

# 基于双馈风电机组超速减载与直流协同的频率控制策略研究

顾天一

南京工程学院 电力工程学院 江苏南京 211167

DOI: 10.12238/ems.v7i3.12275

**[摘要]** 风电机组参与系统一次调频是提升电力系统稳定性的关键手段,但由于风机转子转速上限,送端电网的功率备用较小,在大扰动下可能无法有效调节系统频率。为充分利用风电机组的调频潜力,提出了一种超速减载控制与直流协同调频的策略。算例分析表明,该策略不仅能够充分挖掘风电机组的调频潜力,还能有效减少送端电网在非正常状态下的频率偏差,提升系统稳定性。

**[关键词]** 一次调频; 功率备用; 超速减载控制; 直流频率限制控制器; 协同控制

## 引言

大力发展新能源是实现我国“碳达峰、碳中和”能源战略的必由之路<sup>[1]</sup>。根据国家能源局推测,预计到2060年,我国新能源装机占比将超过70%,发电量超过50%,成为电力供应主体<sup>[2]</sup>。但是,风电具有随机性和间歇性,随着风电渗透率不断提高,送端电网低惯量、弱调频能力的问题会进一步凸显,电力系统频率稳定问题日益严峻<sup>[3]</sup>。高频切机虽然可以有效解决送端电网的高频问题,但切机代价高昂且切机准确度难以掌握,一旦过切,可能会导致系统低频失稳,对送端电网的稳定性带来新的威胁<sup>[4-5]</sup>。

目前风电机组参与系统调频策略主要分为利用转子动能调频以及功率备用调频。转子动能调频虽然可以通过逐步吸收风电机组转子动能从而对系统进行高频抑制,经济性较好,但是无法长时间吸收转子动能,只适用于短期调频<sup>[6]</sup>。功率备用调频主要是通过预留部分有功备用为系统提供持续功率支持<sup>[7]</sup>。目前,主要通过超速减载控制与变桨控制来实现<sup>[8]</sup>。

为了解决风电机组大规模并网后电力系统调频能力不足的问题,本文提出了一种超速减载和直流协同的送端电网频率控制策略,更有助于系统频率稳定。分析了风电机组超速减载与直流频率限制控制器的调频原理,建立了风电机组与直流频率限制控制器协同参与送端电网调频的频率响应模型,并基于模型的时域频率响应表达式对超速减载控制及直流频率限制控制器相关参数进行整定。通过Matlab/Simulink平台搭建系统仿真模型,验证了所提控制策略的有效性和合理性。

## 1 计及风电机组与直流参与调频的送端电网频率响应模型

### 1.1 风电机组超速减载控制下的调频特性分析

风电机组捕获的最大机械功率可表示为:

$$\begin{cases} P_{mW} = P_{opt} = \frac{1}{2} \rho C_p (\lambda_{opt}, \beta) A U_w^3 \\ \lambda = R \frac{\omega_r}{U_w} \\ C_p (\lambda_{opt}, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{116}{\lambda_{opt} + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $A$  为风轮扫风面积;  $U_w$  为风速;  $C_p(\lambda_{opt}, \beta)$  为风能利用系数,  $\lambda_{opt}$  为风电机组的叶尖速比;  $\beta$  为风电机组的桨距角;  $\lambda_i$  为中间变量;  $R$  为风电机组叶片半径;  $\omega_r$  为风电机组转子转速。

由上式可得,风电机组最大运行功率跟踪曲线方程为:

$$P_{opt} = k_{opt} \omega_r^3 \quad (2)$$

式中:

$$k_{opt} = \frac{0.5 \rho C_p \pi R^5}{\lambda_{opt}^3} \quad (3)$$

风电机组减载功率跟踪曲线方程为:

$$P_{de0} = (1-d) P_{opt} = k_{de0} \omega_r^3 \quad (4)$$

式中:  $d$  为风电机组减载率。

风电机组有功功率备用功率为:

$$P_{sc} = P_{opt} - P_{de0} = d P_{opt} \quad (5)$$

### 1.2 直流频率限制控制器控制原理

当系统一次调频无法满足系统连续运行要求时,直流频率限制控制器开始参与调频。直流频率限制控制器通过增发有功功率减小扰动后系统功率不平衡量。输入量为系统频率,输出量为有功功率,直流线路长时间运行在过负荷状态不利于系统安全稳定运行,所以加入限幅环节,具体模型如下图所示:

