

# 基于模型预测控制的双馈风电机组调频与转子转速恢复策略

赵晶晶, 杜明, 刘帅, 李梓博, 马闻鹤

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200082)

**摘要:** 双馈风电机组可通过释放存储在转子中的动能参与系统调频, 但转速恢复时可能引起频率的二次跌落, 不利于系统频率稳定。为此, 提出了一种基于模型预测控制的双馈风电机组惯量控制转子转速恢复策略。首先, 基于风电机组惯量控制转速恢复时刻有功减载量对系统频率和风机转速的影响, 建立了预测控制模型; 其次, 将降低系统频率二次跌落和恢复转子转速作为目标函数, 根据系统频率实时滚动优化风机有功减载量, 在抑制频率的二次跌落深度的同时兼顾转子转速恢复, 以提高系统的频率稳定性; 最后, 在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型, 验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 双馈风电机组; 频率控制; 转速恢复; 模型预测控制

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202210120

## 0 引言

为实现“碳达峰、碳中和”目标, 在中国的“十四五”规划中, 风电将实现跳跃式发展<sup>[1-2]</sup>。大规模风电接入电网后势必导致系统惯性降低, 电网调频能力不足<sup>[3-4]</sup>。近年来, 研究人员提出了虚拟惯量控制、下垂控制、综合惯性控制等风电机组调频控制策略<sup>[5-7]</sup>, 使其协助传统电源参与系统调频<sup>[8-9]</sup>。风电机组参与系统调频时通过释放转子动能提供有功支撑, 但在转速恢复过程中有功功率瞬时下降会造成电网频率二次跌落<sup>[10]</sup>。一些学者通过改进风机的控制策略来抑制频率二次跌落, 有效提高了电网的调频性能。

双馈风电机组 (doubly fed induction generator, DFIG) 调频过程中的频率和转速控制问题, 目前已有相关研究。文献<sup>[11]</sup>提出了一种基于限转矩的 DFIG 虚拟惯量控制策略, 为避免有功功率的瞬时下降造成频率二次跌落过大的问题, 通过在转子转速恢复过程中减少并保持恒定风机输出功率参考值, 实现转子转速恢复, 同时降低频率的二次跌落, 支持系统频率控制。文献<sup>[12]</sup>提出了

转速恢复过程中 4 种风机电磁转矩补偿方法, 并分析了 4 种方法在不同风电渗透率下频率二次跌落的抑制效果。文献<sup>[13]</sup>通过在风电系统中配置储能装置参与调频, 在降低二次频率跌落的同时实现了风机转速的快速恢复, 但配置大规模储能的经济性较差。以上研究均未使用最优控制的方法来处理风机调频过程中的转速恢复和频率二次跌落问题, 因而不具有最优性。此外, DFIG 参与调频时还应考虑其功率、转速上下限等约束条件。模型预测控制 (model predictive control, MPC) 能较好地处理以上问题。MPC 是一种基于系统模型的先进的最优控制技术, 其优点在于采用滚动优化策略, 利用系统实测量不断反馈校正, 克服了预测模型和其他不确定性带来的偏差, 能够有效地解决存在约束的最优控制问题<sup>[14-15]</sup>。已有部分研究使用 MPC 来解决含风电的有功功率和调频控制问题<sup>[16-17]</sup>。文献<sup>[18]</sup>在系统发生扰动以及系统参数发生变化时, 在风电调频过程中基于 MPC 生成风电机组最优转矩补偿量, 在提高电网的调频能力的同时平抑风电功率波动。文献<sup>[19]</sup>将风力发电机非线性动力学纳入模型预测控制设计中, 提出了一种基于非线性模型预测控制的风电场频率调节控制策略, 保证了系统频率响应和风力发电机稳定运行。但以上基于 MPC 的风电机

收稿日期: 2022-10-28; 修回日期: 2023-05-04。

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52177098)。

组调频控制策略均没有考虑调频过程中的风机转速恢复和频率二次跌落问题。

针对现有的双馈风电机组参与系统调频后无法兼顾转速恢复和抑制频率二次跌落的问题, 本文结合 MPC 算法, 提出了一种风机转子转速恢复策略。将维持系统频率和恢复转子转速作为目标函数, 在兼顾抑制频率二次跌落的基础上, 保证了风机转速的恢复。最后, 通过仿真对所提方法进行验证。

