

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200843

# 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略

王同森<sup>1</sup>, 程雪坤<sup>2,3</sup>

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 2. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045; 3. 风光储并网运行技术国家电网公司重点实验室, 北京 100045)

**摘要:**传统的下垂控制策略在整定调频系数时更多关注双馈风机本身的运行状态,较少考虑风电渗透率和系统扰动变化对风机调频过程的影响,控制方法的适应性有待提高。为此,建立了风电参与调频的电力系统频率响应模型,提出了计及转速限值的双馈风机下垂系数整定方法及控制策略。通过推导调频过程转子转速的极小值和稳态值,确定出使风机转速自行稳定且不触发保护下限的下垂系数范围。然后根据扰动的大小在线调整控制参数,避免风机发生过度响应。在DIGSILENT中建立了系统仿真模型。仿真结果表明所提策略能够有效应对不同的系统扰动情况,保证风机自身运行的稳定性。

**关键词:**双馈风机;下垂控制;转速极小值;转速稳态值;频率特性

## Variable droop coefficient control strategy of a DFIG considering rotor speed limit

WANG Tongsen<sup>1</sup>, CHENG Xuekun<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China; 3. Key Laboratory of Wind Energy Storage Grid Connected Operation Technology, State Grid Corporation of China, Beijing 100045, China)

**Abstract:** Traditional droop control strategy pays more attention to the operational state of Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs) when setting frequency modulation coefficients, and less to the influence of wind power permeability and system disturbance on the wind turbine frequency regulation process. The adaptability of the control method needs to be improved. For this reason, a frequency response model of a power system with wind power participating in frequency regulation is established, and the setting method and control strategy of the droop coefficient of DFIG considering a speed limit value are proposed. By deducing the minimum and steady value of rotor speed in the process of frequency regulation, the droop coefficient range which makes the DFIG speed self stabilize, and does not trigger the protection lower limit value, is determined. According to the size of the disturbance, the control parameters are adjusted online to avoid excessive response of the DFIG. A system simulation model is established in DIGSILENT. The simulation results show that the proposed strategy can effectively deal with different system disturbances and ensure the stability of the DFIG itself.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research and Application on Grid Connection Adaptability of Practical Control Technology of New Energy Active Support Power Grid Engineering" (No. 52010118000N).

**Key words:** DFIG; droop control; minimum speed; steady speed value; frequency characteristic

## 0 引言

随着风电技术的迅速发展,双馈风机通过电力电子设备并网,电力系统中的常规同步发电机组并

网容量逐步减小。风电机组具有控制灵活、响应速度快等优点,但机组转速与系统频率解耦,无法主动响应系统频率变化,更不能提供惯量和一次调频支持。风电的大规模接入导致电力系统有效惯量不断降低,在系统发生故障或出现大功率缺额时,容易引发频率安全问题,不利于系统的频率稳定<sup>[1-2]</sup>。

为保证电力系统安全可靠运行,降低风电并网

**基金项目:**国家电网公司总部科技项目“新能源主动支撑电网工程实用化控制技术并网适应性研究和应用”(52010118000N)

对系统频率的影响, 风电需要具备一定的惯性响应和一次调频能力。目前, 风电发展领先的国家, 基于市场机制在电网导则中做出规定<sup>[3-5]</sup>, 促使风电机组参与系统频率控制, 其基本出发点是希望风电能够承担常规同步发电机组的部分调频服务。国内外学者对风电机组参与系统频率调节进行了大量研究, 主要的频率控制策略可以概括为虚拟同步机控制、超速控制、桨距角控制、虚拟惯量控制和下垂控制。

其中, 虚拟同步机控制研究尚处于探索阶段, 未达到风电控制实际应用的水平<sup>[6-7]</sup>; 而对于超速控制和桨距角控制<sup>[8-10]</sup>, 机组稳态时处于限功率运行模式, 偏离了最大功率运行点(Maximum Power Point Tracking, MPPT), 造成了风能的浪费<sup>[11]</sup>。考虑到系统发生大的频率扰动事故的概率较小, 因此该类策略的经济性有待进一步评估<sup>[12]</sup>。

虚拟惯量控制和下垂控制的双馈风机无需预留备用<sup>[13]</sup>。在系统频率下降时, 对风机的有功控制环节附加一个功率增量, 使转子减速以释放其存储的部分旋转动能, 增大风机的有功输出, 帮助系统频率的恢复<sup>[14]</sup>。文献[14-16]采用固定下垂系数控制, 风电机组的频率控制能力较差, 无法适应风速的变化。为此, 文献[17]考虑了不同风速下风机调频能力的差异, 并利用试错法得到最佳调频参数, 但是该方法忽略了系统的影响, 在大扰动下风机可能出现过度响应的情况。文献[18-19]提出了变系数的虚拟惯量控制, 根据转子转速实时修改控制模块的下垂系数, 但该策略的执行过程较为复杂, 在大扰动下的调频效果有待进一步论证。上述文献的下垂控制策略更多地关注双馈风机本身运行状态, 较少考虑冲击负荷变化的影响, 扰动较大时风机易发生过度响应。文献[20]提出了一种扰动自适应的下垂控制策略, 根据频率变化率和风机转速修改下垂系数, 限制转速过度降低。目前对于兼顾风机和系统频率响应特性的下垂系数整定方法还较少, 如何提高机组在不同扰动下的调频能力尚待进一步研究。

