

考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略

王同森,张峰,丁磊

(山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘要:风电机组凭借超速控制预留备用容量,可以同时实现惯性响应和一次调频2个控制目标。传统的控制策略往往对机组的备用容量利用不足,尚未发挥出超速风电机组的最大调频优势。为此,在深入研究超速风电机组频率控制的基础上,分别分析惯性响应和一次调频与稳态运行点的关系,提出了考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略。该控制策略通过调频能量模型求解出不同风速下的最优运行点,充分利用风电机组的备用容量参与频率调整,以实现频率跌落速度、深度和稳态偏差之间的优化协调。在DIGSILENT中搭建系统仿真模型进行验证,结果表明所提控制策略能够改善不同风速下系统动态频率响应特性,同时可保证风电机组自身运行的稳定性。

关键词:风电机组;超速控制;惯性响应;一次调频;控制策略;备用容量

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102036

0 引言

大型风电场一般采用变速风电机组,并通过电力电子设备并网,导致风电机组转子转速与系统频率解耦^[1-2]。随着风电渗透率的增加,同步发电机的并网容量进一步减少,系统的惯量响应和一次调频能力也随之下降。在大功率缺失或系统故障情况下,电力系统的频率变化率增大,频率最低点和稳态频率值下降,可能触发低频减载保护,不利于系统的安全稳定运行^[3-4]。因此,有针对性地开发风电机组的调频能力,使风电机组能够更好地为电力系统提供调频服务,是促进风电进一步发展的关键。

为使风电机组的有功出力能够实时响应系统频率的变化,通过附加的控制环节增强机组电磁功率与频率的耦合性。依据风电机组是否减载运行,调频策略主要分为转子动能控制和功率备用控制^[5]。其中,转子动能控制不需要风电机组预留有功备用,通过既定的控制策略逐步释放风电机组的旋转动能,为系统提供惯量支撑,经济性较好^[6-9]。但是该方法只能为系统提供短暂的频率支撑,且容易造成机组的过度响应,在风电机组转速恢复的过程中可能引发频率的二次跌落^[10]。

功率备用控制是通过超速或变桨控制使风电机组减载运行,预留一定的有功备用,从而具备持续提

供功率支持的能力^[11]。风电机组减载控制一方面分担了同步机组预留备用的压力,另一方面可通过调频获取收益,一定程度上弥补了减载运行带来的损失^[12]。文献[13-14]通过协调转速和桨距角控制最大化旋转动能储备,确保风电机组在各风速段下都能够预留充足的有功备用。文献[15-16]采用固定下垂系数的控制方法,功率浪涌无法响应风速的变化,风电机组的可控性较差。文献[17-18]提出了变下垂系数的控制方法,结合机组自身的运行状况确定控制参数,提升了风电机组的频率控制能力。由于上述控制策略依赖于测量的系统频率信息,其在调频初期的响应速度较慢,且机组的备用容量无法得到充分利用。文献[19]将机组调频后的运行点形成的曲线设为最大功率点跟踪(MPPT)曲线,提升了风电机组的一次调频能力,但MPPT是否为最优运行曲线,仍需进一步论证。在系统频率安全范围内,风电场应充分利用存储的备用容量完成频率调整。然而,目前超速风电机组控制侧重于预留备用的策略研究,较少考虑风电机组备用容量的优化利用问题。如何有效利用风电机组已预留的备用容量,以发挥超速风电机组最大的调频优势有待进一步研究。

针对上述问题,本文在深入分析惯性、一次调频和机组最优运行点关系的基础上,建立了风电机组调频能量优化的数学模型,提出了考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略。该策略通过检测风速变化及识别机组运行状态,动态调整机组的出力,使超速风电机组最大限度地参与频率调整,综合改善系统频率跌落速度、深度和稳态偏差。最后,在DIGSILENT中建立了系统仿真模型,验证了所提控制策略的有效性和合理性。

1 风电机组模型及超速控制

根据空气动力学原理,风电机组捕获的风能 P_m 为:

收稿日期:2020-06-10;修回日期:2020-12-30

基金项目:国家电网公司科技项目(含高比例可再生能源的电网频率协同控制技术研究);山东省自然科学基金青年基金资助项目(ZR2018QEE005);山东大学青年学者未来计划

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC (Cooperative Frequency Control of High Renewable Penetration Power System), the Natural Science Youth Foundation of Shandong Province(ZR2018QEE005) and the Future Plan for Young Scholars of Shandong University

$$P_m = 0.5\rho Av^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(116/\lambda_i - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \quad (2)$$

$$1/\lambda_i = 1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \quad (3)$$

$$\lambda = \omega_r R/v \quad (4)$$

其中, ρ 为空气密度; A 为风轮扫风面积; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, λ 为风电机组的叶尖速比, β 为风电机组的桨距角; λ_i 为 C_p 与 β 的中间变量; ω_r 为风电机组的转速; R 为风电机组的叶片半径。

风电机组的主要控制参数为转速和桨距角。当输出功率低于额定功率时, 控制器将叶片桨距角置于 0° 附近, 不做变化。此时, 通过调节风电机组转速, 有唯一的 λ 使得 C_p 最大, 称为最佳叶尖速比 λ_{opt} , 对应的风能利用系数为 C_{pmax} 。结合式(1)~(4), 可得风电机组的MPPT曲线方程为:

$$\begin{cases} P_{opt} = k_{opt} \omega_r^3 \\ k_{opt} = 0.5\rho\pi R^5 C_{pmax} / \lambda_{opt}^3 \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{opt} 为最大输出功率; k_{opt} 为功率跟踪系数。

定义风电机组的减载运行曲线为:

$$P_{del} = 0.5\rho Av^3 C_p(\lambda^{sub}, \beta) = k_{del} \omega_r^3 \quad (6)$$

其中, P_{del} 为减载运行功率; λ^{sub} 为次优叶尖速比; k_{del} 为减载运行系数。

同时, 设 d 为风电机组的减载水平, 表示其减载量大小, 则风电机组的有功功率备用容量 P_{res} 为:

$$P_{res} = P_{opt} - P_{del} = 0.5\rho Av^3 \Delta C_p = dP_{opt} \quad (7)$$

$$d = (-0.0744v + 0.6952) \times 100\% \quad (8)$$

其中, ΔC_p 为风能利用系数的变化量。

为保证风电机组在不同风速下能够满足调频备用需求, 同时尽可能减少弃风量, 图1对比了采用超速控制与考虑风速变化后风电机组的减载水平。由图可知, 采用超速控制时风电机组的减载水平较高。根据风电场的数据统计, 一年内绝大部分时间风电机组运行在额定转速以下。因此采用所提超速控制可以满足风电机组在大多数时间的减载要求^[3]。

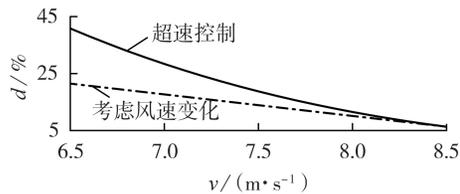


图1 不同风速下风电机组的减载水平

Fig.1 Reduction rate of wind turbine under different wind speeds

2 超速风电机组调频特性分析及优化控制

2.1 超速风电机组调频特性分析

当系统频率跌落时, 超速风电机组参与调频的动态响应过程见图2。图中, 有功功率为标幺值, 后

同; P_e 为风电机组的电磁功率; P_0 为风电机组参与调频初始时刻的风功率捕获量; S_1 所示面积为风电机组释放的旋转动能, 主要在惯性响应阶段发挥作用, 影响系统的频率变化率和频率最低点; S_2 所示面积为风电机组捕获的机械能增量, 主要用于提供一次调频支持, 影响系统的稳态频率; S_3 所示面积为浪费的备用能量。可以看出, 风电机组参与调频后的输出功率并未达到该风速下的最大功率, 造成减载功率未得到充分利用, 具备进一步挖掘利用的可能。