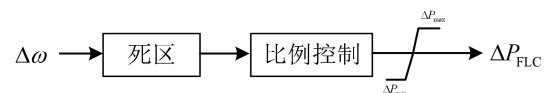


图1 直流频率限制控制器模型

Figure 1 DC Frequency Limiting Controller Model

当系统频率偏差超过直流频率限制器死区时,以高频为例,直流功率调制量为:

$$\Delta P_{FLC} = K_F \Delta \omega \quad (6)$$

式中:  $K_F$  为直流频率限制器控制参数,  $\Delta \omega$  为系统频率变化量。

### 1.3 超速与直流参与调频的频率响应综合模型

当系统负荷突减时,系统中的常规机组和风电机组检测

到系统异常后共同参与一次调频, 此时, 对系统建立如下转子运动方程:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_G + \Delta P_e - \Delta P_d \quad (7)$$

对于常规机组来说, 其功率变化量如下式所示:

$$\Delta P_G = -T_G \frac{d\Delta P_G}{dt} - K_G \Delta\omega \quad (8)$$

式中:  $T_G$  为调速器动作时间常数,  $K_G$  为机组单位调节功率。

对于采用超速减载控制的风电机组来说, 其功率变化量与系统频率偏差以及频率变化率相关, 具体如下式所示:

$$\Delta P_e = -K_d \Delta\omega - K_p \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (9)$$

将风电机组一次调频环节与直流控制环节引入电力系统频率响应模型, 如下图所示。图中:  $H$  为传统机组惯性时间常数;  $K_m$  为机械功率增益系数;  $F_H$  为汽轮机再热常数;  $D$  为阻尼系数;  $R$  为调速器调差系数;  $T_R$  为汽轮机再热时间常数;  $\Delta P_d$  为由负荷变化引起的系统扰动功率变化量;  $\Delta\omega$  为系统角速度变化量, 在采用标么值计算时, 其与系统频率一致;  $\Delta P_e$  为风电机组电磁功率变化量;  $K_d$  为下垂控制系数;  $K_p$  为虚拟惯量系数。

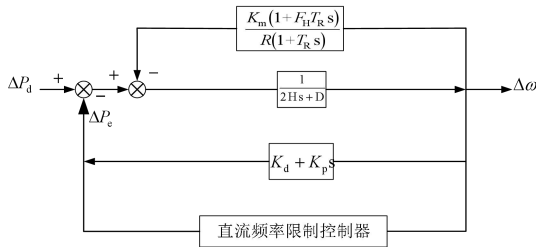


图2 含风电机组与直流频率限制控制器的系统频率响应模型

Figure 2 System Frequency Response Model with Fan and DC Frequency Limiting Controller

根据上图可得送端电网频率响应综合模型时域形式的频率响应表达式为:

$$\Delta\omega(t) = \frac{RP_{step} [1 + \alpha e^{-\ell\omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi)]}{DR + K_m + K_d R + RK_F R} \quad (10)$$

式中参数如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{1 - 2T_R \ell \omega_n + T_R^2 \omega_n^2}{1 - \ell^2}} \\ \ell &= \frac{2HR + RT_R D + K_m F_H T_R}{2(DR + K_m + RK_d + RK_F)} \omega_n + \frac{RK_d T_R + RK_p + RT_R K_F}{2(DR + K_m + RK_d + RK_F)} \omega_n \\ \omega_n^2 &= \frac{DR + K_m + RK_d + RK_F}{2HRT_R + RK_p T_R} \\ \omega_r &= \omega_n \sqrt{1 - \ell^2} \\ \phi &= \arctan \frac{\sqrt{1 - \ell^2}}{\ell - T_R \omega_n} \\ \phi_1 &= \arctan \left( \frac{\omega_r T_R}{1 - \ell \omega_n T_R} \right) \end{aligned} \right. \quad (11)$$

通过式 (10) 可以得到表征频率稳定性和动态响应的三个指标:

系统初始频率变化率为:

$$\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\alpha R \omega_n P_{step} \sin \phi_1}{DR + K_m + K_d R + RK_F} \quad (12)$$

对式 (10) 求导令导数为 0 可得系统到达频率偏差峰值的时间  $t_0$ :

$$t_0 = \frac{1}{\omega_r} \arctan \left( \frac{\omega_r T_R}{\ell \omega_n T_R - 1} \right) \quad (13)$$

