风电机组下垂控制对系统功角首摆稳定性的影响机理

刘洪波[1]，任 阳[1]，石 鹏[2]，王 曦[2]，孙 黎[1]
(1.东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室，吉林 吉林 132012；2.国网四川省电力公司 电力科学研究院，四川 成都 610000)

摘 要：随着具备频率调节功能的风电机组大规模并网，其调频控制严重影响了电力系统暂态功角的稳定性。文章以送端区域接入风机且联络线中间节点发生三相短路故障的扩展两机系统为背景，研究了风机下垂控制对系统功角首摆稳定性的影响机理。首先，基于等面积定则建立了同步机转速差值与系统暂态能量的关系，并提出了包含风机出力、并网位置和系统惯量分布等影响因素的 WDPAS(Wind Turbine Droop Control Affects Power Angle Stability)指标，用于分析风机下垂控制对同步机转速差值的影响；其次，以风机最大功率点跟踪控制时的系统状态为基准，研究了故障期间及故障清除后风机附加下垂控制时，系统暂态能量的动态变化情况；最后，通过系统功角首摆最大偏移量对系统功角首摆稳定性进行评估，并在 DIgSILENT/PowerFactory 仿真软件中搭建了扩展两机系统仿真模型，验证了该指标的合理性及结论的正确性。

关键词：风电机组；下垂控制；系统功角首摆稳定性；同步机转速差值；暂态能量
中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1664-08

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”战略目标提出，以风电为代表的可再生能源机组在电网系统比例逐步提高[1]，电网系统“低惯量、弱阻尼”特性凸显，由负荷投切、系统故障等因素导致的功率波动愈加频繁和剧烈[2]。单独采用同步发电机组调节功率输出已不满足电网系统频率稳定要求，需要风电机组等电力电子设备参与电网调频[3]。

目前，针对含高比例可再生能源系统发生功率扰动时的频率稳定问题，国内外学者已进行了研究。部分学者追求最大风能资源利用率，风电机组采用最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）的有功控制策略，通过额外配置储能平抑系统频率波动[4,5]。部分学者认为将系统频率引入风机控制环节，在频率发生波动时，调节风电机组的旋转动能维持系统频率稳定[6,7]。但无论是储能参与调频，还是风机参与调频，都是在发生频率波动时降低系统的不平衡能量[8-10]。电力电子设备在调节系统不平衡能量时，改变了同步机转子运动，使系统暂态功角稳定问题更为复杂，给电网稳定运行带来极大的挑战[11,12]。

风电高渗透率下，不同于传统同步发电机组，风电机组的动态特性凸显[13]，风机调频控制对系统暂态功角稳定性带来的影响受到关注。文献[14]利用等面积定则计算风机调频对系统极限切除角的影响，风机参与调频增大了系统极限切除角，有利于系统暂态功角的稳定。文献[15]分析了风机调频改变并网点注入电流对同步机输出电磁功率的影响，结合扩展等面积定则，验证了接入系统送端的风电机组附加调频控制有利于系统暂态功角稳定，而接入系统受端的风电机组附加调频控制则不利于系统暂态功角稳定。文献[16]从暂态能量角度分析风机附加虚拟惯量控制对系统功角首摆稳定性的影响机理，故障期间的风机等效惯量控制环节比例系数越大，故障清除后的风机等效惯量控制环节比例系数越小，功角首摆稳定性越强，反之，则不利于系统功角首摆稳定。文献[17]分析改变风机机端电压幅值和相角对同步机输出功率的影响，并采用时域仿真观测风机有功输出与机端电压幅值和相角间的关系，风机在故

收稿日期：2024-08-28。
基金项目：国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202226021A-1-1-ZN)。
作者简介：刘洪波(1973-)，女，博士，教授，硕士生导师，研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail：liuhb@neepu.edu.cn

障期间减小功率输出，故障清除后再缓慢恢复，有利于减小同步机加速面积,增大同步机减速面积,提高系统暂态功角稳定性。文献[18]在虚拟同步机中引入一个附加辅助惯量的功率环来调节系统惯量,增加系统频率支撑的同时,减小同步机加速面积,增大同步机减速面积,提高了系统暂态功角稳定性。以上文献表明了风机调频控制对系统暂态功角稳定性具有影响,而且与风机出力、并网位置、系统中的惯量分布和系统所处的故障阶段有关。因此,需要综合考虑这几种影响因素,分析附加调频控制的风电机组对系统功角首摆稳定性的影响机理。