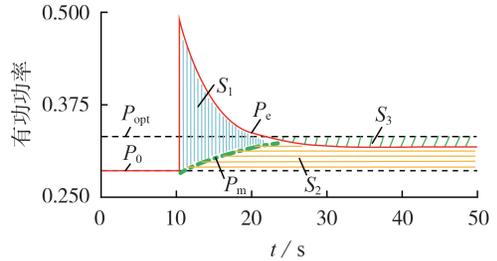


图2 参与调频的超速风电机组有功功率变化曲线

Fig.2 Active power curve of over-speed wind turbines participating in frequency regulation

为此, 首先对超速风电机组参与调频过程中的能量变化进行定量分析, 从协调以上能量间关系的角度出发, 提升风电机组的频率控制能力。超速减载的风电机组在频率控制过程中增发的能量由2个部分构成: 一部分来自旋转动能的释放, 另一部分来自风电机组捕获的机械功率增量。风电机组释放的旋转动能与风电机组参与调频的初始转速 ω_0 和风电机组参与调频后的稳态转速 ω_{st} 有关, 即:

$$S_1 = 0.5J(\omega_0^2 - \omega_{st}^2) \quad (9)$$

其中, J 为风电机组的机械转动惯量。

调频过程中风电机组捕获的机械能增量为:

$$S_2 = \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_m(t) - P_0) dt \quad (10)$$

其中, t_{on} 和 t_{off} 分别为机组参与调频的初始时刻和结束时刻。

达到稳态后风电机组浪费的备用能量为:

$$S_3 = \int_{t'_{off}}^{t_{off}} (P_{opt} - P_m(t)) dt = 0.11\rho Av^3 (t_{off} - t'_{off}) \times \left[C_{pmax} - \left(\frac{116v}{\omega_r R} - 9.06 \right) e^{-12.5 \left(\frac{v}{\omega_r R} - 0.035 \right)} \right] \quad (11)$$

其中, t'_{off} 为机组减速到 ω_{st} 的时刻。

为了便于分析, 对风电机组的转速变化过程进行简化, 假设风电机组的转速经过时间 T_0 由 ω_0 匀速减小到 ω_{st} , $T_0 = t'_{off} - t_{on}$, 则:

$$\omega_r(t) = \omega_0 + (\omega_{st} - \omega_0)t/T_0 \quad (12)$$

联立式(1)、式(9)与式(10), 可得超速风电机组在频率控制过程中提供的能量支持为:

$$\Delta E_0 = 0.5J(\omega_0^2 - \omega_{st}^2) + 0.11\rho Av^3 \int_{t_{on}}^{t_{off}} \left[\left(\frac{116v}{\omega_r R} - 9.06 \right) e^{-12.5 \left(\frac{v}{\omega_r R} - 0.035 \right)} - \left(\frac{116v}{\omega_0 R} - 9.06 \right) e^{-12.5 \left(\frac{v}{\omega_0 R} - 0.035 \right)} \right] dt \quad (13)$$

由式(13)可知,超速风电机组在频率控制过程中的能量变化主要由风速 v 、机组的初始运行状态以及调频后的运行点决定。机组的初始运行状态受超速减载控制的影响,主要由减载水平 d 决定,且风速不可控,机组调频后的运行点决定了超速风电机组的能量变化。因此,需要对超速风电机组最优运行点的设置进行深入研究,以发挥机组的最大调频优势。

2.2 最优运行点

为了计算出不同风速下风电机组参与调频后的最优运行点,充分利用备用容量提升机组的惯性和一次调频能力,本文建立以下优化模型。

考虑惯性响应阶段的控制目标为降低系统的频率变化率和提升频率最低点,以减速过程中机组释放的旋转动能和捕获的机械能变化量最大为目标,目标函数表达式为:

$$\max f_1 = 0.5J(\omega_0^2 - \omega_{st}^2) + \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_m(t) - P_0) dt \quad (14)$$

考虑一次调频阶段的控制目标为充分利用减载功率提升系统稳态频率,机组运行点应尽可能接近MPPT,以风电机组浪费的备用能量最少为目标,为便于求解,通过取负值转化为求取最大值的函数,即:

$$\max f_2 = -S_3 = - \int_{t_{off}}^{t_{on}} (P_{opt} - P_m(t)) dt = -0.11\rho Av^3 (t_{off} - t_{on}) \times \left[C_{pmax} - \left(\frac{116v}{\omega_r R} - 9.06 \right) e^{-12.5 \left(\frac{v}{\omega_r R} - 0.035 \right)} \right] \quad (15)$$

