

风电场参与电网调频的多机协同控制策略

张小莲, 孙啊传, 郝思鹏, 许乐妍, 武启川

(南京工程学院电力工程学院, 江苏省 南京市 211167)

Multi-Machine Cooperative Control Strategy of Wind Farm Participating in Power Grid Frequency Modulation

ZHANG Xiaolian, SUN Achuan, HAO Sipeng, XU Leyan, WU Qichuan

(School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu Province, China)

摘要:【目的】考虑风电场中不同风况下风电机组参与一次调频能力的差异,在下垂控制和惯量控制策略的基础上,对机组的调频能力评估方法进行优化。【方法】提出了一种改进的多机组调频参考功率协同控制策略。【结果】引入多机组协同控制方法能够有效改善机组之间调频参考功率的分配,从而有效调节各机组参与系统一次调频的程度。在惯量控制和下垂控制的基础上引入改进的协同控制策略,依据机组在实际风况下运行的状态,评估机组能够有效参与一次调频的参考功率。引入调频能力系数能够实现调频功率参考值在各机组之间按能分配。【结论】协同控制策略能够有效保护风电机组转速,同时能够有效改善电网频率响应。

关键词: 风电场; 一次调频; 协同控制; 综合控制; 转速保护

ABSTRACT: [Objectives] Considering the difference of primary frequency regulation ability of wind turbines under different wind conditions in wind farms, the evaluation method of frequency regulation capability of wind turbines was optimized on the basis of sag control and inertia control strategy. [Methods] An improved multi-unit frequency modulation reference power cooperative control strategy was proposed. [Results] The introduction of multi-unit cooperative control method can effectively improve the distribution of frequency modulation reference power among units, thus effectively adjust the degree of each unit participating in the primary frequency regulation of the system. An improved cooperative control strategy was introduced on the basis of inertia control and sag control. According to the operation state of the unit under the actual

wind condition, the reference power of the unit which can effectively participate in the primary frequency modulation was evaluated. The introduction of frequency modulation capability coefficient can realize the energy distribution of the reference value of frequency modulation power among units. [Conclusions] The cooperative control strategy can effectively protect the speed of wind turbine and improve the frequency response of power grid.

KEY WORDS: wind farm; primary frequency modulation; cooperative control; integrated control; speed protection

0 引言

随着风电并网容量的持续上升,电网频率安全问题日益突出^[1-3]。直驱式永磁同步发电机(direct drive permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)通过换流器向电网输送功率,风电机组与电网频率解耦,无法响应电网频率变化^[4]。为了保障电网的频率安全,风电机组应承担部分调频功率^[5]。

目前,风电机组协同参与电网一次调频的方法主要是利用机组转子可释放动能差异,设计调频功率协同分配系数,表征机组调频能力差异,将调频功率协同分配系数与传统风电一次调频措施相结合,达到风电机组一次调频参考功率协同分配的目的。风电一次调频措施主要有下垂控制^[6-8]、虚拟惯量控制^[9-13]、变桨控制和超速减载控制。下垂控制和惯量控制结合的控制策略为综合性控制策略^[14-16]。

在风电机组协同控制方面,文献[17]提出了一种基于转速和功率限制进行调频参考功率协同

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107098)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107098)

分配的方法。对于风电机组调频功率评估,该方法将机组的机械功率与最优运行功率的差值作为衡量机组调频能力的指标。文献[18]提出了一种考虑风速差异的协同控制策略,该方法满足机组备用容量的同时,充分利用转子动能的差异协调风电场的调频资源。文献[19]提出了利用调频能力系数和传统调频策略相结合的功率分配方法。该方法的风电机组调频能力评估是考查机组的动能和变流器容量,虽然调频能力评估能够量化给出各台机组可参与调频的能力大小,但该评估方法忽略了风电机组留有一定备用功率运行^[20]情况下的实际输出功率限制,导致评估指标设计不能准确反映风电机组的调频能力,系统频率响应改善不明显。文献[21]提出的风电场协同控制策略,通过评估转子动能和全功率风电变流器的可调容量,设计调频动能因子和变流器容量限制因子,以体现风电场的调频能力差异,但是与文献[19]存在同样的问题,即忽略了留有一定备用容量运行的风电机组可调容量对调频贡献的影响。

在风电机组转速保护方面,文献[17]以风电机组采用下垂控制策略过度响应调频的机理为基础,分析得出频率二次跌落的原因是风电机组的功率调节量过大。文献[18]未提及其协同控制策略对机组的转速保护作用。文献[19]和[21]在频率控制环节采用单独的转速保护模块。文献[22]利用变下垂系数的方式调整机组参与调频程度,避免了机组退出调频而导致频率的二次跌落。文献[23]提出了主动转速保护策略,通过风电机组的容量和实际运行工况调整频率综合控制方式的下垂系数和虚拟惯量系数,风电机组在转速不断下降的过程中逐渐退出系统调频,使风电机组在释放动能的过程中保持自身稳定性。文献[24-26]在机组转速保护方面都是加转速保护控制模块。以上涉及转速保护的方法,都是单独采用转速保护控制策略,导致系统控制环节更复杂。