进而求得系统频率偏差峰值  $\Delta\omega_{max}$ :

$$\Delta\omega_{max} = \frac{RP_{step} [1 + \alpha e^{-\ell\omega_n t_0} \sin(\omega_r t_0 + \phi)]}{DR + K_m + K_d R + RK_F} \quad (14)$$

稳态频率变化量:

$$\Delta\omega_{ss} = \frac{RP_{step}}{DR + K_m + K_d R + RK_F} \quad (15)$$

## 2 送端电网优化参数整定

### 2.1 超速风电机组参数优化整定

#### 2.1.1 风电机组下垂控制系数整定方法

风电机组下垂控制系数是功率变化量和频率变化量的比值, 所以, 下垂控制系数可以写成以下形式:

$$K_d = \frac{P_{st} - P_{dc0}}{\Delta\omega_{ss}} \quad (16)$$

考虑系统惯性响应环节的控制目标是提升电网频率稳定性, 因此可以将系统频率最大偏差尽可能降低作为目标函数:

$$f_1 = \min \Delta f_{max} \quad (17)$$

考虑系统一次调频的控制目标是充分利用减载功率令风电机组稳态运行点尽可能接近 MPPT 点, 因此可以将系统 MPPT 点功率和稳态运行点功率差值最小作为目标函数:

$$f_2 = \min \{P_{opt} - P_{st}\} \quad (18)$$

综合考虑系统一次调频阶段的控制目标, 设计一个优化函数  $F_1$ , 因为频率偏差峰值最小和风电机组稳态运行点尽可能接近 MPPT 点相近相矛盾, 所以添加权重系数根据不同工况选取不同比重, 其表达式为:

$$F_1 = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (19)$$

为了避免风电机组转速过高导致的失稳, 风电机组转速应满足以下约束:

$$\omega_{dc0} < \omega_{st} < 1.3 p.u. \quad (20)$$

#### 2.1.2 风电机组虚拟惯量系数整定方法

在系统扰动初期, 风电机组快速吸收转子动能来减缓频率突增速度, 进而降低系统初始频率变化率来为后续调频争取时间, 可以将最小化初始频率变化率作为目标函数对风电机组虚拟惯量系数进行整定:

$$F_2 = \min \left( \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{t=0} \right) \quad (21)$$

为了避免转子动能增加的速度过快, 调节功率过大, 风电机组应满足以下约束条件:

$$P_{ref, min} \leq \min \left( \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{t=0} \right) K_p + P_{re0} \leq P_{ref, max} \quad (22)$$

式中:  $P_{ref, min}$  和  $P_{ref, max}$  分别为风电机组变流器功率上限和下限。

## 2.2 直流频率限制器控制环节参数优化整定

直流频率限制器控制原理与同步机一次调频原理类似,通过比例控制来减小送端电网不平衡功率,从而抑制送端电网的频率偏差。

直流频率限制器参与调频应保证对送端电网频率变化的有效抑制,所以以系统频率偏差尽可能低作为优化目标函数:

$$f_3 = \min(\Delta\omega) \quad (23)$$

为提高送端电网的稳定性,应尽量降低直流频率限制器的功率调节量以减少对电网频率的冲击,所以考虑直流频率限制器调制功率在满足系统调频要求的情况下尽可能小作为目标函数:

$$f_4 = \min(\Delta P_{\text{FLC}}) \quad (24)$$

综合考虑上述优化目标,建立一个优化函数 $F_3$ ,由于稳态频率尽可能小与直流功率调制量尽可能小相矛盾,所以添加权重系数根据不同工况选取不同比重,其表达式为:

$$F_3 = \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 \quad (25)$$

由于直流频率限制器在下垂控制环节的作用下增大直流功率调制值,若直流功率过大会导致直流线路运行于过负荷状态,所以一般取附加功率调制值为1.2倍的直流额定功率,即约束条件为:

$$0 < P_{\text{FLC}} < 1.2 P_{\text{den}} \quad (26)$$

式中:  $P_{\text{FLC}}$  为直流频率限制器输出功率,  $P_{\text{den}}$  为直流额定功率。

## 3 算例分析

为了验证本文所提参数整定方法的有效性,取功率基准值为60MVA,风电机组转子转速基准值为1500r/min,风轮半径 $R=35\text{m}$ ,最优叶尖速比 $\lambda_{\text{opt}}=6.325$ ,最优风能利用系数 $C_{\text{opt}}=0.438$ ,传统机组各参数见文献[9]。采用Simulink搭建图2所示模型,验证并分析本文所提调频控制策略在不同工况下的优化结果。