本文基于等面积定则,建立系统暂态能量与扩展两机系统同步机转速差值间的数学联系,以双馈风机(Doubly Fed Induction Generator,DFIG)为例，通过分析双馈风机下垂控制在故障期间、故障发生后前期对同步机输出功率的影响,建立了风机出力、并网位置和系统惯量分布等参数与同步机输出功率间的联系,并提出 WDPAS 指标;以 MPPT 控制下的扩展两机系统同步机转速差值为基准,通过 WDPAS 指标分析 DFIG 附加下垂控制对同步机转速差值的影响,得到系统暂态能量的动态变化情况，进而研究 DFIG 下垂控制调节风机出力对系统暂态功角首摆稳定性的影响机理,最后以系统功角首摆幅值变化情况作为对系统功角首摆稳定性影响的评估指标，并在 DIgSILENT/PowerFactory 中搭建扩展两机互联系统仿真模型,验证相关理论分析的正确性。

1　新型系统功角首摆稳定性判据

对于多机系统,如果故障后系统功角稳定性被破坏,通常表现为两机群摇摆模式,因此,简化为两台同步机互联系统,DFIG 接入送端区域,如图 1 所示。

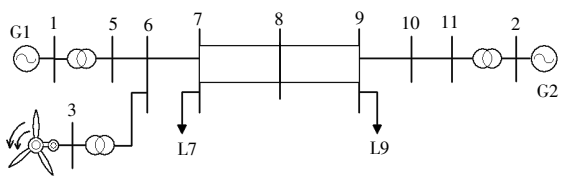


图 1　扩展两机系统等值电路图

Fig.1 Extended two-unit system equivalent circuit diagram

图 1 中系统负荷不变,同步机采用降低出力而非切机的形式,以平衡新增风电功率,常规控制下的风机惯性时间常数很小[19,20],可以认为系统惯性时间常数保持不变。有功潮流由送端同步机 G1 流向受端同步机 G2，下文统称该系统为扩展两机系统。

DFIG 采用 MPPT 控制时,扩展两机系统中同步机机械功率和电磁功率[21]为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{m1,w}}=P_{\mathrm{m1}}-\beta P_{\mathrm{mw}} \\ P_{\mathrm{e1,w}}=P_{\mathrm{e1}}-\beta P_{\mathrm{ew}} \\ P_{\mathrm{m2,w}}=P_{\mathrm{m2}}-(1-\beta)P_{\mathrm{mw}} \\ P_{\mathrm{e2,w}}=P_{\mathrm{e2}}-(1-\beta)P_{\mathrm{ew}} \end{cases} \tag{1}$$

式中:P_{m1},P_{m2}分别为两机系统中同步机 G1,G2 的机械功率;P_{e1},P_{e2}分别为两机系统中同步机 G1,G2 的电磁功率,P_{mw},P_{ew}分别为 DFIG 的机械功率和电磁功率;$P_{\mathrm{m1,w}}$,$P_{\mathrm{m2,w}}$分别为扩展两机系统中同步机 G1,G2 的机械功率;$P_{\mathrm{e1,w}}$,$P_{\mathrm{e2,w}}$分别为扩展两机系统中同步机 G1,G2 的电磁功率;β 为风机接入功率分配系数[21],表示由于风机接入系统,同步机 G1 出力变化量 ΔP_{e1} 占风机出力 P_{ew} 比例,即 $\beta=\Delta P_{\mathrm{e1}}/P_{\mathrm{ew}}$,其中,$\Delta P_{\mathrm{e1}}=P_{\mathrm{e1}}-P_{\mathrm{e1,w}}$。

扩展两机系统中同步机转子运动方程为

$$2H_1=\frac{\mathrm{d}^2\delta_{1,\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t^2}=P_{\mathrm{m1,w}}-P_{\mathrm{e1,w}} \tag{2}$$

$$2H_2=\frac{\mathrm{d}^2\delta_{2,\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t^2}=P_{\mathrm{m2,w}}-P_{\mathrm{e2,w}} \tag{3}$$

式中:H_1,H_2分别为扩展两机系统中同步机 G1,G2 的惯性时间常数;$\delta_{1,\mathrm{w}}$,$\delta_{2,\mathrm{w}}$分别为扩展两机系统中同步机 G1,G2 的功角。