### 1 风电机组综合惯性控制方法

DFIG 综合惯性控制框图如图 1 所示, 其控制过程分为 2 个部分<sup>[20]</sup>, 对应的风机功率-转速曲线如图 2 所示。

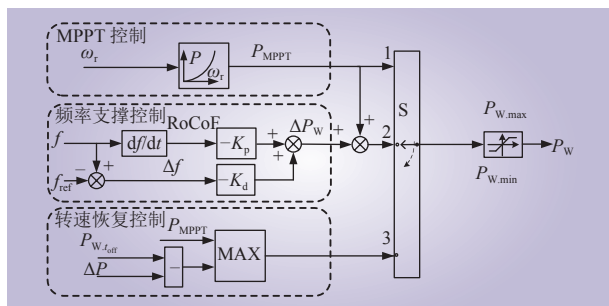


图 1 综合虚拟惯性控制框图

Fig. 1 Diagram of comprehensive virtual inertia control

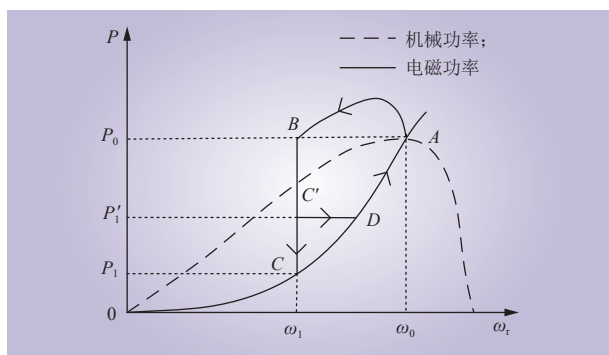


图 2 DFIG 功率-转速曲线

Fig. 2 DFIG power-speed curve

1) 惯量响应阶段, 如图 2 中实线 AB 所示。A 点是系统稳态下 DFIG 处于最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制时的常规运行点, 其输出功率为  $P_0$ 。当系统频率发生大的变化, 触发 DFIG 的惯性响应, 其输出功率

从 MPPT 的值提高至参考值  $P_{Wref}$  为

$$P_{Wref} = -K_p \frac{df}{dt} - K_d \Delta f + P_{MPPT} \quad (1)$$

式中:  $K_p$  为虚拟惯性系数;  $K_d$  为下垂系数;  $P_{MPPT}$  为风机 MPPT 模式下的有功输出;  $f$  为系统频率;  $\Delta f$  为系统频率变化量。

惯量响应过程中, DFIG 输出功率大于其机械功率, 转子转速  $\omega_r$  一直降低, 可迅速将存储的转子动能释放出来。电磁功率与机械功率之间的差值先增大然后减小, 转速变化率也先增大后减小, 直至电磁功率等于  $P_0$ , 对应于图 2 中 B 点。

2) 转速恢复阶段, 如图 2 中曲线 BCA 所示。惯量响应结束后, DFIG 输出功率由惯性控制切换为 MPPT 控制, DFIG 输出功率由  $P_0$  降至  $P_1$ , 即图 2 中 B 点到 C 点。然后, DFIG 输出功率沿 MPPT 曲线由 C 点恢复到 A 点, 转子转速由最低转速  $\omega_1$  恢复到最优转速  $\omega_0$ 。惯性控制退出时 DFIG 输出功率的突降可能引起频率的二次跌落。

针对 DFIG 惯性控制转速恢复过程存在的频率问题, 文献 [11] 提出惯量响应结束后通过减少 DFIG 输出功率减载量来降低频率二次跌落的方法。如图 2 所示, 惯量响应结束后, DFIG 输出功率由  $P_0$  降低到  $P_1'$ , 即 B 点到 C' 点, 并保持一段时间  $P_1'$  恒定, 即 C' 点到 D 点, 然后, DFIG 输出功率沿 MPPT 曲线由 D 点恢复到 A 点, 转子转速由  $\omega_1$  恢复到  $\omega_0$ 。该方法有效提高了系统频率的二次跌落最低点, 但也降低了风机转子转速的恢复速度。文献 [21] 研究表明, 风机惯性控制过程中, 惯量响应结束后风机有功减载量越多, 引发的系统频率二次跌落就越大, 转子转速恢复越快; 风机有功减载量越小, 引发的系统频率二次跌落就越小, 转子转速恢复速度越慢。因此, 风机惯性控制转速恢复过程应考虑有效降低频率的二次跌落, 同时保证风机转子转速恢复速度。