针对上述问题,本文对风电机组调频能力评估方法做进一步优化,改进风电机组的调频能力系数。考虑风电机组留有一定备用功率运行后调频能力进一步加强,可调整的机组最大输出功率为额定运行点与最大减载运行点的功率差额,据

此改进调频能力系数。改进后的协同控制策略能够更准确表征风电机组参与一次调频的能力,可以实现调频功率参考值在各台机组之间按调频能力大小合理分配,同时能够避免因风电机组触发转速保护而导致频率二次跌落,改善了电网频率响应。最后,通过仿真验证了本文所提改进方法的有效性和优越性。

1 风电参与一次调频的数学模型

1.1 风电机组模型

风电机组参与一次调频的风力发电系统模型框图^[27]如图1所示。

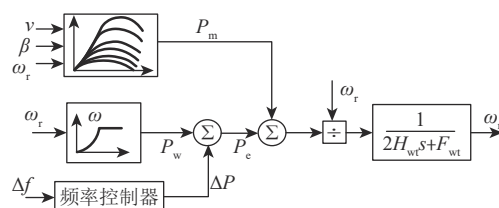


图1 风电参与一次调频模型

Fig. 1 Model of wind power participating in primary frequency modulation

1.2 风电机组参与电网调频运行原理及数学模型

由贝兹理论^[28]可知,风电机组参与系统调频过程中,风速的变化会导致机组的机械功率产生变化,在负荷突变时也会造成电磁功率的变化,机械功率与电磁功率的不平衡将产生电网频率的波动。

风电机组参与系统一次调频数学模型为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 为风电机组的风能捕获功率; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; v 为风速; β 为桨距角; λ 为叶尖速比, 其定义为 $\lambda = \omega R/v$; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; λ_i 为中间参数; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 为参数。

电网模型用于估计电网在功率不平衡扰动下的频率变化,如图2所示,低阶的系统频率响应

数学模型为

$$\Delta f = \frac{1}{2H_w s + F} (P_M + P_e - P_D) \quad (2)$$

式中： Δf 为频率跌落值； H_w 为传动系统惯性因数； F 为传动系统的摩擦系数； P_e 为风电机组输出功率； P_M 为传统同步发电机组输出功率； P_D 为负荷功率。

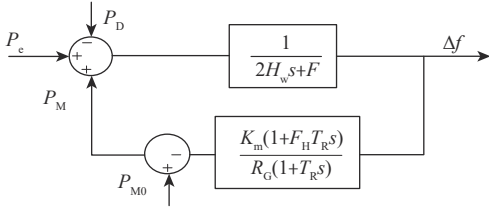


图2 电网一阶频率响应模型

Fig. 2 First order frequency response model of power grid

以频率的波动量 Δf 为基础设计的下垂控制和虚拟惯量控制策略输出的功率参考值将作为调频参考功率对机组的出力进行修正，从而达到降低频率波动的目的。

1.3 调频控制策略

传统调频控制策略包括下垂控制和惯量控制。下垂控制是一种按照电网频率偏离稳定值的比例自动调节输出功率的控制方法，通常由带有调速系统的传统同步发电机提供。类似于传统同步机组的一次调频，风电机组的下垂控制在惯性控制响应后对电网频率的稳定起着非常重要的作用。

1.3.1 下垂控制

为了模拟传统同步机组的一次调频调速器响应，风电机组中的下垂控制将电网频率的变化与有功功率输出参考值的变化联系起来，即通过在频率事件中增加或减少功率输出来响应电网频率的较大偏差。

有功功率参考值变化与频率偏差的关系可以表示为

$$\Delta P_{df} = K_{df} (f - f_0) \quad (3)$$

式中： f_0 为基准频率； f 为电网频率； K_{df} 为风电机组的单位调节功率。

风电机组的下垂系数 r 整定为

$$r = \frac{\Delta f}{\Delta P_{df}} = \frac{1}{K_{df}} \quad (4)$$

当电网频率下降时，通过下垂控制增加风电机组输出功率；当电网频率上升时，通过下垂控制减少其输出功率。 K_{df} 越大，风电机组输出功率变化越大，电网稳态频率偏差越小，对电网的稳定性影响越小，但对风电机组的稳定性影响也越大。