针对上述问题, 本文在分析下垂控制和电网频率响应特性的基础上, 建立了双馈风机参与调频的电网动态频率响应模型, 提出了双馈风机的变下垂系数整定方法。其基本思路是, 对含风电的系统动态频率响应模型进行线性化处理, 求解风机在调频过程中转速的极小值和稳态值, 进一步计算出使风机能够保持自身运行稳定性的下垂系数取值范围。然后对系统扰动大小进行在线估计, 依据估计结果在线调整控制参数。最后在 DIGSILENT 中搭建了系

统仿真模型, 验证了所提策略的有效性和合理性。

## 1 下垂控制及电网动态频率响应分析

### 1.1 下垂控制

当系统遭受负荷突增、发电机切机等扰动而出现有功功率缺额时, 系统频率下降, 此时下垂控制启动, 将频率偏差为输入量, 经过比例环节, 输出风机的电磁功率修正量, 此时风机输出的电磁功率参考值由最大功率跟踪模块和下垂控制模块共同确定, 即

$$P_e = P_{ref} + \Delta P_f \quad (1)$$

$$P_{ref} = P_{MPPT} = k_w \omega_r^3 \quad (2)$$

$$\Delta P_f = K_{pf} \Delta f \quad (3)$$

式中:  $P_e$  为风机的电磁功率参考值;  $P_{ref}$  为风机的最大功率跟踪模块输出的参考功率;  $\Delta P_f$  为下垂控制模块输出的电磁功率修正量;  $P_{MPPT}$  为风机的最大输出功率;  $K_w$  为最大功率跟踪系数;  $\omega_r$  为风机转速;  $K_{pf}$  为下垂控制系数;  $\Delta f$  为系统频率偏差。

在调频过程中, 由于风机输出电磁功率上升, 大于风机捕获的风功率, 在转矩差的作用下转子转速开始下降, 释放动能以满足有功输出的需要。考虑到转子所储存的动能有限, 其转速不能一直下降, 否则转子转速的恢复将会非常困难。

### 1.2 电网频率响应分析

为研究风电对电网频率动态响应过程的影响, 建立了如图 1 所示的含风电的电力系统简化模型。模型主要包括两部分: 风电部分和系统部分。风电部分包含风机的机械特性、MPPT 控制以及下垂控制<sup>[21]</sup>。其中:  $P_{mw}$  为风机捕获的机械功率;  $P_{ew}$  为风机输出的电磁功率;  $J$  为风机的转动惯量。系统部分采用的是经典的低阶 SFR 模型<sup>[22]</sup>。其中:  $P_m$  为

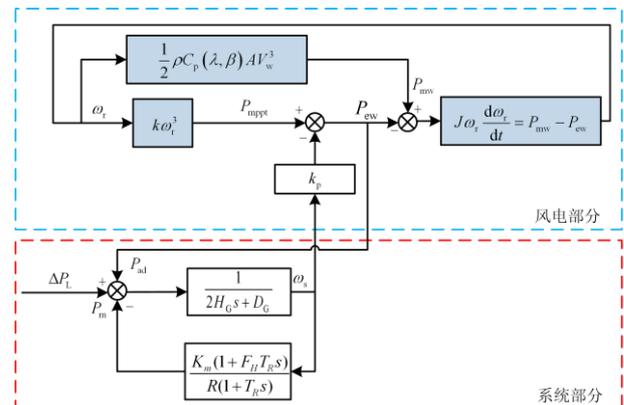


图 1 风电参与调频的电网动态频率响应模型

Fig. 1 Dynamic frequency response model of power grid with wind power participating in frequency regulation

火电机组的机械功率变化量;  $\Delta P_L$  为系统的功率不平衡量;  $\omega_s$  为系统频率。系统频率响应模型的传递函数为

$$\Phi_{pre}(s) = \frac{1}{2H_G s + \frac{K_m(1+F_H T_R s)}{R(1+T_R s)}} \quad (4)$$

式中:  $H_G$  为火电机组的惯性时间常数;  $K_m$  为火电机组功率因数相关的系数;  $F_H$  为高压缸稳态输出功率占总功率的比例;  $T_R$  为火电机组中压缸再热蒸汽容积时间常数;  $R$  为调差系数。