## 2 系统描述和建模

### 2.1 系统频率动态模型

当系统中功率不平衡时, 交流电网的频率发生偏移, 常规机组和风电场风电机组共同参与调频, 为建立预测模型, 考虑含风电机组的电网频率动态模型为

$$\frac{2H}{f_n} \frac{df}{dt} = P_G + P_W - P_L \quad (2)$$

式中： $P_G$ 为系统内常规机组的总有功功率； $P_W$ 为风电机组的有功功率； $P_L$ 为负荷功率； $H$ 为系统的等效惯性； $f_n$ 为系统额定频率。

DFIG 惯量响应释放转子动能为系统提供有功支撑后，若转子转速不恢复，不仅会导致风能利用率下降，甚至会造成 DFIG 失速，加剧系统的不平衡状态，造成更为严重的频率问题。设 DFIG 在  $t_{\text{off}}$  时转速恢复控制启动，DFIG 通过减小电磁功率以满足转速恢复的充要条件，设 DFIG 在转速恢复启动时刻电磁功率变化量为  $\Delta P$ ，则在 DFIG 转速恢复过程中电网的频率动态模型为

$$\frac{2H}{f_n} \frac{df}{dt} = P_G + (P_W + \Delta P) - P_L \quad (3)$$

在一个控制周期内，风机有功功率变化量为  $\Delta P$ 。将各时刻系统中同步机组和负荷的功率差设为外部功率不平衡量  $P_{\text{UB}} = P_G - P_L$ 。

## 2.2 风电机组动态模型

DFIG 的数学模型反映其转子转速  $\omega_r$ 、机械功率  $P_m$  与电磁功率  $P_e$  的相互关系，为

$$2H_w \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_r} \quad (4)$$

式中： $H_w$ 为风电机组的惯性时间常数。

利用泰勒展开对上述非线性方程进行线性化。假设在一个控制周期内，机械功率保持  $P_{m0}$  不变，并假设风机反馈的转速当前值，亦即一个控制周期内转速变化的初始值为  $\omega_{r0}$ ，变化量为  $\Delta\omega_r$ ，而电磁功率的初始值为  $P_{e0}$ ，变化量为  $\Delta P$ ，则有

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{P_{e0} - P_{m0}}{2H_w \omega_{r0}^2} \Delta\omega_r - \frac{1}{2H_w \omega_{r0}} \Delta P + \frac{1}{2H_w \omega_{r0}} (P_{m0} - P_{e0}) \quad (5)$$

## 2.3 系统模型

联合系统频率响应方程和风机转子运动方程，构成系统模型的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{E} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{x}$ 为状态变量； $u$ 为控制变量， $\mathbf{y}$ 为输出变量； $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{C}$ 为系数矩阵。

其中

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [f \ \Delta\omega_r]^T \\ u = \Delta P \\ \mathbf{y} = [f \ \Delta\omega_r]^T \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{P_{e0} - P_{m0}}{2H_w \omega_{r0}^2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{f_n}{2H} \\ 1 \\ \frac{1}{2H_w \omega_{r0}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{f_n}{2H} P_{\text{UB}} & 0 \\ 0 & \frac{P_{m0} - P_{e0}}{2H_w \omega_{r0}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

## 3 预测控制策略设计

MPC 方法的主要思想是：在整个控制时域  $N_p$  中，令  $k$  时刻为当前时刻，结合系统的测量值，通过求解满足目标函数以及各种约束的优化问题，得到一组有  $N_p$  个控制变量的序列，与传统的最优控制不同的是，MPC 只将第一个元素作为被控对象的实际控制量；当来到下一时刻  $k+1$  时重复上述过程，不断滚动优化，以此实现对被控对象的持续控制。因此就双馈风电机组转速恢复控制而言，在  $k$  时刻，MPC 控制器由当前 DFIG 的运行参数、系统频率  $f$  以及估计的有功不平衡量  $P_{\text{UB}}$  等实时信息，求解出一组 DFIG 有功功率减载量的控制序列，取该序列的第一个有功功率减载量  $\Delta P(k)$  作用于 DFIG 输出功率参考值。