扩展两机系统同步机功角差 $\Delta\delta_{\mathrm{w}}=\delta_{1,\mathrm{w}}-\delta_{2,\mathrm{w}}$,即式(2),(3)相减得:

$$\frac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t^2}=\left(\frac{P_{\mathrm{m1,w}}}{2H_1}-\frac{P_{\mathrm{m2,w}}}{2H_2}\right)-\left(\frac{P_{\mathrm{e1,w}}}{2H_1}-\frac{P_{\mathrm{e2,w}}}{2H_2}\right) \tag{4}$$

扩展两机系统等效为单机无穷大系统,可得:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\Delta\delta_{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t}=\Delta\omega_{\mathrm{w}}\cdot\omega_0 \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t^2}=\dfrac{1}{2H}(P_{\mathrm{m,w}}-P_{\mathrm{e,w}}) \end{cases} \tag{5}$$

$$H=\frac{H_1H_2}{H_1+H_2} \tag{6}$$

$$P_{m,w}=\frac{H_2}{H_1+H_2}P_{m1,w}-\frac{H_1}{H_1+H_2}P_{m2,w} \quad (7)$$

$$P_{e,w}=\frac{H_2}{H_1+H_2}P_{e1,w}-\frac{H_1}{H_1+H_2}P_{e2,w} \quad (8)$$

式中:H 为等效单机无穷大系统的惯性时间常数;$P_{m,w}$,$P_{e,w}$分别为等效单机无穷大系统的同步机机械功率和电磁功率;$\Delta\omega_w$为等效单机无穷大系统同步机转速(即扩展两机系统同步机转速差值 $\Delta\omega_w=\omega_{m1,w}-\omega_{m2,w}$,$\omega_{m1,w}$,$\omega_{m2,w}$为扩展两机系统中同步机 G1,G2 的电气角速度);ω_0为角速度额定值。

$P_{Ⅰ,w}$,$P_{Ⅱ,w}$,$P_{Ⅲ,w}$分别对应等效单机无穷大系统故障前、故障中和故障后的同步机功率特性曲线,同步机机械功率 $P_{m,w}$不变,如图 2 所示。

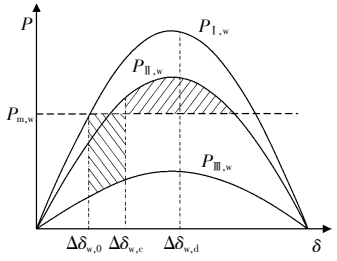


图 2 等效单机无穷大系统功角特性

Fig.2 Power angle characteristics of equivalent single machine infinite bus system

图 2 中,在 t_0 时刻等效单机无穷大系统同步机功角和转速分别为 $\Delta\delta_{w,0}$,$\Delta\omega_{w,0}$。发生三相短路后,转速增加,在 t_c 时刻等效单机无穷大系统同步机功角和转速分别为 $\Delta\delta_{w,c}$,$\Delta\omega_{w,c}$;三相短路清除,转速降低,清除后的系统首摆期间任意时刻 t_d,等效单机无穷大系统同步机功角和转速分别为 $\Delta\delta_{w,d}$,$\Delta\omega_{w,d}$。

等效单机无穷大系统在 t_d 时刻的系统暂态能量[22,23]为

$$V_d=\int_{\Delta\delta_{w,0}}^{\Delta\delta_{w,d}}(P_{m,w}-P_{e,w})d\Delta\delta=H\omega_0\Delta\omega_{w,d}^2 \quad (9)$$

在系统加速阶段,减小加速面积,减速阶段,增加减速面积,系统暂态能量将减小,有利于系统功角首摆稳定性[16]。由式(9)可知:当系统惯性时间常数 H 不变时,t_c 时刻扩展两机系统的同步机转速差值 $\Delta\omega_{w,c}$ 越低,即系统加速阶段的加速面积越小,则系统暂态能量越小,系统功角首摆稳定性越强;系统加速阶段经历相同动态变化过程后,t_d 时刻扩展两机系统的同步机转速差值 $\Delta\omega_{w,d}$ 越低,系统剩余加速面积越小,即系统减速阶段经历的减速面积越大。因此,系统暂态能量越小,系统功角首摆稳定性越强。