### 3.1 算例1: 风电场风速偏高时的工况

系统在初始时刻扰动功率标幺值为-0.167,风速为8.5 m/s,风电场单机等值模型下的最优下垂控制系数为0.313,虚拟惯量系数为0.462,稳态转速为1.271,此时频率偏差峰值为50.607Hz,风电机组一次调频可以满足系统要求,直流无需参与调频。系统频率响应曲线如下图所示:

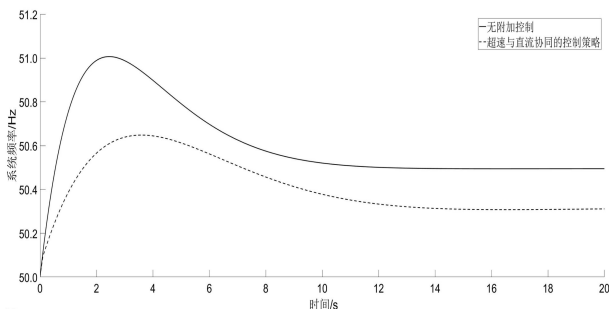


图3 风速偏高时的系统动态频率对比图

Figure 3 Comparison of system dynamic frequencies at high wind speeds

3.2 算例2: 风电场风速偏高且扰动功率较大的极端情况  
设系统在初始时刻的扰动功率标幺值为-0.334,风速为

8.5 m/s 风电机组满足约束条件的最优下垂控制系数为0.099,虚拟惯量系数为0.538,直流不参与调频时系风机无法满足系统调频要求。直流开始参与调频,直流频率限制器控制参数为1.14,系统频率偏差峰值为50.563Hz且稳态频率为50.214Hz,系统频率响应曲线如下图所示:

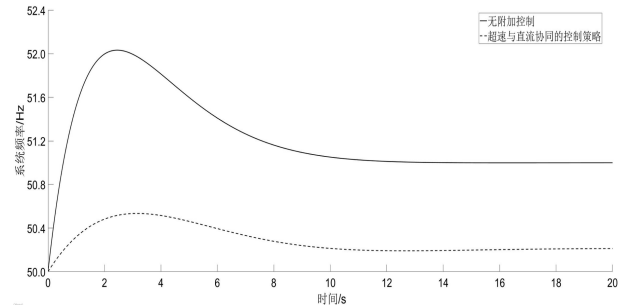


图4 风速偏高且扰动较大时的系统动态频率对比图

Figure 4 Comparison of System Dynamic Frequencies under High Wind Speed and Large Disturbance

## 4 结论

本文采用超速与直流相协同的方式来解决风电机组接入后的送端电网频率稳定问题。可以尽量避免送端电网直接切机造成的浪费。此外,对虚拟惯量系数、下垂控制系数以及直流频率限制器控制参数的整定方法既可以有效挖掘风电机组的调频潜力,也可以在尽量减小所使用调频资源的前提下保证送端电网的频率稳定。

## 【参考文献】

- [1] 方元庆, 陈晶. 碳达峰碳中和背景下我国新能源技术发展及意义[J]. 材料导报, 2024, 38 (S1): 35-40.
- [2] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (05): 1663-1672.
- [3] 游广增, 李华瑞, 李常刚, 等. 计及风电高频保护的送端电网多直流协同频率控制[J]. 中国电力, 2021, 54 (05): 83-90+110.
- [4] 谢宇峥, 张恒旭, 李常刚, 等. 考虑风电机组频率保护的送端电网有序高频切机策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (09): 153-161.
- [5] 周智行, 石立宝, 陈义宣. 异步联网下云南电网高频切机优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (20): 86-93.
- [6] 李想, 刘克天, 李军, 等. 基于风电机组转子动能的风电场一次调频功率分配优化[J]. 动力工程学报, 2023, 43 (09): 1238-1246.
- [7] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (11): 81-92.
- [8] 奥博宇, 王方政, 陈磊, 等. 风电机组变桨减载一次调频模型及聚合方法[J]. 电网技术, 2023, 47 (04): 1360-1369.
- [9] Anderson P M, Mirheydar M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 5 (3): 720-729.

作者简介: 顾天一 (2000-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统频率稳定与控制。