在本文双馈风电机组转速恢复控制策略中，控制器应满足 2 个要求：1) 为防止频率的二次跌落，最小化转速恢复过程中电网的频率偏差；2) 保证双馈风电机组转速恢复性能。因此，目标函数表示为

$$\min \left( q \sum_{k=1}^{N_p} \|f(k) - f_{\text{ref}}\|^2 + r \sum_{k=1}^{N_p} \|\Delta\omega_r(k)\|^2 \right) \quad (8)$$

式中： $f_{\text{ref}}$ 为系统参考频率； $\Delta\omega_r(k)$ 为 MPPT 控制下的转子最优转速与每时刻的转速的差值； $q$ 、 $r$ 分别为 2 个目标项的权重系数。

在式 (8) 中，参考频率  $f_{\text{ref}}$  根据下垂曲线设



置<sup>[17]</sup>, 即

$$f_{\text{ref}} = f_n - [-K_R(P_G(k) - P_L(k) + P_W(k))/P_{LN}] \quad (9)$$

式中:  $K_R$  为下垂系数;  $P_{LN}$  为系统额定功率。

在 MPC 控制器中, 为保证系统稳定、合理运行, DFIG 输出功率和转速应满足

$$P_{\text{MPPT}}(\omega_{r0}) \leq P_{e0} + \Delta P \leq P_{\text{MECH}}(\omega_{r0}) \quad (10)$$

$$\omega_1 \leq \omega_{r0} + \Delta\omega \leq \omega_0 \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{MPPT}}(\omega_{r0})$ 、 $P_{\text{MECH}}(\omega_{r0})$  分别为转速  $\omega_{r0}$  对应的 MPPT 功率和机械功率。

预测模型(式(6)(7))、目标函数(式(8))和约束条件(式(10)(11))构成了模型预测控制的问题。通过将 MPC 问题转化成标准二次规划问题进行求解, 可以得到一组长度为  $N_p$  的 DFIG 有功减载量  $\Delta P$  最优解序列, 取该序列的第一个元素即为当前时刻 DFIG 有功减载量。

从式(2)可以看出, 系统的频率  $f$  和  $P_G$ 、 $P_L$  和  $P_W$  相关。从风机的角度来看,  $P_G$  和  $P_L$  通常在风机系统处无法被直接测得, 因此本文采用了一种基于滚动时域优化(MHE)的估计方法对系统外部功率不平衡量  $P_{UB}$  进行估计<sup>[22]</sup>。

#### 4 基于 MHE 的系统不平衡功率估计

对系统频率动力学模型(式(2))进行了改写并扩展为

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{P_{UB} + P_W}{2H/f} \\ \frac{dP_{UB}}{dt} = \delta_{UB} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\delta_{UB}$  为独立的高斯白噪声。

该模型可以进一步离散化为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} f(k+1) \\ P_{UB}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{T_T f_n}{2H} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(k) \\ P_{UB}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_T f_n}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} P_W(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ T_T \end{bmatrix} \delta_{UB}(k) \\ f(k) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} f(k) \\ P_{UB}(k) \end{bmatrix} + \delta_f(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\delta_f$  为独立的高斯白噪声;  $T_T$  为采样周期。

式(13)是一个标准的线性状态空间模型, 因此可以建立一个标准的 MHE 估计器来估计其状态, 从而得到系统的外部功率不平衡估计量  $P_{UB}$ 。

#### 5 仿真分析

为验证所提转速恢复控制的有效性, 本文在 Matlab/Simulink 环境下搭建了一个高风电渗透率的电力系统模型, 该模型包括 2 台 900 MW 同步发电机、由 180 台 5 MW DFIG 组成的 900 MW 聚合风电场, 原始负荷水平为 1 400 MW, 仿真系统结构如图 3 所示。