因此,综合考虑惯性响应和一次调频阶段控制的目标函数为:

$$\max F = \max(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) = \max \left\{ \lambda_1 \left[0.5J(\omega_0^2 - \omega_{st}^2) + \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_m(t) - P_0) dt \right] - \lambda_2 0.11\rho Av^3 (t_{off} - t_{on}) \times \left[C_{pmax} - \left(\frac{116v}{\omega_r R} - 9.06 \right) e^{-12.5 \left(\frac{v}{\omega_r R} - 0.035 \right)} \right] \right\} \quad (16)$$

其中, λ_1 和 λ_2 为权重系数,取 $\lambda_1=0.4$ 、 $\lambda_2=0.6$,即优先考虑一次调频控制,同时兼顾惯性响应能力,也可根据系统的实际调频需求,为 λ_1 和 λ_2 选择不同的权重值。

为提供一次调频支持,风电机组稳定后的出力

必须大于参与调频前的出力,约束条件为:

$$\omega_{de}^{down} < \omega_{st} < \omega_0 \quad (17)$$

其中, ω_{de}^{down} 为风电机组捕获机械功率与调频初始时刻相同时降速减载运行点的转速。

同时,为了避免风电机组深度调频而导致的失稳,转子转速应高于正常运行时的转速下限值(0.7 p.u.),则约束条件为:

$$0.7 \text{ p.u.} < \omega_{st} < \omega_0 \quad (18)$$

本文选取机组提供持续功率支持的时间($t_{off} - t_{on}$)为30 s,联立式(16)~(18)可得不同风速下风电机组参与调频后的最优运行点对应的转速 ω_{opt} (标么值),如图3所示。值得一提的是,通过优化得到的运行点对应的转速 ω_{st} 并非该风速下MPPT对应的转速,前者略小于后者。在最优运行点处,虽然牺牲了少量的风功率捕获能量,但超速风电机组通过其快速的有功调节特性虚拟得到更大的等效惯量,整体提升了机组的调频能量支持。

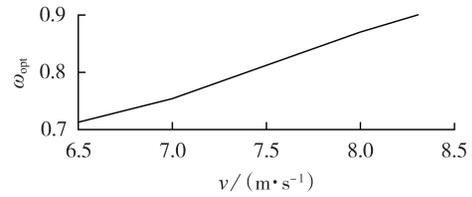


图3 不同风速下最优运行点处超速风电机组的转速
Fig.3 Rotate speed of over-speed wind turbines at optimal operation point under different wind speeds

2.3 基于最优运行点的超速风电机组控制策略

超速风电机组参与调频的过程中电磁功率、机械功率与转速之间的关系如图4所示。在制定风电机组有功功率控制策略时,包含以下2个控制目标:①选择合适的功率增量 ΔP_e ,使机组的运行点能够向左越过MPPT;②保证机组能够在转速稳定后收敛于最优运行点,从而获得最佳的调频性能。下面分别讨论上述控制目标。

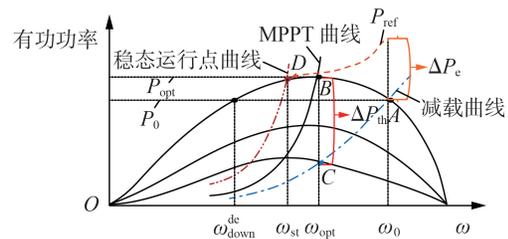


图4 超速风电机组参与调频时的动态响应

Fig.4 Dynamic response of over-speed wind turbines participating in frequency regulation

调频前风电机组运行在超速减载状态,预留部分有功备用。当负荷突增时,通过控制风电机组的功率增量 ΔP_e ,此时电磁功率大于风电机组捕获的机械功率,转子将减速释放动能,为系统提供惯性支