2 双馈风机附加下垂控制的影响机理分析

2.1 下垂控制影响判据

下垂控制策略下,DFIG 调频出力 P'_{ew}为

$$P'_{ew}=P_{ew}+P_{droop} \quad (10)$$

$$P_{droop}=K_{droop}\Delta f \quad (11)$$

$$\Delta f=f_{ref}-f_{mean} \quad (12)$$

式中:P_{droop}为风机附加下垂控制的有功增量;K_{droop}为下垂控制系数;Δf 为频率变化量;f_{ref}为频率参考值;f_{mean}为频率测量值。

此时,含下垂控制风机的扩展两机系统中同步机的机械功率及电磁功率为

$$\begin{cases}P'_{m1,w}=P_{m1,w}\\P'_{e1,w}=P_{e1,w}-\beta' P_{droop}\\P'_{m2,w}=P_{m2,w}\\P'_{e2,w}=P_{e2,w}-(1-\beta')P_{droop}\end{cases} \quad (13)$$

式中:$P'_{m1,w}$,$P'_{m2,w}$为风机附加下垂控制后的扩展两机系统同步机 G1,G2 的机械功率;$P'_{e1,w}$,$P'_{e2,w}$分别为风机附加下垂控制后的扩展两机系统同步机 G1,G2 的电磁功率;β'为风机调频功率分配系数,表示风机附加下垂控制同步机 G1 出力变化量 $\Delta P_{e1,w}$占风机调频出力 P_{droop}比例,即 $\beta'=\Delta P_{e1,w}/P_{droop}$,$\Delta P_{e1,w}=P_{e1,w}-P'_{e1,w}$。

扩展两机系统等效为单机无穷大系统,同步机的机械功率 $P'_{m,w}$和电磁功率 $P'_{e,w}$为

$$\begin{cases}P'_{m,w}=P_{m,w}\\P'_{e,w}=P_{e,w}-(\beta'-\dfrac{H_1}{H_1+H_2})P_{droop}\end{cases} \quad (14)$$

风机下垂控制对系统转速影响的 WDPAS 指标为

$$f_{WDPAS}=\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2} \quad (15)$$

故障期间等效单机无穷大系统电磁功率为

$$P'_{e,w}=P_{Ⅱ,w}-f_{WDPAS}\cdot P_{droop} \quad (16)$$

故障清除后，等效单机无穷大系统电磁功率为

$$P'_{e,w}=P_{Ⅲ,w}\cdot f_{WDPAS}\cdot P_{droop} \quad (17)$$

相对于 MPPT 控制,DFIG 附加下垂控制时,三相短路故障发生后,系统频率超出额定值,风机降低功率输出(P_{droop}<0)。由式(16),(17)可知,当 f_{WDPAS}>0 时,将提高系统加速阶段和减速阶段的同步机电磁功率 ,降低加速阶段和减速阶段的扩展两机系统同步机转速差值 ,从而 DFIG 附加下垂控制将减小加速面积和增大减速面积 ,降低系统暂态能量,有利于系统功角首摆稳定性。反之,当 f_{WDPAS}<0 时,则不利于系统功角首摆稳定性。

2.2　故障期间

图 1 中扩展两机系统节点 8 发生三相短路,故障期间的系统等值电路如图 3 所示。$X_{w,1}$ 为风机到送端同步机 G1 的电抗; $X_{w,2}$,X_{L1},X_{L2} 分别为风机、负荷 L1 和负荷 L2 到受端同步机 G2 的电抗。

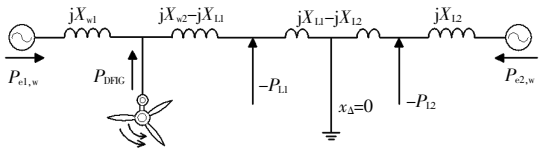


图 3　故障期间的扩展两机系统等值电路图

Fig.3 Extended two-unit system equivalence circuit diagram during fault

由图 3 可知,故障期间,三相短路将系统分为两个独立的回路[24],送端向受端区域传输功率受阻。风机采用 MPPT 控制时,风机功率不响应系统频率变化,送端同步机降低功率输出,同步机 G1 输出功率 $P_{e1,w}$;若风机附加下垂控制,则响应系统频率变化,降低功率输出 P_{droop},将减小送端同步机输出功率,在忽略网络损耗的情况下,$P_{e1,w}-P'_{e1,w}=P_{droop}$,风机调频功率分配系数。结合由式(15)可知，风机接入送端区域时，故障期间有 f_{WDPAS}>0,即:

$$P_{e,w}-(\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2})P_{droop}=P_{Ⅱ,w}-f_{WDPAS}\cdot P_{droop}>P_{Ⅱ,w} \quad (18)$$