下垂控制与传统同步机调速器的控制非常相似，使风电机组基于电网频率提供额外的有功功率。当电网频率波动时，下垂控制以电网频率偏差作为输入信号，乘以单位调节功率 K_{df} ，得到的附加参考功率与最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制的有功功率指令叠加，调整风电机组的参考功率。

1.3.2 惯量控制

为了模拟同步机惯性响应，通过对风电机组转子侧变流器的有功功率控制，将风力发电机风轮以及转子的旋转动能转化为电能送入电网，从而抑制电网的频率变化率。

风电机组的转速从 ω_{r0} 变至 ω_{r1} ，释放的旋转动能 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_{r0}^2 - \omega_{r1}^2) \quad (5)$$

式中 J 为风电机组的转动惯量。

永磁同步发电机转速变化范围为0.5~1.2 pu^[29]，因此，在转速变化过程中，风电机组能够为电网提供短时但强劲功率支撑，为电网的频率稳定做出贡献。风电机组释放动能时额外的功率输出可以表示为

$$P = \frac{dE}{dt} = J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6)$$

惯性控制通过构造电网频率的变化率与附加参考功率 P 的正比例关系，使得风电机组在频率变化较大时能够大幅地调节输出功率，进而抑制电网频率变化率，对电网表现出一定的惯性特性，其公式为

$$\Delta P = K_{pf} \frac{df}{dt} \quad (7)$$

式中 K_{pf} 是比例系数。故惯性控制的有功功率参考值 P_{ref} 为

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P \quad (8)$$

式中 P_{MPPT} 为最优点控制运行下机组的输出功

率^[30]。电网频率信号通过微分得到电网频率变化率信号,通过低通滤波器将频率变化率中高频成分滤去,与 K_{pf} 相乘得到附加参考功率,最终将附加参考功率加到原有的有功功率参考值上,进而得到惯性控制有功功率的参考值。

2 风电场风电机组调频能力评估

单台风电机组的调频策略能够响应系统频率变化,输出与频率波动对应的调频参考功率。对于风电场多台机组并网运行的情况,满足调频要求的机组将同时向系统输送补偿功率,各风电机组将依据其自身的调频策略承担场内均匀分配的调频功率,各风电机组调频策略之间缺乏配合,无法合理利用各台机组的能量。

多台机组协同控制策略的难点在于:依靠机组的转子动能和备用容量,合理利用各台机组调频辅助功率。风电机组调频能力与其风况和运行状态有关,系统频率跌落或者上升过程中风电机组旋转动能具有一定限制,若调频辅助功率平均分配至各台机组,对于旋转动能无法达到单台风电机组调频辅助功率 $\Delta P_{vic}/n$ 的机组,转速的不断降低将触发机组转速保护动作,产生相应的调频功率缺额。对于旋转动能完全满足 $\Delta P_{vic}/n$,甚至具有更大动能的机组,无法充分利用其动能参与系统调频。

2.1 风电机组改进调频能力评估方法

风电机组的调频能力与其所处位置的风况、自身运行状态相关,直驱式永磁同步风电机组的调频能力与风电机组的转子旋转动能、变流器的可调容量有关。变流器的额定容量与风电机组的额定容量相匹配^[31],所以在考虑变流器的可调容量对风电机组的调频影响时,可以采用风电机组的可调容量进行分析,并与变流器的可调容量取交集作为风电机组的调频能力指标。

由于各机组工况不同,所以机组的转速各不相同,导致机组转子储存的能量存在差异,各种工况下运行的机组在调频过程中能够向系统释放不同的转子能量。这也表明考虑各台机组实际能够参与调频的转子动能,改进调频控制策略,调

频功率参考值能够在各台机组之间重新分配。

同时,当风电机组在超速减载情况下运行时,参与调频的机组备用功率能够被有效利用的程度(额定值与运行点之间的差额为备用功率,运行点与最优点之间的差额为MPPT运行时能够有效利用的部分)也不相同。如果考虑各台风电机组的备用功率参与调频的多寡,那么调频控制策略计算出的调频参考功率也将在各台机组之间重新分配。

传统协同控制策略在一次调频控制方式的基础上引入调频能力系数,由于各台风电机组在留有一定备用功率运行时,风电机组运行点将运行至功-频曲线上最优点左侧,调频能力系数的引入将导致调频功率缩减,大大影响了调频效果。因此,本文提出一种新的调频能力评估方法,具体如下:

在进行风电机组调频能力评估时,考虑到机组在超速减载情况下运行,永磁同步发电机转速变化范围为0.5~1.2 pu,故将转速达到1.2 pu时机组的功率响应设为极限值参考量,功率在超速减载运行下的最大波动为机组功率额定值与极限值的差额。因此,可以定义容量因子 $K_{p,i}$ 来反映风电机组调频潜力的大小,具体为

$$K_{p,i} = \frac{P_{mn,i} - P_{m,i}}{P_{mn,i} - P_{ml,i}} \quad (9)$$

式中 $P_{mn,i}$ 、 $P_{m,i}$ 、 $P_{ml,i}$ 分别为风电场中第*i*台机组在额定转速、当前转速和1.2倍额定转速下的功率响应。

由于不同机组的实际运行状态各不相同,转子旋转动能也不一样,因此也可以定义转子动能因子来反映风电机组调频能力的大小,具体为

$$K_{\omega,i} = \frac{E_{\omega,i} - E_{\omega l,i}}{E_{\omega n,i} - E_{\omega l,i}} \quad (10)$$

式中 $E_{\omega,i}$ 、 $E_{\omega n,i}$ 、 $E_{\omega l,i}$ 分别表示为风电场中第*i*台机组在当前转速、额定转速和1.2倍额定转速下的转子动能。

风电场中第*i*台风电机组调频能力系数 $K_{a,i}$ 的整定算法为

$$K_{a,i} = \frac{K_{p,i} \times K_{\omega,i}}{[K_{p,i} \times K_{\omega,i}]_{\max}}, \omega_r \in (\omega_{\min}, \omega_{\max}) \quad (11)$$

式中： ω_r 为风电机组的转速； $\omega_{\min}$ 和 $\omega_{\max}$ 分别为风电机组的转速下限和上限，永磁同步风电机组取 $\omega_{\min}=0.5$ pu, $\omega_{\max}=1.2$ pu。

由式(9)、(10)可见，当风电场中某台机组留有备用容量越多，相应的转子旋转动能越大，该机组对风电场调频能力贡献越大。

2.2 风电机组协同控制转速保护机理

考虑机组之间协同参与系统调频，该策略对机组的转速有很好的保护作用。如图3所示，改进策略后，机组的调频功率能够在各台机组之间按能分配，对于低风速运行的机组，调频控制策略计算出的调频补偿功率参考值相对降低，机组运行轨迹为A-B-C，C点为风电机组参与一次调频后的稳定运行点；当调频补偿功率参考值过大时，风电机组的运行轨迹是A-E-F-G-A。协同控制参与调频的机组可以因避免风电机组过度参与调频而导致转速达到极限值的风险。

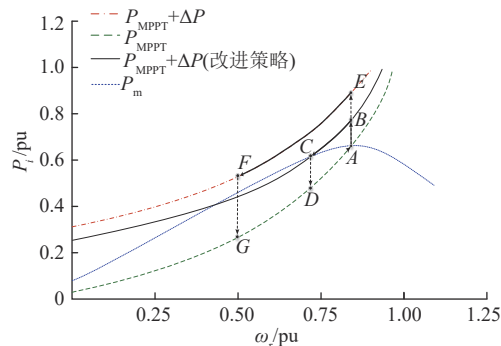


图3 改进策略对风电机组转速的保护机理

Fig. 3 Protection mechanism of improved strategy for wind turbine speed

3 风电场多机组改进协同控制策略

多台风电机组参与调频时，控制策略采用下垂控制和传统惯量控制能够改变调频功率参考值，无法达到调频功率在各台机组之间协同分配的目的。

采用传统惯量控制和下垂控制策略时，风电机组的辅助调频功率为

$$P_{VIC} = K_{pf}\Delta f + K_{df}p\Delta f \tag{12}$$

式中 p 为微分算子。

此时，考虑到调频功率在各台风电机组之间合理分配，为了让调频系数能够反映各台风电机

组的实际运行状况，将机组的实时转速引入调频系数中。考虑到调频系数会导致频率响应变差，将留有备用功率运行的机组功率响应最低值调整至1.2倍额定转速下所对应的功率响应。该方法不仅能够让调频功率在各台机组之间按能分配，而且可以改善频率响应。

在综合控制策略基础上引入调频能力系数时，各台风电机组的调频辅助功率为

$$P_{VIC_i} = K_{a_i}(K_{pf}\Delta f + K_{df}P\Delta f) \tag{13}$$

式中 K_{a_i} 表示风电场中第*i*台机组的调频系数。基于式(11)、(13)可得到多台机组协同控制的实现方法，如图4所示。

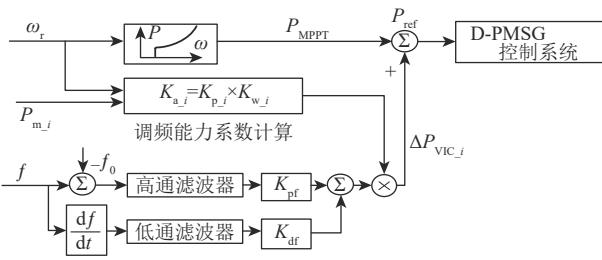


图4 多台风电机组协同控制框图

Fig. 4 Multi-wind turbine collaborative control block diagram

4 仿真分析

4.1 仿真参数

为验证所提多机协同控制方法的有效性，本文参考文献[29,32-33]基于 Matlab/Simulink 软件建立风电并网仿真模型。仿真包含4台传统同步发电机和4台风电机组，同步发电机组及其调速器、励磁器的原理结构参见文献[29]。风力机模型参数^[32-33]见表1。