在系统发生有功扰动后, 风电机组测量系统频率, 并依据系统频率调节自身有功出力。这一过程在模型中表示为: 系统部分 SFR 模型的输出量  $\omega_s$  (即系统频率) 经过下垂控制后, 附加到风电的电磁功率参考值上, 而风电总的有功输出则作为系统部分 SFR 模型的一个输入量, 通过释放转子动能为系统提供调频功率增量, 降低系统的频率变化率, 实现风电参与系统频率调节。

在风机参与系统调频的过程中, 转速无论如何下降, 需要满足两个要求: 转速有稳态值, 并且稳态值大于 0.7 p.u.; 转速在整个变化过程中的极小值大于 0.7 p.u.。下面对双馈风机转速的稳态值和极小值进行推导分析。

## 2 双馈风机变下垂系数控制

针对传统下垂控制存在的不足, 本文提出了计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略。假设整个调频过程中, 调频参数不变, 使转速自行稳定并不触发保护下限, 则要对调频参数进行约束, 使转速得稳态值和极小值均大于 0.7 p.u.。

### 2.1 转速的稳态值和极小值

考虑到风机的转速变化不仅与外界风速和控制策略有关, 还与系统的频率变化有关。因此, 需要结合风电参与调频的系统动态频率响应模型进行分析, 首先对风机三个非线性环节进行线性化。

双馈风机的机械功率和 MPPT 控制环节十分复杂, 为了得到较为简洁的系统传递函数, 对这两个环节进行简化处理, 采用初始转速与转速下限值两点连线的斜率作为线性化表达式的等效斜率, 具体线性化过程如图 2 所示。

机械功率和 MPPT 功率的线性化表达式为

$$\Delta P_{mw} = \frac{1}{2} \rho A C_p (\Delta \omega_r)^3 \approx \frac{P_m(\omega_0) - P_m(\omega_{min})}{\omega_0 - \omega_{min}} \Delta \omega_r = k_1 \Delta \omega_r \quad (5)$$

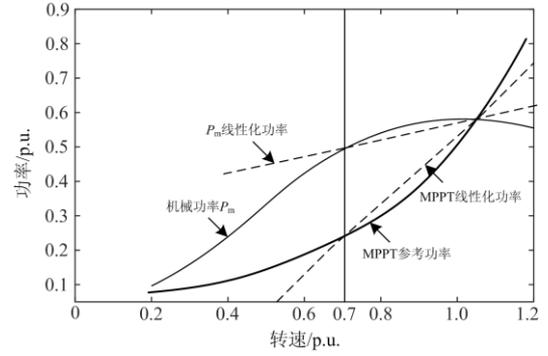


图 2 线性化的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of linearization

$$\Delta P_{MPPT} = \Delta(k_2 \omega_r^3) \approx \frac{P_{MPPT}(\omega_0) - P_{MPPT}(\omega_{min})}{\omega_0 - \omega_{min}} \Delta \omega_r = k_2 \Delta \omega_r \quad (6)$$

式中:  $\omega_0$  表示风机参与调频前的初始转速;  $\omega_{min}$  表示风机的转速下限;  $P_m(\cdot)$ 、 $P_{MPPT}(\cdot)$  分别表示风机在某一转速下的机械功率和按照 MPPT 曲线输出的电磁功率;  $k_1$ 、 $k_2$  分别表示机械功率曲线、MPPT 曲线的等效斜率。

通过对风电机组的转子运动方程进行泰勒级数展开, 忽略高阶项得到:

$$\Delta P_{mw} - \Delta P_{ew} = 2H\omega_{r0} \frac{d\Delta\omega_r}{dt} + 2H\Delta\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \approx 2H\omega_{r0} \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = 2H\omega_{r0} s \Delta \omega_r \quad (7)$$

式中,  $H$  表示风力发电机的惯性时间常数。

需要注意的是, 由于双馈风电机组转子转速与电网频率完全解耦, 模型中的风电部分与系统部分在标么化过程中的基准值不同。因此选取风电场的额定容量作为模型的基准值, 假设电网的风电渗透率为  $\lambda$ , 则火电机组与双馈风机与的装机容量比  $n$  为

$$n = \frac{1-\lambda}{\lambda} \quad (8)$$

统一基准值后的系统调频线性化方程如式(9)一式(11)所示。

$$\Delta P_{ms} = -n \Delta \omega_s \frac{K_m}{R} \frac{1+F_H T_R s}{1+T_R s} \quad (9)$$

$$\Delta P_{es} = n \frac{\Delta P_L}{s} - \Delta P_{ew} \quad (10)$$

$$\Delta \omega_s = \frac{1}{2H_G s} (\Delta P_{ms} - \Delta P_{es}) \quad (11)$$

