定下垂系数调频控制的优势

为验证本文调频 MPC 控制相较现有固定下垂系数调频控制的优势, 引入不同负荷扰动场景。对应不同程度的负荷扰动: 节点 7 与 9 处负荷 5% 突增与 20% 突增。后者在 3.2 节中已经进行了分析, 分析得到基于恒定下垂系数控制下的 DFIG 有功增发, 在较大负荷扰动下, 可能会超出机械暂态约束范围。针对 5% 的负荷突增, 两者调频效果对比如图 13 所示。

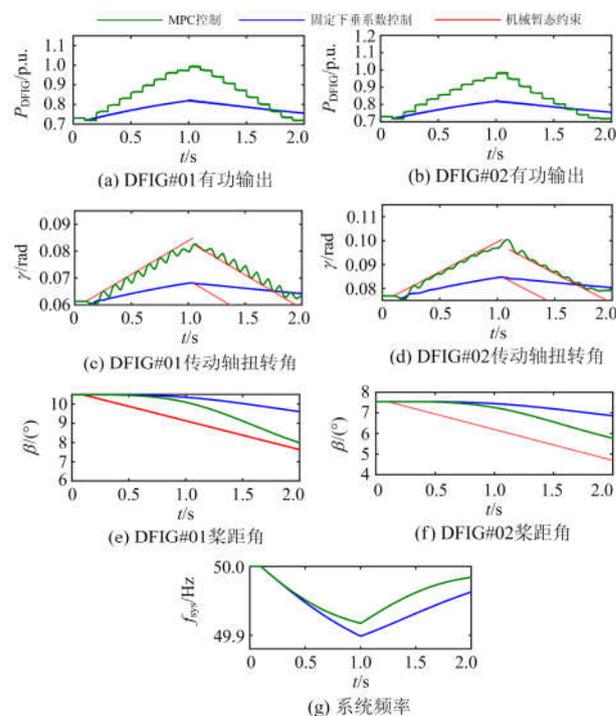


图 13 对比固定下垂系数控制调频效果

Fig. 13 Frequency regulation performance compared to droop control with fixed coefficient

固定下垂系数控制下, DFIG 增发出力与系统频率偏移成正比。为避免在较大的频率偏移下超出有功备用范围, 其取值存在一定限制。因此在较小负荷扰动下, DFIG 有功增发能力在固定下垂系数控制下未得到充分利用。本文基于 MPC 的调频策略相较现有固定下垂系数控制, 可在调频初期较快增发有功以支撑系统频率, 实现风电的快速调频响应。

4 结论

本文提出包含上层频率预测与下层 DFIG 控制的层级频率模型预测控制方案。在上层频率预测采用的 DPF 模型中, 引入 SG 调速器控制延时与 DFIG

机械暂态约束。下层采用基于 MPC 的直接转子电流控制实现 DFIG 有功出力调节,并对出力调节暂态过程进行了解析分析。得到如下结论:

(1) 改进 DPF 算法相较现有 DPF 可使计算得到的系统状态预测值更接近基于完整模型的时域仿真结果。由于计及了调频过程中 SG 调速器的控制延时,可避免偏乐观的频率预测值。

(2) 采用基于 MPC 的直接转子电流控制,可使 DFIG 有功出力快速调整至参考值。推导得到的暂态解析表达与时域仿真结果一致,可用于在 DPF 算法中描述 DFIG 调频响应。