案例1：在湍流风速下，风电场中的各个机

表1 风电机组模型参数

Tab. 1 Wind turbine model parameters

系统参数	数值
叶轮半径/m	20
切入(额定)风速/(m/s)	3(12)
叶轮额定转速/(rad/s)	3.457
转动惯量/(kg·m ²)	5.492×10 ⁵
最佳叶尖速比	5.8
最大风能利用系数	0.460 3
额定功率/MW	0.6

组(G1—G4)运行在不同的风况下,如图5所示,其平均风速分别为7.1、7.2、7.3、7.4 m/s,并且湍流强度设置为0.16。

案例2: 考虑到恒定风速下的运行情况,各台风电机组(G1—G4)分别处于不同的恒定风速条

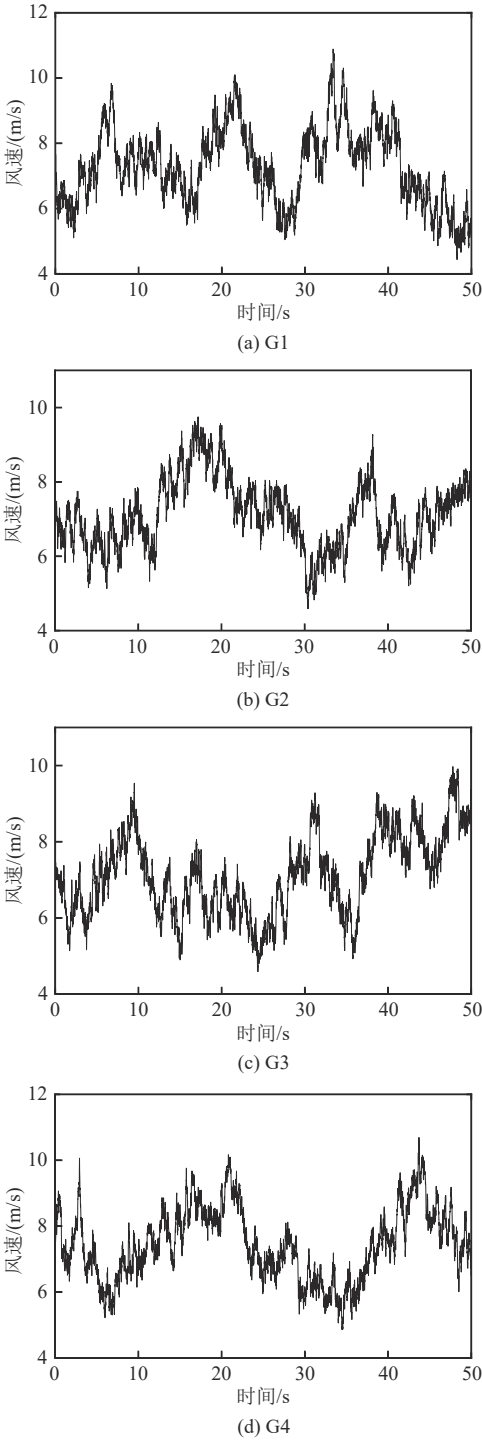


图5 风电场各机组运行湍流风速
Fig. 5 Turbulent wind speed of wind farm operations for each unit

件下,具体为9.0、8.0、7.0、6.0 m/s。在此基础上,系统的负荷在50 s时发生了10%的波动。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 改进策略前后调频能力系数

改进协同控制策略与传统调频控制策略的调频能力系数对比如图6所示。

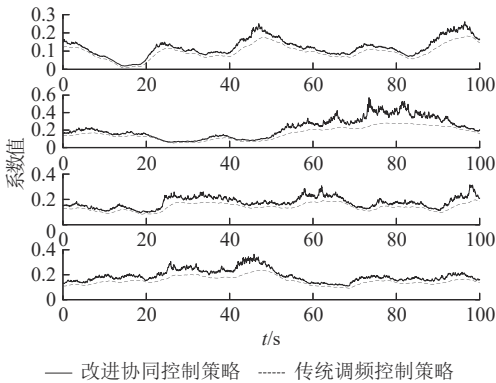


图6 改进前后调频能力系数
Fig. 6 Frequency modulation capability coefficient before and after improvement

在湍流风速下,本文提出的调频能力系数具有实时响应的特性,能够根据实际运行情况的改变而实时调整。与传统策略相比,这种实时调整能够更准确地反映风电机组的实际调频能力。