式中:  $\Delta P_{ms}$  为系统的机械功率变化量;  $\Delta P_{es}$  为系统的电磁功率变化量;  $\Delta P_L$  为系统的功率不平衡量,  $\Delta P_L < 0$  表示负荷突增,  $\Delta P_L > 0$  表示负荷突然减少。

1) 稳态转速偏差量

整理式(5)一式(11)可得双馈风机转速偏差量,应用终值定理可得下垂控制下的风机稳态转速偏差量  $\Delta\omega_s$  :

$$\Delta\omega_s = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta\omega_r(s) = \frac{nK_p \Delta P_L}{(K_p + n \frac{K_m}{R})(k_2 - k_1) - k_2 K_p} \quad (12)$$

2) 最大转速偏差量

式(13)为双馈风机的最大转速偏差表达式,推导过程见附录。

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{n\Delta P_L R}{nK_m K_2 - nK_m K_1 - K_1 k_p R} \left[ 1 + b e^{-\zeta w t_s} \sin(at_s + \varphi) \right] \quad (13)$$

式中:  $a, b, \zeta, w, t_s, \varphi$  的具体表达式见附录。

2.2 变下垂系数控制策略

为了使双馈风机能够有效利用旋转动能响应系统频率变化,且在调频过程中保持自身运行的稳定性,本文首先利用 2.1 节中的转速稳态值和极小值整定风机的下垂系数,通过离线计算得到考虑系统风电渗透率和扰动变化的  $K_p$  值;然后利用在线的方式估计系统的不平衡功率,最后提出双馈风机变下垂系数控制框图,旨在动态调整风电机组出力。具体实现方法如下。

1) 下垂系数的整定方法: 为了提升双馈风机的频率响应能力,防止发生过度响应,调频后的稳态转速和最低转速均应大于 0.7 p.u.,即风机转速的稳态偏差量和最大偏差量小于初始转速与最低转速的差值,约束条件如式(14)、式(15)。

$$\Delta\omega_{\text{稳}} < \omega_0 - 0.7 \quad (14)$$

$$\Delta\omega_{\text{rmax}} < \omega_0 - 0.7 \quad (15)$$

通过联立式(12)一式(15)可求解  $K_p$  的取值范围,采用离线计算的方式获取双馈风机下垂系数。本文选取典型的系统参数,整定得到不同扰动下的  $K_p$  的取值约束,如图 3 所示。具体参数见附录表 A1。

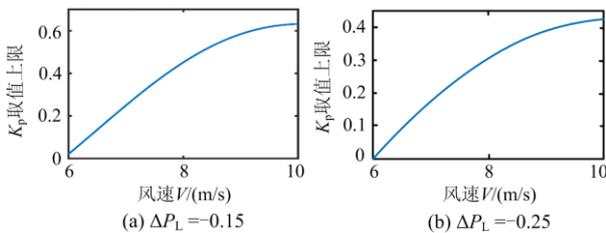


图 3 不同风速下  $K_p$  的取值约束

Fig. 3 Constraints of  $K_p$  under different wind speeds

根据图 3 整定结果,系统频率跌落时,双馈风机通过查表的方式合理设定下垂控制模块的参数,实现变系数控制,提高双馈风机的频率控制能力。

2) 系统不平衡功率的在线估计方法: 相对于其他可通过离线计算获得的参数,系统功率不平衡量  $\Delta P_L$  无法通过离线的方式获取,具有不确定性。所以下面对  $\Delta P_L$  的在线计算方法进行介绍。

根据系统的转子运动方程可得

$$\frac{2H}{f_n} \frac{df}{dt} = P_m - P_e = \Delta P_L \quad (16)$$

由式(16)可知,利用准确测量的发电机频率及其变化率(斜率),以及预先已知的惯性常数(惯性常数可以通过实验确定),可以在扰动发生后通过在线的方式获取系统功率不平衡量  $\Delta P_L$ 。需要注意的是,由于在扰动发生后,系统中的涡轮机、调速器、旋转储备、负载等开始响应频率的动态变化,因此需要在扰动发生后的瞬间测量系统的频率变化率,即  $t=0^+$ s 时,以保证估计结果的准确性。同时,为了获得更可靠的估计值,使用高通滤波器滤除信号中的噪声和随机干扰。

3) 控制实现: 本文所提的变下垂系数策略的控制框图如图 4 所示。当系统发生扰动时,首先由不平衡功率估计单元根据扰动瞬间的频率变化率对  $\Delta P_L$  进行估计,然后结合风速信息查找离线得到的  $K_p$  取值约束表,从而确定合理的下垂系数。同时,由频率检测单元对系统频率进行实时测量,一旦频率偏差  $\Delta f$  越过设定的死区,下垂控制单元根据  $\Delta f$  和整定的下垂系数  $K_p$  给出调频功率增量,释放存储的旋转动能,抑制系统频率的变化。采用所提的控制策略,双馈风机在调频结束时运行在一个新的稳态点且不触发保护下限,因此机组无需进行转速恢复,有效避免了系统频率二次跌落事故。图 4 中,  $V_w$  为风速数据;  $f_{\text{grid}}$  为频率的测量值;  $\omega_r$  为风机的实时转速。