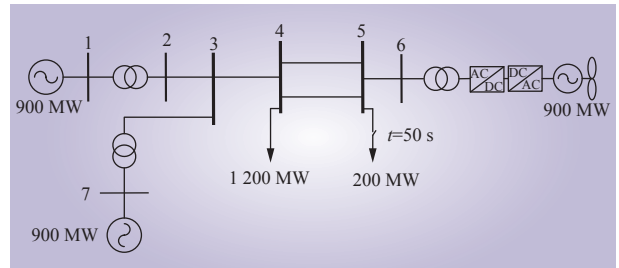


图 3 仿真系统结构

Fig. 3 Structure of simulation system

将本文所提基于 MPC 的转速恢复策略、传统转速恢复策略、改进转速恢复策略 3 种策略进行仿真对比实验, 分析转速恢复及频率二次跌落的情况。在 50 s 时在节点 5 处投入 200 MW 负荷作为系统功率扰动事件, 此时系统频率降低, 频率支撑阶段采用图 1 所示综合惯性控制策略( $K_p=60$ ,  $K_d=15$ ),  $t_{\text{off}}$  时刻启动转速恢复策略。传统转速恢复策略中, DFIG 电磁功率直接减载到 MPPT 曲线上对应功率点。设置风电出力水平为 30% 额定功率和 50% 额定功率 2 个算例。

##### 5.1 算例 1: 风电出力 30% 额定功率, 负荷扰动 200 MW

算例 1 仿真结果如图 4 所示, 可以看出, 综合惯性控制结束时, 当 DFIG 采用传统转速恢复策略时, 功率减载量  $\Delta P=0.085$  p.u., 引发了严重的频率二次跌落, 频率跌落至 49.351 Hz; 转子吸收较多动能, 转速快速恢复, 在 105 s 转速恢复至初始值。

DFIG 采用改进转速恢复策略时, 转子转速恢复变慢, 直到在 108 s 时转子转速恢复稳定, 但相比之下提高了系统的频率稳定性, 频率二次跌落得到改善, 其最低点增加至 49.463 Hz, 这主要因为改进的转速恢复策略减小了转子转速恢复初期有功减载量, 从 0.085 p.u. 减小至 0.043 p.u., 从而