4.2.2 系统频率改善

为了验证本文所提改进的协同控制策略的优越性,将所提策略与传统调频控制策略进行对比研究。图7为恒定风速运行的4台机组参与一次调频,调频能力系数改进前后频率响应结果。图8为湍流风速下运行的4台风电机组参与一次调频,调频能力系数改进前后频率响应。表2为恒定风速下不同控制方式的频率响应改善对比,可见优

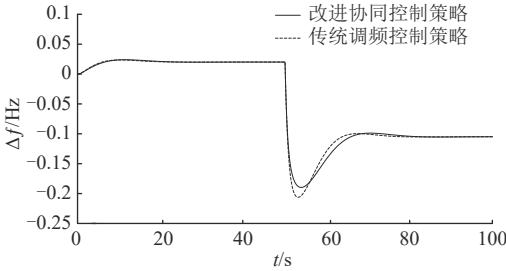


图7 恒风速改进前后频率响应
Fig. 7 Frequency response before and after constant wind speed improvement

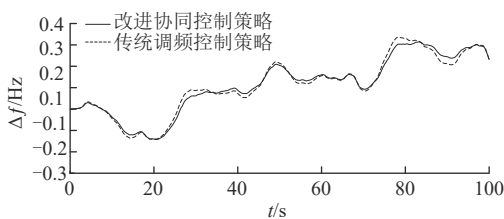


图8 湍流风速改进前后频率响应

Fig. 8 Frequency response before and after turbulent wind speed improvement

表2 恒定风速下不同控制方式的频率响应改善对比

Tab. 2 Comparison of frequency response improvement of different control methods under the constant wind speed

控制策略	$f_{\min}$	Δf
改进协同控制策略	49.811	0.189
传统调频控制策略	49.794	0.206

注： $f_{\min}$ 为系统频率最低值。

化后的协同控制策略频率响应有所改善，验证了所提策略的优越性。

4.2.3 改进策略对机组的保护作用

引入改进的协同控制策略，验证了该策略相对于传统策略对机组的保护作用。在不同的风速情况下，负荷波动10%，对本文所提改进策略下的转速波动值进行测定，同时与传统策略进行对比研究，对比数据见表3。

表3 负荷波动10%情况下转速最大变化量

Tab. 3 Maximum change in speed under the load fluctuation of 10%

风速/ (m/s)	转速初值/pu		转速最低值/pu		转速变化量/pu	
	改进策略	传统策略	改进策略	传统策略	改进策略	传统策略
9	2.621	2.621	2.609	2.603	0.125 0	0.018 5
8	2.330	2.330	2.320	2.308	0.010 0	0.022 2
7	2.039	2.039	2.033	2.011	0.005 8	0.027 5
6	1.747	1.747	1.746	1.713	0.001 0	0.034 3

通过研究分析，风速从9 m/s变换至6 m/s，传统调频控制策略导致转速变动量从0.018 5变换至0.034 3，随着风电机组的转子动能减少，风电机组的转速下降趋势逐渐放大，最终将导致机组触发转速保护；改进协同控制策略后，风电机组的转速变动量从0.125变换至0.001，机组依据转子自身调频能力调整调频参考功率，不会触发机组转速保护，避免频率的二次跌落。

在负荷突增或者突减导致频率波动时，采用传统调频策略参与调频的机组，在低风速与高风速运行的机组转子释放动能没有进行限定，甚至出现低转速机组释放的动能大于高转速机组所释放的动能，容易导致低转速机组因失速而退出运行。本文所提改进策略能够依据转子动能大小进行动能释放，低转速机组释放更少的动能参与调频，高转速机组释放更多的动能参与调频，能够进一步改善电网频率响应。

4.2.4 风电机组输出功率分析

风电机组输出功率的仿真情况与理论分析一致。恒定风速各台风电机组功率补偿量如图9所示。

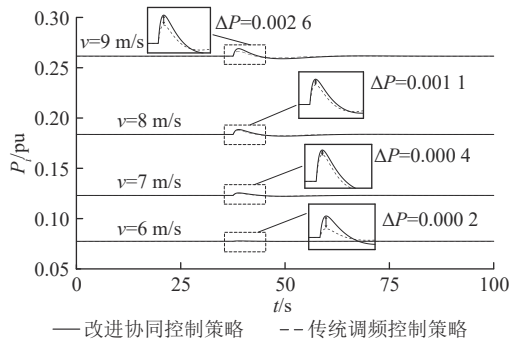


图9 恒定风速各台风电机组功率补偿量

Fig. 9 Power compensation of each wind turbine with the constant wind speed

在恒定风速且不考虑变桨控制的情况下，风电机组的调频补偿功率与风速呈正相关关系。具体而言，当风速增加时，风电机组的调频补偿功率也会相应增加。本文在风速为9 m/s的风况下进行了实验，相对于改进前的策略，改进后的策略使得调频补偿功率增加了 $\Delta P=0.002\ 6$ 。当风速减小至6 m/s时，相对于改进前的策略，改进后的策略使得调频补偿功率增加了 $\Delta P=0.000\ 2$ 。