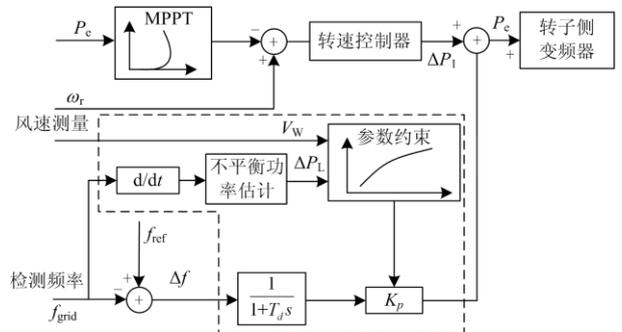


图 4 风机控制原理图

Fig. 4 Wind turbine control schematic diagram

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真系统

在 DIgSILENT PowerFactory 软件中搭建了如图 5 所示的仿真系统模型。该模型包含 3 台同步发电机和一个由双馈风机组成的风电场。每台同步机都配有 IEEE 标准调速系统<sup>[23]</sup>。同步机的调差系数设为 5%，调频死区设为 0。

为分析本文所提的变下垂系数控制策略在风电渗透率和系统扰动变化情况下的有效性，选取三个典型的算例进行仿真分析，各算例的同步发电机和风电场出力情况如表 1 所示。本文中的风电渗透率定义为风电机组的装机容量除以总负荷<sup>[24]</sup>。扰动方式设置为第 10 s 时电网发生负荷突增。

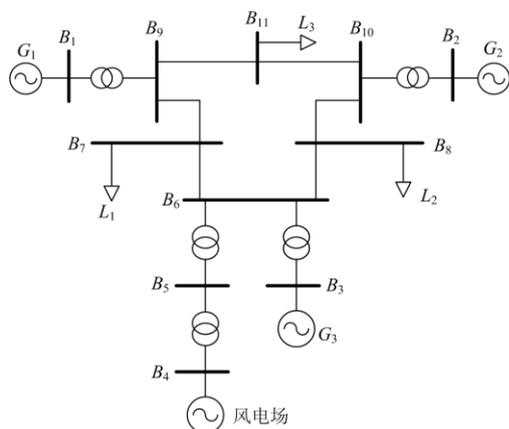


图 5 仿真系统模型

Fig. 5 Simulation power system model

表 1 同步机和风电场的输出功率

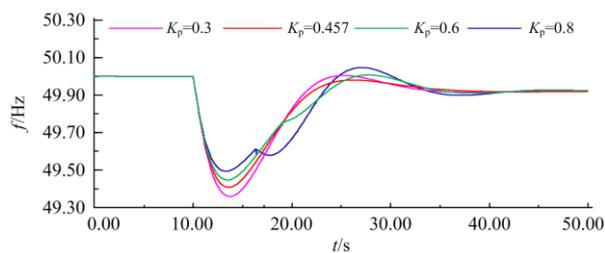
Table 1 Synchronous power and wind farm output

算例	负荷/ MW	$G_1$ / MW	$G_2$ / MW	$G_3$ / MW	风电/ MW	$\Delta P_L$ / MW
1	315	72	163	85	13.327	50
2	315	60	163	85	26.465	50
3	315	72	163	85	13.327	75

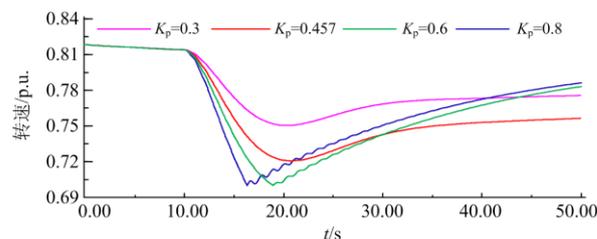
#### 3.2 不同风电渗透率下的控制效果分析

为分析风电渗透率对双馈风机调频响应的影响，下面分别选取风电渗透率为 16% 和 32% 的情况进行仿真，风速均设定为 8 m/s。

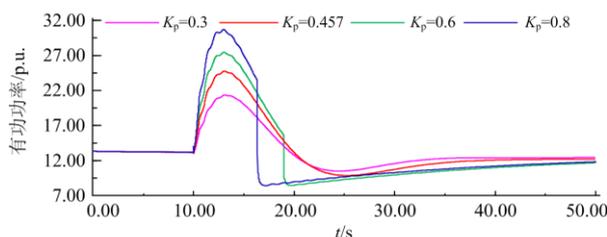
算例 1:  $\lambda=16\%$ ,  $\Delta P_L=-0.15$ 。风电场的额定容量为 50 MW。下垂系数  $K_p$  分别取为 0.3、0.457、0.6 和 0.8，其中 0.457 为按照本文策略整定的下垂系数，0.3 为偏小设定值，0.6 和 0.8 为偏大取值。仿真结果如图 6 所示。