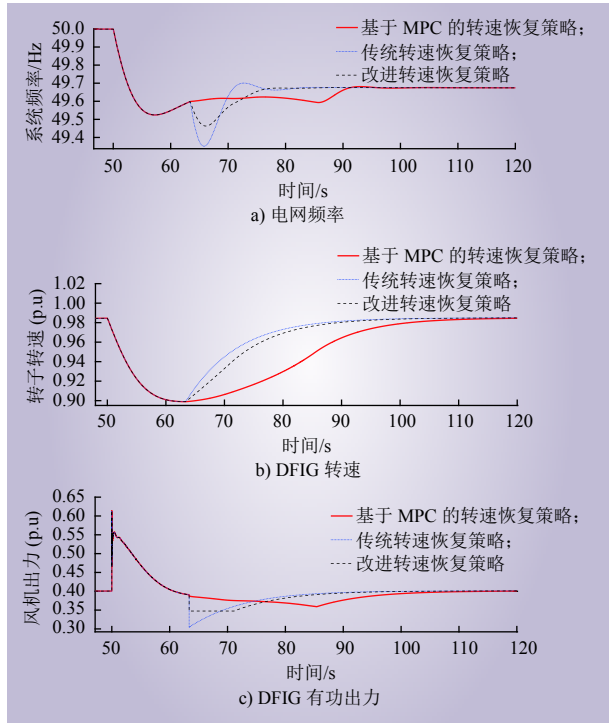


图 4 算例 1 仿真结果

Fig. 4 Simulation results of case 1

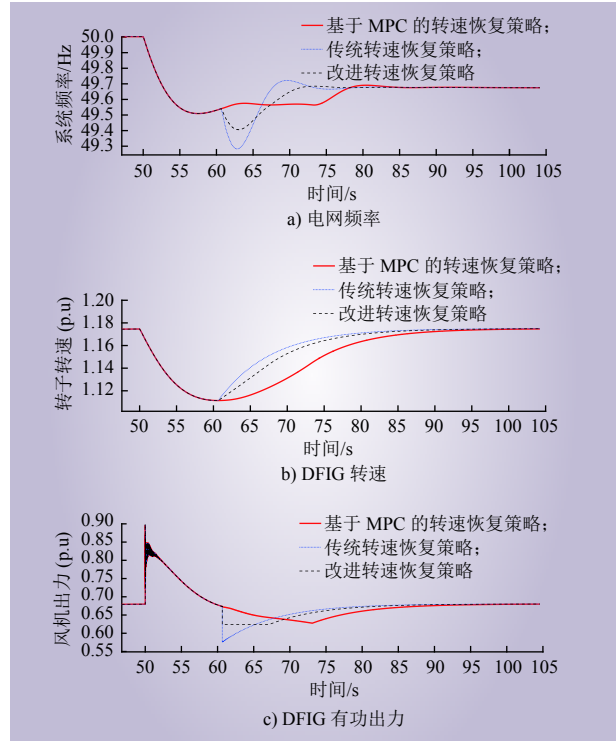


图 5 算例 2 仿真结果

Fig. 5 Simulation results of case 2

抑制了频率二次跌落。

DFIG 采用基于 MPC 的转速恢复策略时，引发的频率二次跌落微小，这主要因为 MPC 的优化目标一方面是可防止频率的二次跌落，另一方面保证双馈风电机组转速恢复性能。转速恢复初期，DFIG 有功减载量较小，以  $\Delta P$  缓慢减小的情况下启动转速恢复控制，有效抑制了频率二次跌落；随时间增长，为保证转子转速恢复，DFIG 有功减载量逐渐增大，转速恢复加快，直到 115 s 转速恢复至初始值。

### 5.2 算例 2：风电出力 50% 额定功率，负荷扰动 200 MW

算例 2 仿真结果如图 5 所示。系统频率二次跌落比算例 1 严重，采用传统转速恢复策略时，功率减载量  $\Delta P=0.098$  p.u.，引发的频率二次跌落问题更加严重，其最低点为 49.283 Hz，但转子转速恢复较快，在 95 s 恢复稳定；改进的转速恢复策略的功率减载量  $\Delta P=0.049$  p.u.，引发的频率二次跌落最低点为 49.41 Hz，转子转速在 98 s 恢复稳定。采用基于 MPC 的转速恢复策略，对系统的频率稳定性影响较小，引发的频率二次跌落微小，且转子转速在 103 s 恢复稳定。

对比图 4 和图 5 可知，采用基于 MPC 的转速恢复策略，随着风电出力的增加，系统发生扰动时，DFIG 输出更多转子动能参与系统调频，转子转速大幅下降，转速恢复控制策略的  $t_{off}$  与  $\Delta P$  均发生较大变化，导致转速恢复策略的性能受到影响。

表 1 为 2 个算例下不同控制策略的关键指标对比，可以看出，采用本文控制策略，算例 1 和算例 2 的频率二次跌落最低值、启动转速恢复策略瞬间  $t_{off}$  时刻系统频率变化率绝对值等指标均最小，风机转速恢复时间无明显增加，保证了风机转速的恢复性能，验证了本文所提策略的有效性。

表 1 不同控制下的关键指标对比  
Table 1 Comparison of key indicators under different controls

算例	控制策略	频率二次跌落最低值/Hz	$t_{off}$ 时刻频率变化率绝对值/(Hz·s <sup>-1</sup> )	转速恢复时间/s
1	传统	49.351	0.142 5	105
	改进	49.463	0.063 6	108
	MPC	—	0.006 8	115
2	传统	49.283	0.209 3	95
	改进	49.41	0.095 2	98
	MPC	—	0.014 1	103