改进后的策略具备根据机组运行情况调节调频补偿功率的能力，从而充分利用机组能量，实现按能力分配补偿功率的目标。

在湍流风速下，风电机组的输出功率会随着风速的变化而变化，而调频辅助功率能够根据机组的实际运行情况做出相应调整，从而验证了协同控制策略的有效性。

与传统的协同控制策略相比，改进后的协同

控制策略在风速变化时表现出更为明显的响应。这意味着在风速发生变化时,改进的策略能够更敏捷地调整风电机组的调频辅助功率,以适应系统的调节需求。这种明显的响应性使得改进的协同控制策略能够更有效地应对风电场的频率调节需求,提高系统的调频性能。湍流风速下的机组出力情况见图10。

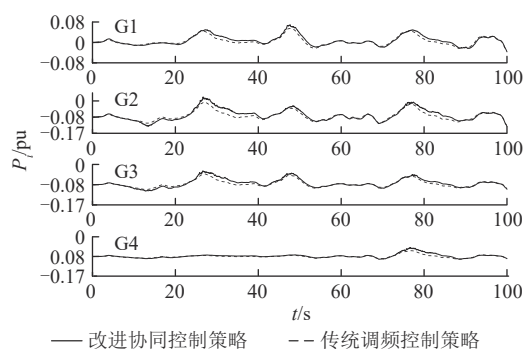


图10 湍流风速各台风电机组功率补偿量

Fig. 10 Power compensation of each typhoon generator set for turbulent wind speed

5 结论

在风电机组的惯量控制和下垂控制基础上,提出的协同控制策略旨在设计风电场中不同机组之间的调频行为。该策略综合考虑了风电机组的转子动能和可用容量在系统一次调频中的作用,通过合理调节各个机组在调频过程中的参与程度,以避免由风电机组转速保护动作引起的频率二次跌落,并有效改善系统的调频效果。通过理论研究和仿真分析得出以下结论:

1) 风电机组实际运行情况影响机组一次调频参与程度,风电参与一次调频应考虑转子实际动能储存量对机组调频能力的影响;同时应考虑机组容量对风电机组调频参与的限制。

2) 恒定风速和湍流风速下,机组的调频参考功率得到重新分配,相较于传统调频控制策略,所提改进策略对于风电机组之间的功率分配带来的调频效果更明显。

3) 协同控制策略可以保障调频过程中风电机组安全运行,避免机组转速下降导致的频率二次跌落,相较于传统调频控制策略,明显改善了转速保护特性以及系统频率响应。

参考文献

- [1] 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 Z Y, ZHANG N, DU E S, 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.
- [2] 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 X, CHEN Y L, YUE S, 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.
- [3] 左强, 李波, 杨世海. 大规模空调负荷参与新能源电力系统调频的无模型自适应控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 224-231.
ZUO Q, LI B, YANG S H. Model-free adaptive frequency control of renewable energy power systems with participation of large-scale air conditioner loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 224-231.
- [4] 王颖, 王晓文, 陆铭阳. 新能源高占比电力系统惯量相关问题研究[J]. 东北电力技术, 2023, 44(2): 20-27.
WANG Y, WANG X W, LU M Y. Research on inertia related problems of high proportion of new energy resources in power system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(2): 20-27.
- [5] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Analysis and mitigation of undesirable impacts of implementing frequency support controllers in wind power generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 174-186.
- [6] 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.
LIU H B, PENG X Y, ZHANG C, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [7] 李靖, 王志和, 倪浩. 基于改进下垂控制的直流微网运行研究[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 765-774.
LI J, WANG Z H, NI H. Research on DC microgrid