由式(18)可知,风机附加下垂控制将提高故障期间系统的电磁功率，从而降低扩展两机系统的同步机转速差值,减小系统暂态能量,提高系统功角首摆稳定性,且送端同步机惯量占比越小,风电机组调频能力越强,系统功角首摆越稳定。

2.3　故障清除后的系统功角首摆期间

图 1 中扩展两机系统节点 8 发生三相短路,故障清除后,前期的系统等值电路如图 4 所示。

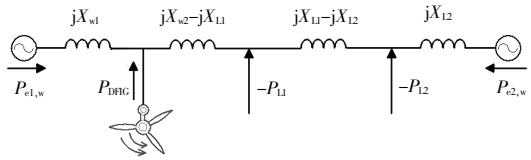


图 4　故障清除后,前期的扩展两机系统等值电路图

Fig.4 Extended two-unit system equivalent circuit diagram in the early stage after fault clearing

同步机 G1 与 G2 之间互电抗为

$$X=j(X_{w1}+X_{w2}+\frac{X_{w1}X_{w2}}{-x}) \quad (19)$$

式中：$-x$ 为风机外特性等值电抗,$x=\frac{u_s^2}{q_g}$;u_s 为风机并网点母线电压;q_g 为风机输出无功功率。

当风机的并网位置改变时,将影响同步机 G1 与 G2 之间的互电抗 X。采用直流潮流[21]分析,故障清除后，前期风机在 MPPT 控制下的系统功角为

$$\delta_w=P_{e1,w}X+P_{e,w}X_{w2}-P_{L1}X_{L1}-P_{L2}X_{L2} \quad (20)$$

风机采用下垂控制时,DFIG 输出功率增加 P_{droop},送端同步机输出功率增加 $\Delta P_{e1,w}$,受端同步机输出功率增加 $\Delta P_{e2,w}$,送、受端同步机 G1 与 G2 间互电抗增加[25]ΔX,系统功角为

$$\delta'_w=(P_{e1,w}-\Delta P_{e1,w})(X+\Delta X)+(P_{e,w}+P_{droop})X_{w2}-P_{L1}X_{L1}-P_{L2}X_{L2} \quad (21)$$

由式(20)与式(21)做差得:

$$\delta_w-\delta'_w=P_{e1,w}\Delta X-\Delta P_{e1,w}(X+\Delta X)+P_{droop}X_{w2} \quad (22)$$

由式(22)可知,故障清除后,前期的风机调频功率分配系数 β' 为

$$\beta'=\frac{(\delta_w-\delta'_w+P_{e1,w}\Delta X)/P_{droop}+X_{w2}}{X+\Delta X} \quad (23)$$

由式(23)可知,在故障清除后,风机调频功率分配系数 β' 与风机出力、并网位置等影响因素有关。

故障清除后,前期当 f_{WDPAS}>0 时,则:

$$P_{e,w}-(\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2})P_{droop}=P_{Ⅱ,w}-f_{WDPAS}\cdot P_{droop}>P_{Ⅲ,w} \quad (24)$$

由式(24)可知,风机附加下垂控制将提高故

障清除后系统的电磁功率，降低扩展两机系统的同步机转速差值,系统暂态能量减小,系统功角首摆稳定性增强,且送端同步机惯量占比越小,系统功角首摆越稳定。

故障清除后,前期当f_{WDPAS}<0 时,则:

$$P_{\mathrm{e,w}}-(\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2})P_{\mathrm{droop}}=P_{\mathrm{Ⅱ,w}}-f_{\mathrm{WDPAS}}\cdot P_{\mathrm{droop}}<P_{\mathrm{Ⅲ,w}} \quad (25)$$

由式(25)可知,风机附加下垂控制将降低故障清除后系统的电磁功率，提高扩展两机系统的同步机转速差值,系统暂态能量增加,降低系统功角首摆稳定性,且送端同步机惯量占比越小,越不利于系统功角首摆稳定。