## 6 结语

本文针对双馈风电机组惯量控制转速恢复过程中造成的系统频率二次跌落问题,提出了一种基于 MPC 的双馈风机转子转速恢复控制策略。利用风机转子旋转惯量响应系统调频变化控制中,转速恢复过程中风机有功减载量对系统频率和转子转速的影响。建立了以降低频率二次跌落和保证转子转速恢复性能为目标函数的 MPC 优化模型,根据调频过程中系统频率变化量实时滚动优化风机有功减载量,解决了风机转子转速恢复过程中的频率二次跌落问题,提高了风机参与系统调频的性能。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局新闻发言人. 国家能源局 2021 年一季度网上新闻发布会文字实录 [J]. 中国电力, 2021(2): 26-29.
- [2] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势 [J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.  
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, *et al.* Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
- [3] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.  
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, *et al.* Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [4] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.  
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, *et al.* Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [5] 张旭, 陈云龙, 岳帅, 等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望 [J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1793-1803.  
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, *et al.* Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1793-1803.
- [6] WU Y K, YANG W H, HU Y L, *et al.* Frequency regulation at a wind farm using time-varying inertia and droop controls[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 213-224.
- [7] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3462-3469, 3674.  
LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, *et al.* Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3462-3469, 3674.
- [8] 王天翔, 程雪坤, 李伟超, 等. 基于变参数减载控制的风电场一次调频策略 [J]. 中国电力, 2021, 54(12): 94-101.  
WANG Tianxiang, CHENG Xuekun, LI Weichao, *et al.* Primary frequency control strategy for wind farms based on variable parameter de-loading control[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 94-101.
- [9] 伍双喜, 谭嫣, 刘思宁, 等. 风电机组参与调频的系统频率响应模型 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 48-56.  
WU Shuangxi, TAN Yan, LIU Sining, *et al.* System frequency response model with wind turbines participating in frequency regulation[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 48-56.
- [10] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑频率二次跌落的系统频率特征评估及风电调频参数整定 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 11-19.  
ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, *et al.* Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 11-19.
- [11] KANG M, KIM K, MULJADI E, *et al.* Frequency control support of a doubly-fed induction generator based on the torque limit[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 4575-4583.
- [12] LIU K C, QU Y B, KIM H M, *et al.* Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3097-3106.
- [13] 赵晶晶, 李敏, 何欣芹, 等. 基于限转矩控制的风储联合调频控制策略 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4982-4990.  
ZHAO Jingjing, LI Min, HE Xinqin, *et al.* Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4982-4990.
- [14] 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.
- [15] 乐健, 廖小兵, 章琰天, 等. 电力系统分布式模型预测控制方法综述与展望 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 179–191.  
LE Jian, LIAO Xiaobing, ZHANG Yantian, *et al.* Review and prospect on distributed model predictive control method for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 179–191.
- [16] HU J F, SHAN Y H, GUERRERO J M, *et al.* Model predictive control of microgrids - an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110422.
- [17] HUANG S, WU Q W, BAO W Y, *et al.* Hierarchical optimal control for synthetic inertial response of wind farm based on alternating direction method of multipliers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 25–35.
- [18] WANG H X, YANG J Y, 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.
- [19] KOU P, LIANG D L, YU L B, *et al.* Nonlinear model predictive control of wind farm for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3547–3561.
- [20] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64–70.  
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, *et al.* Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64–70.
- [21] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法 [J]. 电网技术, 2020, 44(3): 807–815.  
QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, *et al.* Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 807–815.
- [22] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36–43.  
YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, *et al.* Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36–43.

#### 作者简介:

赵晶晶 (1980—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 从事分布式发电、微电网、风电并网频率电压控制技术研究, E-mail: jjzhao\_sh@163.com;

杜明 (1997—), 男, 硕士研究生, 从事新能源并网控制技术研究, E-mail: 173196559@qq.com;

刘帅 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统弹性技术研究, E-mail: 1421228910@qq.com;

李梓博 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事配电网故障恢复技术研究, E-mail: 446191937@qq.com;

马闻鹤 (1998—), 女, 硕士研究生, 从事分布式发电与微电网技术研究, E-mail: Mwh12\_21@163.com.

(责任编辑 许晓艳)

## Frequency Modulation and Rotor Speed Recovery Strategy of Doubly-Fed Induction Generator Based on Model Predictive Control

ZHAO Jingjing, DU Ming, LIU Shuai, LI Zibo, MA Wenhe

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** The doubly-fed induction generator (DFIG) can participate in the system frequency modulation by releasing the kinetic energy stored in the rotor, but it may cause a secondary frequency drop when the speed is recovered, which is adverse to the frequency stability of the system. Therefore, a strategy for restoring the speed of the rotor in the inertia control of DFIG based on model predictive control is presented in this paper. Firstly, based on the influence of the active power reduction on the system frequency and the rotor speed in the inertia control of DFIG when the speed is recovered, the predictive control model is established; secondly, the objective function considering the reduction of the secondary frequency drop of the system and the recovery of the rotor speed is formulated, and the active power reduction in line with the system frequency in real time is optimized, so as to suppress secondary frequency drop, ensure rotor speed recovery, and improve the stability of the system frequency; lastly, the simulation model is established on the Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52177098).

**Keywords:** DFIG; frequency control; rotor speed recovery; model predictive control