(a) 系统频率



(b) 双馈风机转速



(c) 风机输出的电磁功率

图 6 算例 1 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of example 1

由图 6(a)和图 6(c)可知，当下垂系数设置偏大时，双馈风机因过度响应而触发转速保护下限 (0.7 p.u.)，风机输出功率发生大幅度跌落，系统频率出现二次跌落。尤其是  $K_p$  取为 0.8 时，双馈风机退出调频后的输出功率下降 15.389 MW，对系统频率造成了较大的二次冲击。当采用本文方法时，双馈风机能够合理释放存储的旋转动能，为系统提供频率支持。当转速下降至 0.72 p.u.，风机转速不再下降，避免了系统频率的二次跌落。下垂系数设置偏小时虽然也未出现二次跌落的问题，但由于旋转动能利用不足，调频效果比本文策略差。

算例 2:  $\lambda=32\%$ ,  $\Delta P_L=-0.15$ 。保持系统的不平衡功率不变，风电场的额定容量增加到 100 MW。下垂系数  $K_p$  分别取为 0.3、0.54、0.7 和 0.8，其中 0.54 为按照本文策略整定的下垂系数，0.3 为偏小设定值，0.7 和 0.8 为偏大取值。仿真结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出，在风电渗透率增大的情况下，双馈风机的下垂系数设置较大时，系统频率出现了更为明显的二次跌落，不利于系统的频率安全。按照本文策略整定双馈风机的下垂系数，能够有效避

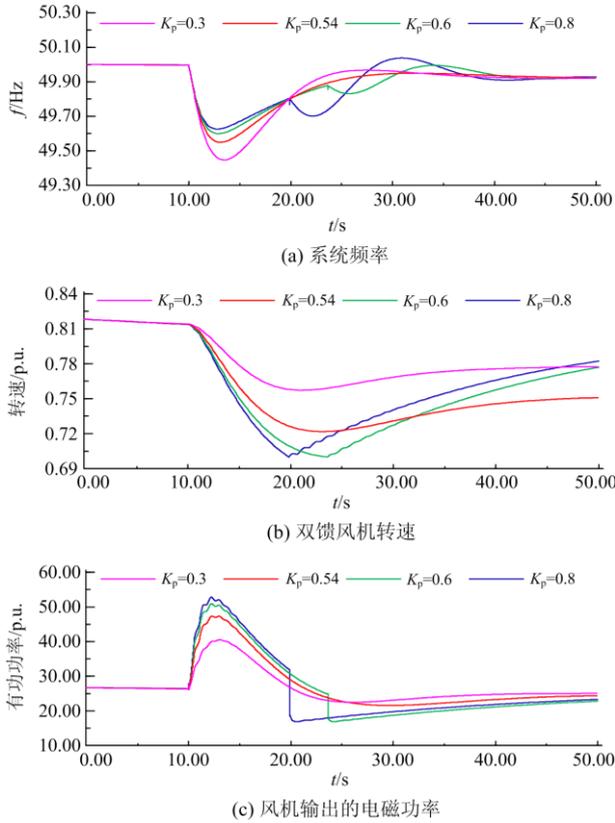


图7 算例2的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of example 2

免风机发生过度响应，且与算例1相比，对频率最低点的提升作用更加明显，这是由于双馈风机能够虚拟出比同等容量的火电机组更大的虚拟惯量，从而有效降低系统频率的变化率。与算例1类似，当 $K_p$ 取值偏小时，由于风机的旋转动能释放较少，调频效果较差。

综合算例1和算例2可知，在风电渗透率变化的情况下，本文所提的下垂系数整定方法，能够有效利用双馈风机的旋转动能增大系统的等效惯量，同时避免系统频率的二次跌落。

### 3.3 不同扰动下的控制效果分析

考虑到传统的下垂控制策略在系统大功率扰动情况下的鲁棒性较差，容易引发系统频率的二次跌落。因此，下面将系统突增负荷设置为25%，其他条件保持不变，进一步验证本文的策略。

算例3： $\lambda=16\%$ ， $\Delta P_L=-0.25$ 。系统的系统突增负荷设置为25%，其他条件与算例1相同。下垂系数 $K_p$ 分别取为0.2、0.29、0.6和0.8，其中0.29为按照本文策略整定的下垂系数，0.2为偏小设定值，0.6和0.8为偏大取值。仿真结果如图8所示。