- operation based on improved droop control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 765-774.
- [8] 刘辉, 罗薇, 苏懿, 等. 计及ROCOF与转子动能的风电机组自适应下垂控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 161-169.
- LIU H, LUO W, SU Y, et al. Adaptive droop control strategy for wind turbines based on ROCOF and rotor kinetic energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 161-169.
- [9] 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 S L, WANG W S, ZHANG X, 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.
- [10] 张怡, 张秀强. 双馈型风电系统虚拟惯量协同控制策略的研究[J]. 机械设计与制造, 2023(8): 259-264.
- ZHANG Y, ZHANG X Q. Research on virtual inertia cooperative control strategy of doubly-fed wind power system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(8): 259-264.
- [11] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [12] 张祥宇, 沈文奇, 林毅, 等. 同步耦合双馈风机的虚拟惯量优化控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 126-133.
- ZHANG X Y, SHEN W Q, LIN Y, et al. Virtual inertia control optimization of synchronous coupled doubly-fed induction wind generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 126-133.
- [13] 林旭, 李军, 杨德健, 等. 基于功率轨迹预设的双馈风电机组虚拟惯量控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 47-53.
- LIN X, LI J, YANG D J, et al. Virtual inertia control strategy for doubly-fed induction generator based on preset power trajectory[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 47-53.
- [14] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
- ZHANG G F, YANG J Y, SUN F, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232.
- [15] 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.
- [16] MORREN J, PIERIK J, DE HAAN S W H. Inertial response of variable speed wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(11): 980-987.
- [17] 何廷一, 孙领, 王晨光, 等. 避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 12-20.
- HE T Y, SUN L, WANG C G, et al. A method of primary frequency regulation power distribution in a wind farm to avoid secondary frequency drop[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 12-20.
- [18] 张蕊, 李晓明, 高泽明, 等. 考虑风速差异的风电场调频备用协调控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 101-109.
- ZHANG R, LI X M, GAO Z M, et al. Coordinated control of frequency-regulation reserve capacity for wind farm considering wind speed difference[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 101-109.
- [19] 侍乔明, 王刚, 李海英, 等. 考虑调频能力的风电场虚拟惯量多机协同控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4005-4017.
- SHI Q M, WANG G, LI H Y, et al. Coordinated virtual inertia control strategy of multiple wind turbines in wind farms considering frequency regulation capability[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4005-4017.
- [20] 曾雪洋, 张纯, 王顺亮, 等. 基于减载系数变化的风电机组一次调频控制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 119-125.
- ZENG X Y, ZHANG C, WANG S L, et al. Primary frequency control of wind turbine based on deloading coefficient variation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 119-125.
- [21] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.
- CHEN Y H, WANG G, SHI Q M, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [22] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 126-131.
- PAN W X, QUAN R, WANG F. A variable droop control strategy for doubly-fed induction generators[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131.
- [23] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34.
- DING L, YIN S Y, WANG T X, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34.
- [24] 郑金鑫. 双馈风电机组的转速保护及协同调频研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- ZHENG J X. Rotor speed protection and coordinated control of DFIG wind turbines[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [25] 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 Y, GUO X Q, LU Z X, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 807-815.
- [26] 王学财. 双馈风电机组虚拟惯量调频特性研究及动态转速保护策略[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- WANG X C. Dynamic rotor speed protection for DFIG based wind turbines with virtual inertia control[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [27] LIN B, ZHANG X, BU J, et al. A variable coefficient overspeed load shedding control for frequency regulation based on feedforward control[C]// 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA). Singapore, IEEE, 2022: 122-130.
- [28] 蔡斌军, 何雍, 李朝旗. 基于Boost变换器的D-PMSG风力发电系统MPPT控制[J]. 微特电机, 2023, 51(3): 59-62.
- CAI B J, HE Y, LI C Q. D-PMSG wind power generation system MPPT control based on boost converter[J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(3): 59-62.
- [29] 李阳. 风电机组参与电网一次调频的控制策略设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- LI Y. Design and implementation of control strategy for wind turbine participating in primary frequency regulation of power grid[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [30] 张小莲. 风机最大功率点跟踪的湍流影响机理研究与性能优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- ZHANG X L. Study on turbulence influence Mechanism and performance optimization of fan maximum power point tracking[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [31] 陈杰, 龚春英, 陈家伟, 等. 一种新型的风力发电全功率变流器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 160-168.
- CHEN J, GONG C Y, CHEN J W, et al. A novel full-size power converter for wind energy conversion system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 160-168.
- [32] 周连俊, 殷明慧, 杨炯明, 等. 考虑变化湍流风速条件的风电机组改进自适应转矩控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 184-191.
- ZHOU L J, YIN M H, YANG J M, et al. Improved adaptive torque control for wind turbine considering varying turbulence conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 184-191.
- [33] 张正阳, 殷明慧, 李阳, 等. 考虑机组稳定约束的风机一次调频控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1471-1481.
- ZHANG Z Y, YIN M H, LI Y, et al. Turbine stability-constrained primary frequency control of wind turbine generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1471-1481.
-
- 收稿日期: 2023-06-07.
修回日期: 2023-08-30.
作者简介:
-
- 张小莲
- 张小莲(1985), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为风力发电技术、微电网控制技术, zhangxl530@163.com;
-
- 孙啊传
- 孙啊传(1996), 男, 硕士研究生, 从事风电集群控制研究, 2352880384@qq.com。
- (责任编辑 辛培裕)