持;与此同时,叶尖速比 λ 减小,风电机组捕获的机械功率增加。经过一个暂态过程,当 $\Delta P_m = \Delta P_e$ 时,风电机组达到新的平衡点 E ,为系统提供持续的功率支持。

设机组恰好越过MPPT的电磁功率增量为临界功率增量 ΔP_{th} 。由图4可知,临界功率增量为点 B 与减载功率曲线上转速相同的点(点 C)之间功率差值。根据减载曲线与MPPT曲线的关系,联立式(5)~(7)可得:

$$\omega_{opt}^3 = k_{del} \omega_0^3 / [(1-d)k_{opt}] \quad (19)$$

进一步推得:

$$\Delta P_{th} = k_{opt} \omega_{opt}^3 - k_{del} \omega_0^3 = (k_{opt} - k_{del}) P_{del} / [(1-d)k_{opt}] \quad (20)$$

结合式(20),风电机组的频率控制策略为:

$$P_{ref} = P_{st} + k \Delta P_{th} (\omega_r - \omega_{st}) / (\omega_0 - \omega_{st}) \quad (21)$$

其中, P_{ref} 为风电机组转子侧变流器有功控制指令; P_{st} 为风电机组参与调频后输出的有功功率; k 为比例系数。

所提出的风电机组频率控制策略见附录中图A1。稳态情况下,风电机组减载运行,预留备用容量;当系统频率跌落超过限值,风电机组切换到频率控制模式。由式(21)可知,调频初始时刻, $\omega_r = \omega_0$,此时机组的功率增量最大,有效提升系统等效转动惯量。由于不平衡转矩的作用,风电机组转速下降, ω_r 逐渐趋近于 ω_{st} ,直到二者相等。此时, $P_{ref} = P_{st}$,风电机组最终转速低于MPPT的转速,输出功率为 P_{st} 。

3 仿真分析

3.1 系统简介

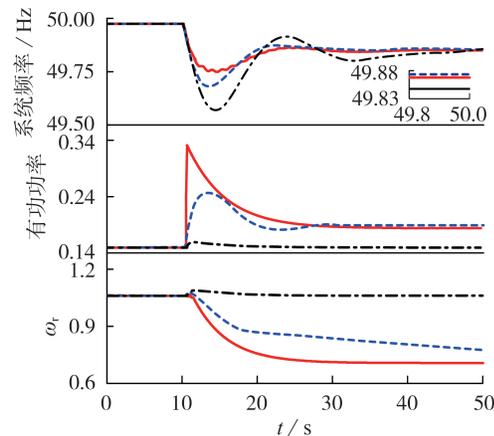
本文基于DIGSILENT PowerFactory进行仿真,电力系统仿真图见附录中图A2。系统中包含有3台火电机组和1座风电场,负载采用恒功率控制。火电机组 G_1 、 G_2 的容量为400 MW, G_3 的容量为1000 MW;风电场由容量为200×1.5 MW的双馈风电机组组成;负载 L_1 、 L_2 的功率分别为1000、500 MW。3台火电机组都配备调速器,均可参与一次调频。

所提控制策略适用于双馈风电机组和直驱风电机组的频率控制,以双馈风电机组为例进行验证。设双馈风电机组的切入风速为3 m/s;转速保护下限为0.7 p.u.。设低风速、中风速和变风速3个场景,分别将超速风电机组调频后的运行点设置在所提最优运行点和MPPT,将所提方法与综合惯量控制^[17]相比较。综合惯量控制采用试错法确定虚拟惯量系数和下垂系数,保证超速风电机组参与系统调频后稳定在MPPT,与本文所得最优运行点进行对比。