(3) 通过在 DPF 算法中引入传动轴与桨距角控制模型,可通过 MPC 使 DFIG 在机械暂态约束范围内参与调频。

(4) 相较固定下垂系数控制,本文基于 MPC 的调频策略可针对不同负荷扰动场景,在机械暂态约束内,充分利用 DFIG 有功支撑能力参与调频。

参考文献

- [1] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based-WECS during symmetrical voltage dips[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 36-47. DOI: 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [2] EKANAYAKE J, JENKINS N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(4): 800-802.
- [3] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 859-867.
- [4] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 279-288.
- [5] ALMEIDA R G, CASTRONUOVO E D, LOPES J A P. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(2): 718-725.
- [6] TAN Y, MEEGAHAPOLA L, MUTTAQI K M. A suboptimal power-point-tracking-based primary frequency response strategy for DFIGs in hybrid remote area power supply systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(1): 93-105.
- [7] MORREN J, HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(1): 433-434.
- [8] ZHAO J, LÜ X, FU Y, et al. Coordinated microgrid frequency regulation based on DFIG variable coefficient using virtual inertia and primary frequency control[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(3): 833-845.
- [9] ALMEIDA R G, PECAS L J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(3): 944-950.
- [10] TENINGE A, JECU C, ROYE D, et al. Contribution to frequency control through wind turbine inertial energy storage[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2009, 3(3): 358-370.
- [11] HOLDSWORTH L, EKANAYAKE J, JENKINS N. Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator based wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2004, 47(1): 21-35.
- [12] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 50-58.
- [13] ZHANG Z, SUN Y, LIN J, et al. Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2012, 6(1): 38-47.
- [14] ARANI M F M, MOHAMED Y A I. Dynamic droop control for wind turbines participating in primary frequency regulation in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 5742-5751.
- [15] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 129-137.
ZHANG Mingrui, SONG Baihui, WANG Jiaying, et al. Control strategy for solid state transformer based on model predictive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 129-137.
- [16] YANG J, SUN X, LIAO K, et al. Model predictive control-based load frequency control for power systems with wind-turbine generators[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(15): 2871-2879.
- [17] GANGER D, ZHANG J, VITTAL V. Forecast-based anticipatory frequency control in power systems[J]. *IEEE*

- Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1004-1012.
- [18] OJAGHI P, RAHMANI M. LMI-based robust predictive load frequency control for power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4091-4100.
- [19] JIN C, LI W, SHEN J, et al. Active frequency response based on model predictive control for bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3002-3013.
- [20] BACCINO F, CONTE F, GRILLO S, et al. An optimal model-based control technique to improve wind farm participation to frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 993-1003.
- [21] KOU P, LIANG D, YU L, et al. Nonlinear model predictive control of wind farm for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3547-3561.
- [22] WANG H, YANG J, CHEN Z, et al. Model predictive control of PMSG-based wind turbines for frequency regulation in an isolated grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3077-3089.
- [23] LI S, ZHANG W, WANG Z. Improved dynamic power flow model with DFIGs participating in frequency regulation[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(12): 1-13.
- [24] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N, et al. Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation[J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 164-170.
- [25] WANG R, XIE Y, ZHANG H, et al. Dynamic power flow algorithm considering frequency regulation of wind power generators[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1218-1225.
- [26] AKBARI M, MADANI S M. Analytical evaluation of control strategies for participation of doubly fed induction generator-based wind farms in power system short-term frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(3): 324-333.
- [27] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PSA-91(4): 1637-1642.
- [28] OCHOA D, MARTINEZ S. A simplified electro-mechanical model of a DFIG-based wind turbine for primary frequency control studies[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(8): 3614-3620.
- [29] SGUAREZI F A J, OLIVEIRA A L, RODRIGUES L L, et al. A robust finite control set applied to the DFIG power control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1692-1698.
- [30] SGUAREZI F A J, OLIVEIRA F M E, RUPPERT F E. A predictive power control for wind energy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 97-105.
- [31] ERSDAL A M, IMSLAND L, UHLEN K. Model predictive load-frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 777-785.
- [32] LI S. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [33] LI S, HUANG J, SUN T. Analytical LVRT analysis of doubly fed induction generator with MPC-based DSCC/DRCC[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(13): 2462-2471.
- [34] TAHER S A, ARANI Z D, RAHIMI M, et al. Model predictive fuzzy control for enhancing FRT capability of DFIG-based WT in real-time simulation environment[J]. Energy Systems, 2018, 9(4): 899-919.
- [35] ABDELRAHEM M, KENNEL R. Efficient direct model predictive control for doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(5): 574-587.
- [36] CHEN L, LU X, MIN Y, et al. Optimization of governor parameters to prevent frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4466-4474.
- [37] BHATTARAI R, GURUNG N, GHOSH S, et al. Parametrically robust dynamic speed estimation based control for doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6529-6542.
- [38] BONGIORNO M, THIRINGER T. A generic DFIG model for voltage dip ride-through analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 76-85.

收稿日期: 2020-06-01

作者简介:

黄杰杰(1993—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为风电系统分析与控制; E-mail: huangjiejie@mail.hfut.edu.cn

李生虎(1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

孙婷婷(1994—), 女, 硕士, 研究方向为柔性直流输电。E-mail: suntinting@mail.hfut.edu.cn

(编辑 姜新丽)