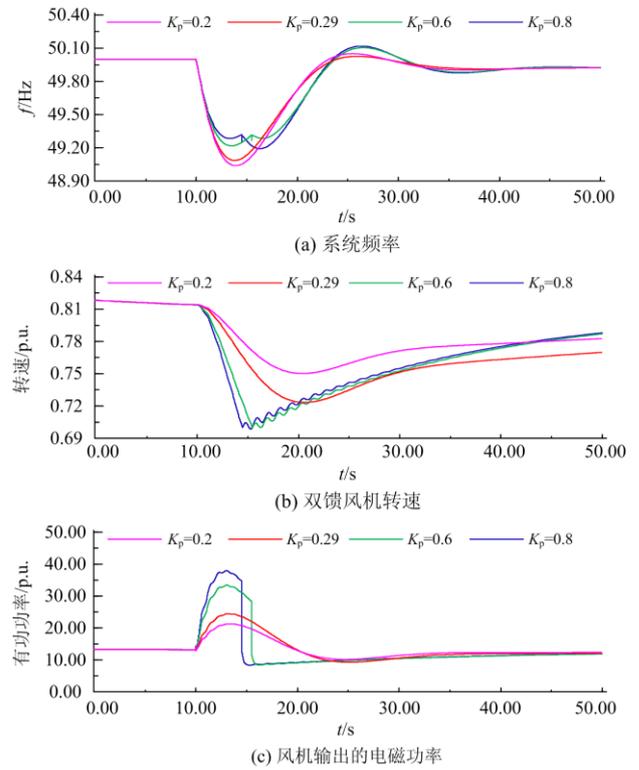


图8 算例3的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of example 3

由图8可知，当 $K_p$ 取为0.29时，在虚拟惯量控制下，双馈风机能够有效利用存储的旋转动能为系统提供频率支持。在调频过程中，双馈风机转速最低下降到0.7234 p.u.，能够在保证机组自身运行稳定性的前提下，帮助系统频率恢复。当 $K_p$ 取为0.2时，双馈风机的旋转动能未得到有效利用，调频效果比本文策略差。当 $K_p$ 值分别取为0.6、0.8时，风机在扰动发生后，转速快速下降，并在触发转速保护下限后退出调频，导致系统发生明显的频率二次跌落问题。虽然增大取值可以加快风机旋转动能的释放，提高系统频率的最低点，但 $K_p$ 取值过大会导致风机的过度响应，易引发系统频率的二次跌落，不利于系统频率的后期恢复。

综合算例1和算例3可知，本文所提策略在大扰动下也能够有效利用风机的旋转动能参与调频，同时保证机组自身运行的稳定性，改善系统的频率响应特性。

## 4 结论

针对传统风机下垂控制策略的不足，本文对下垂系数的整定方法进行深入研究，综合考虑了风机运行状态和系统频率响应特性，提出了计及转速限

值的双馈风机下垂系数整定方法及控制策略。

1) 下垂控制的调频参数影响风机自身运行状态和系统频率恢复过程。通过推导调频过程中风机转子转速的极小值和稳态值, 确定出风机的下垂系数取值范围, 使风机能够有效释放转子动能, 并保证自身运行的稳定性。

2) 通过在线估计的方式获取系统功率不平衡

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{nk_p \Delta P_L / s}{4HH_G \omega_0 s^2 + 2\left(H\omega_0 k_p + \frac{nk_m}{R} H\omega_0 + k_2 H_G - k_1 H_G\right)s + \left(\frac{nk_m k_2}{R} - \frac{nk_m k_1}{R} - k_1 k_p\right)} \quad (1)$$

将式(1)化为标准形式, 如式(2)。

$$\Delta\omega_r(s) = \left(\frac{n\Delta P_L R}{nK_m K_2 - nK_m K_1 - K_1 k_p R}\right) \frac{w^2}{s(s^2 + 2\zeta ws + w^2)} \quad (2)$$

式中:

$$w^2 = \frac{nK_m(k_2 - k_1) - k_1 k_p R}{4HH_G \omega_0 R};$$

$$\zeta = \frac{H\omega_0 k_p R + nk_m H\omega_0 + (k_2 - k_1)H_G R}{nK_m(k_2 - k_1) - k_1 k_p R} w。$$

对式(2)进行拉氏反变换, 如式(3)。

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{n\Delta P_L R}{nK_m K_2 - nK_m K_1 - K_1 k_p R} [1 + be^{-\zeta wt} \sin(at + \varphi)] \quad (3)$$

式中:  $a = w\sqrt{1 - \zeta^2}$ ;  $b = \sqrt{\frac{1}{1 - \zeta^2}}$ ;