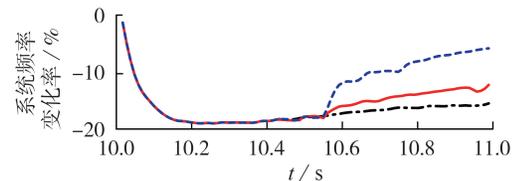
3.2 低风速下的仿真分析

在低风速段选取风速为6.5 m/s的典型风速进行仿真,风电机组通过超速控制预留总容量的21.6%作为备用功率。该风速下的最优稳态转速为

0.716 p.u.,已接近风电机组正常运行的转速下限,所以低于该风速时机组将不参与调频。在第10 s时,负载 L_1 处突然增加100 MW的负荷,仿真结果见图5。图中 ω_r 为标么值,后同。由图可知,当风电机组不参与调频、采用综合惯量控制以及采用本文所提控制策略时,系统出现的最大频率偏差分别为0.426、0.311、0.233 Hz。相比于综合惯量控制,采用本文所提控制策略时,系统最大频率偏差减少了25.08%,提升了频率最低点,有利于系统的频率稳定。相比综合惯量控制,采用所提策略时机组在惯性响应阶段提供了更多的能量支撑,通过快速、充分地释放机组的旋转动能增加系统的等效惯量,有效降低频率变化率,有利于系统频率的安全稳定。



(a) 系统频率、风电机组输出功率、转速变化曲线



(b) 系统频率变化率

--- 风电机组不参与调频, — 本文策略
- - - 综合惯量控制

图5 低风速下的仿真结果

Fig.5 Simulative results under low wind speed

由于本文所提控制策略的稳态运行点偏离了MPPT,机组的一次调频功率略低于该风速下的最大出力。就整个系统的稳态频率而言,由于采用本文所提控制策略时风电机组的短时功率损失远小于机组整体出力,对系统的稳态频率值影响很小。对比系统的频率变化和风电机组的输出功率可以看出,本文所提控制策略能够充分利用机组的备用容量,改善了系统扰动情况下的频率动态响应特性。

3.3 中风速下的仿真分析

当风速为8 m/s时,负载 L_1 处突然增加100 MW负荷,该风速下的最优稳态转速设置为0.87 p.u.,仿真结果见附录中图A3。由图可知,当风电机组不参与调频、采用综合惯量控制以及采用本文所提控制

策略时,系统出现的最大频率偏差分别为0.425、0.327、0.266 Hz。相比于综合惯量控制,采用本文所提控制策略时,系统的最大频率偏差减少了18.65%,有效提升了频率最低点,且系统频率变化率明显下降。相比于综合惯量控制,本文提出的策略能够在惯性响应阶段更为迅速地释放机组旋转动能,且转速变化范围更大。在频率跌落初期,风电机组的调频功率增量达到53.28 MW,短时间内为系统注入大量的调频能量,从而有效地降低系统频率变化率,避免高水平的频率变化率触发低频减载保护,有利于系统频率的稳定。就整个系统的稳态频率而言,采用本文所提控制策略时的系统频率为49.869 Hz,MPPT运行状态下的稳态频率为49.873 Hz,两者仅相差0.004 Hz,有效减小了系统的稳态频率偏差。

结合风速为6.5、8 m/s时的仿真结果可知,当系统发生突增负荷时,综合惯量控制在系统频率变化初期释放的转子动能较少且速度慢,未能及时减缓系统频率变化率。而本文所提控制策略能够迅速释放旋转动能,且机组的转速下降程度更大,在惯性响应阶段提供了更多的能量支撑;由于运行点偏离了MMPT曲线,导致机组的稳态功率略小于综合惯量控制,但机械功率损失非常小,对系统稳态频率的影响可以忽略。本文所提控制策略在频率动态响应过程中能够提供更大的调频能量支持,充分利用机组的备用容量完成频率调整。

3.4 变风速情况下的仿真分析

为了进一步验证所提策略在变风速情况下的可靠性,当风速在1 s内由8 m/s下降至6.5 m/s时,负载 L_1 处突增100 MW的负荷,在此极端情况下进行仿真,仿真结果见附录中图A4。采用综合惯量控制的机组在系统频率变化后转速下降并释放转子动能,抑制了系统频率的快速变化,但是在第16.58 s时,转子转速下降至转速保护下限,机组退出调频模式并开始恢复转速,导致系统频率出现二次跌落,最低频率为49.604 Hz,小于第一次频率跌落的最低点。在风速向下爬坡的情况下,综合惯量控制无法根据风速改变调频功率增量,导致机组过度响应。

由变风速下的仿真结果可知,采用本文所提控制策略时,风电机组能够平稳地响应外界的变化,系统最大频率频率偏差为0.398 Hz,相比风电机组不参与调频的情况提升了0.091 Hz。本文所提控制策略能够依据风速变化,实时调整调频功率,改变稳态运行点,避免机组过度响应,保持自身的稳定运行。

综合上述仿真结果可知,所提策略能够充分利用超速风电机组的减载功率和旋转动能,整体提升机组的惯性响应和一次调频能力,且能够根据风速变化合理控制机组的转速响应,保证机组自身的稳定运行,避免过度响应引发的系统频率二次跌落。

4 结论

本文提出了一种考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略。风电机组在电网频率稳定时运行在超速减载模式,存储部分旋转动能和预留一定备用容量。当系统频率出现较大跌落时,风电机组切换到频率控制模式,参与系统调频。调频后转速低于MPPT对应的转速,牺牲了部分减载功率,但释放了更多的转子动能,总体提升了风电机组的调频能量。

仿真结果表明,所提策略能够充分利用风电机组的旋转动能,为系统提供更大的功率支撑,减缓小频率的跌落速率和系统最大频率偏差,同时结合机组自身运行状态调节机械功率捕获,为系统提供长时间的功率支持。所提策略能够充分利用风电场的备用容量,改善系统扰动情况下的频率动态响应特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] TIELENS P, VAN HERTEM D. Receding horizon control of wind power to provide frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2663-2672.
- [3] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 452-460.
- [4] PAOLA A, ANGELI D, STRBAC G. Scheduling of wind farms for optimal frequency response and energy recovery[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1764-1778.
- [5] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [6] 李少林,秦世耀,王瑞明,等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):145-150,156.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 145-150, 156.
- [7] 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.
- [8] VYVER J V, JEROEN 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.
- [9] MA J, SONG Z X, ZHANG Y X, 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.
- [10] 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, 95.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, 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, 95.
- [11] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2385-2391.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [12] 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.
- [13] WANG S Q, TOMSOVIC K. A novel active power control framework for wind turbine generators to improve frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6579-6589.
- [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 Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, 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] 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.
- [16] YE H, PEI W, QI Z P. 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.
- [17] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- [18] 黄伟, 陈炜, 吴军, 等. 基于功率平衡控制原理的双馈风电机组辅助调频方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 66-72.
- HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 66-72.
- [19] 边晓燕, 印良云, 丁炆, 等. 基于深度信念网络的低风速风电参与微电网频率优化控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 76-82.
- BIAN Xiaoyan, YIN Liangyun, DING Yang, et al. Frequency optimization control of microgrid with LWTGs based on deep belief network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 76-82.

作者简介:



王同森

王同森(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为风力发电参与系统调频(E-mail:TS_ncepu@163.com);

张峰(1983—),男,山东莱芜人,副教授,博士研究生导师,主要研究方向为高渗透率新能源电网频率控制、储能与新能源发电(E-mail:fengzhang@sdu.edu.cn);

丁磊(1980—),男,山东临沂人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为广域保护与控制、智能电网自愈及可再生能源接入(E-mail:dinglei@sdu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Frequency regulation control strategy of over-speed wind turbines considering optimal operation point

WANG Tongsen, ZHANG Feng, DING Lei

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: With the reserve capacity reserved by over-speed control, wind turbines can simultaneously achieve two control objectives of inertial response and primary frequency regulation. The traditional control strategy often makes insufficient use of the reserve capacity of wind turbine, and has not yet exerted the maximum frequency regulation advantage of over-speed wind turbine. Therefore, based on the frequency control study of the over-speed wind turbine, the relationships between inertia response and primary frequency regulation and steady-state operation point are analyzed, and the frequency regulation control strategy of the over-speed wind turbines considering the optimal operation point is proposed. The strategy solves the optimal operation points under different wind speeds through the frequency regulation energy model, and the reserve capacity of the wind turbines is fully used to participate in the frequency adjustment, so as to realize the optimal coordination among the frequency drop speed, depth and steady-state deviation. The system simulation model is built in DigSILENT for verification, the results show that the proposed control strategy can improve the dynamic frequency response characteristics of system under different wind speeds, and ensure the stability of wind turbines.