量, 然后结合风速信息修改风机的下垂系数, 实现变系数控制, 提高双馈风机的频率控制能力。

## 附录

1) 双馈风机的最大转速偏差推导

对模型中的系统部分进行适当简化, 忽略火电机组再热蒸汽容积时间常数  $T_R$  项的影响, 得到双馈风机转速偏差的传递函数, 如式(1)。

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a}{1 - \zeta w}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta}\right)。$$

令  $\frac{d\Delta\omega_r(t)}{dt} = 0$ , 可得  $at + \varphi' = n\pi$ ,  $n$  取 0 时可

得双馈风机出现最低转速的时间  $t_s$  为

$$t_s = \frac{1}{a} \arctan\left(\frac{a}{1 - \zeta w}\right) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)即可得到双馈风机在调频过程中的最大转速偏差为

$$\Delta\omega_{r\max} = \frac{n\Delta P_L R}{nK_m K_2 - nK_m K_1 - K_1 k_p R} [1 + be^{-\zeta wt_s} \sin(at_{\max} + \varphi)] \quad (5)$$

2) 系统关键参数

系统关键参数如表 A1 所示。

表 A1 系统关键参数

Table A1 Key parameters of the system

双馈风机			系统				
额定功率/kW	风轮直径/m	风电渗透率	$R$	$F_H$	$T_R$	$H_G$	$K_m$
1 500	34	16%(32%)	5%	0.3	8	4	0.95

## 参考文献

- [1] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Power system frequency modulation under high wind power penetration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [2] 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.

- [3] National Grid (Great Britain) Company. The grid code[R]. London: National Grid (Great Britain) Company, 2006.
- [4] Nordic Grid. Nordic grid code 2007 (Nordic collection of rules)[R]. Norway: Nordic Grid, 2007.
- [5] EON N, GMB H. Grid code-high and extra high voltage[R]. Bayreuth: E.ON Netz Gmb H, 2006.
- [6] LIU Y, ZHOU X, OUYANG S. Capacitor voltage synchronizing control-based VSG scheme for inertial and primary frequency responses of Type-4 WTGs[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(14): 3461-3469.
- [7] MA Y, CAO W, YANG L, et al. Virtual synchronous generator control of short-term energy storage full converter

- wind turbine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8821-8831.
- [8] 姜莹, 边晓燕, 李东东, 等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用, 2017(9): 121-127.  
JIANG Ying, BIAN Xiaoyan, LI Dongdong, et al. Research on the application of DFIG in frequency regulation of microgrid based on variable load shedding rate over-speed control[J]. Motor and Control Applications, 2017(9): 121-127.
- [9] 陈志杰, 李凤婷, 黄蓉. 计及需求响应的含风电电力系统旋转备用优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 117-122.  
CHEN Zhijie, LI Fengting, HUANG Rong. Spinning reserve optimal configuration strategy of a wind power system with demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 117-122.
- [10] MA J, SONG Z, ZHANG Y, et al. Robust stochastic stability analysis method of DFIG integration on power system considering virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4069-4079.
- [11] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.  
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [12] YE H, PEI W, QI Z. Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3414-3423.
- [13] IUNGO G V, VIOLA F, CAMARRI S, et al. Linear stability analysis of wind turbine wakes performed on wind tunnel measurements[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 737: 499-526.
- [14] 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.
- [15] JAN V D V, DE KOONING J D M, MEERSMAN B, et al. Droop control as an alternative inertial response strategy for the synthetic inertia on wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1129-1138.
- [16] GHOSH S, KAM S, SENROY N, et al. Doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm control framework for primary frequency and inertial response application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1861-1871.
- [17] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 59-68.  
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Frequency regulation technology of wind turbine micro-grid based on variable coefficient virtual inertia and over-speed control of doubly fed wind turbine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 59-68.
- [18] 兰飞, 潘益丰, 时萌, 等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 51-59.  
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 51-59.
- [19] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4002-4011.
- [20] HWANG M, MULJADI E, JANG G, et al. Disturbance-adaptive short-term frequency support of a DFIG associated with the variable gain based on the ROCOF and rotor speed[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1873-1881.
- [21] 林今, 李国杰, 孙元章, 等. 双馈风电机组的小信号分析及其控制系统的参数优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 86-90.  
LIN Jin, LI Guojie, SUN Yuanzhang, et al. Small-signal analysis and control system parameter optimization for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 86-90.
- [22] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 720-729.
- [23] REPORT I C. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1973, PAS-92(6): 1904-1915.
- [24] YANG D, KIM J, KANG Y C, et al. Temporary frequency support of a DFIG for high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3428-3437.

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-10-14

作者简介:

王同森(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为风电参与系统调频控制; E-mail: TS\_ncepu@163.com

程雪坤(1993—), 女, 硕士, 研究方向为新能源发电与控制。E-mail: chengxk027@126.com

(编辑 葛艳娜)