Key words: wind turbines; over-speed control; inertial response; primary frequency regulation; control strategy; reserve capacity

附录

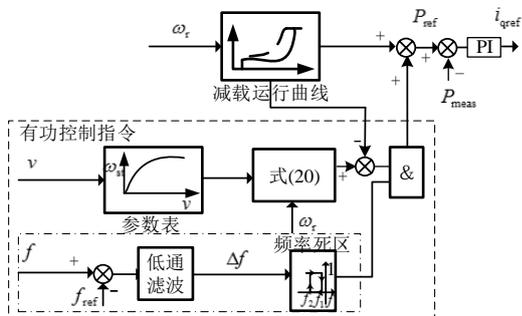


图 A1 风电机组附加频率控制框图

Fig.A1 Block diagram of wind turbine additional frequency

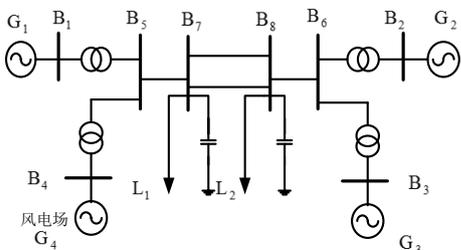


图 A2 系统仿真模型

Fig.A2 Simulation model of power system control

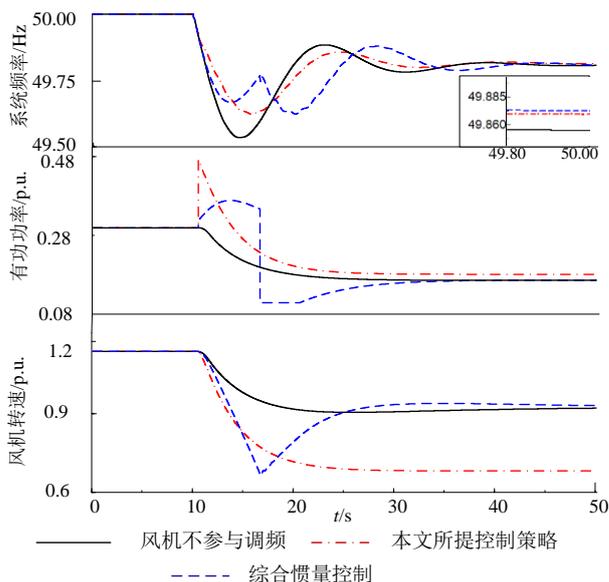
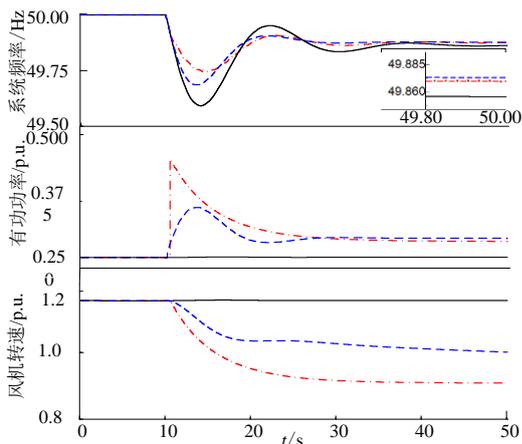
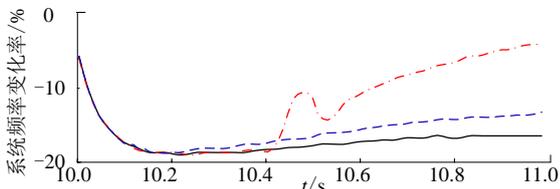


图 A4 风速变化情况下的仿真结果

Fig.A4 Simulative results under changed wind speed



(a) 系统频率、风电机组输出功率、转速变化曲线



(b) 系统频率变化率

—— 风机电不参与调频 - - - - 本文所提控制策略
 - - - - 综合惯量控制

图 A3 8 m/s 风速下的仿真结果

Fig.A3 Simulative results when wind speed is 8 m/s