3 仿真及结果分析

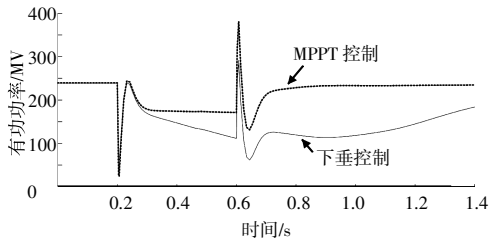
在 DIgSILENT/PowerFactory 中搭建如图 1 所示的扩展两机系统,同步发电机组 G1,G2 的有功出力分别为 $P_{\mathrm{e1,w}}$=700 MW,$P_{\mathrm{e2,w}}$=600 MW,有功负荷分别为 P_{L7}=500 MW,P_{L9}=1 000 MW，风电场有功出力 P_{DFIG}=235 MW,双馈风机的具体电气参数如表 1 所示。

表 1 双馈风机参数

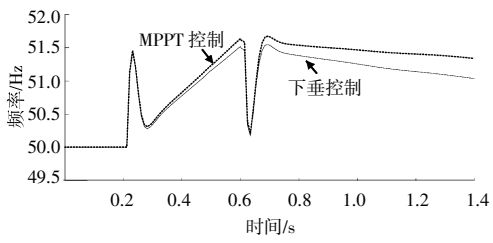
Table 1 Parameter of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	690	转子电阻/p.u.	0.010
额定功率/MW	5	转子漏抗/p.u.	0.100
额定频率/Hz	50	励磁电抗/p.u.	3.500
定子电阻/p.u.	0.01	发电机惯性时间常数/s	0.685
定子漏抗/p.u.	0.1	风力机惯性时间常数/s	4.320

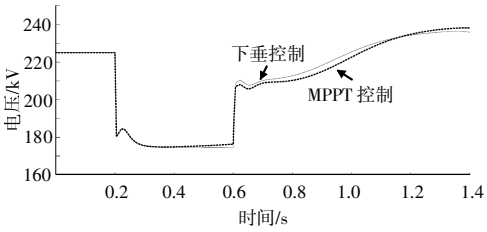
节点 8 在 0.2 s 时,发生三相短路故障,持续了 0.4 s。不同控制方式下系统参数如图 5 所示。



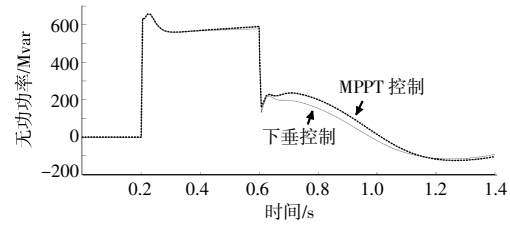
(a)有功功率输出



(b)并网点频率



(c)并网点电压



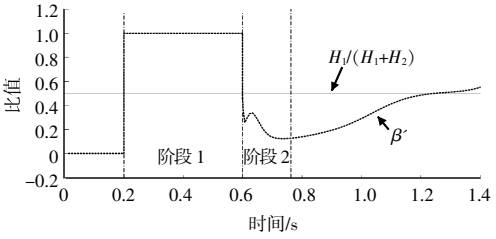
(d)无功功率输出

图 5 DFIG 功率输出及系统并网点状态

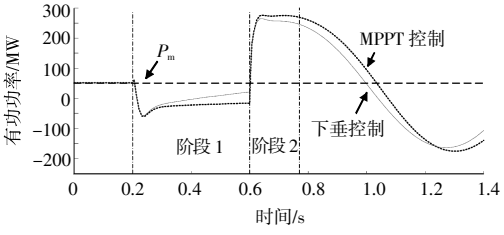
Fig.5 DFIG power output and grid-connected point system state

由图 5 可知,故障发生后,风机采用下垂控制降低风电场有功输出,抑制了系统频率增加。风电机组并网点母线电压不同,DFIG 输出无功也发生变化。因此,风电机组等效外特性发生变化,改变了同步机 G1 到 G2 间的互电抗。

故障期间,不同控制方法下,风机调频功率不平衡分配系数 β' 与送端同步机惯性时间常数占系统惯性时间常数比例 $H_1/(H_1+H_2)$ 的关系及电磁功率对比如图 6 所示。



(a)参数对比



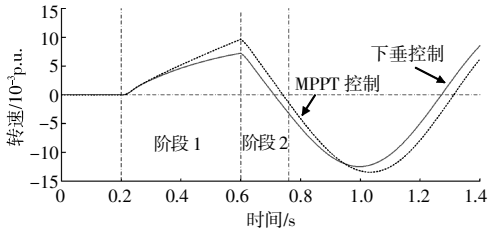
(b)系统电磁功率对比

图 6 参数及系统电磁功率变化对比

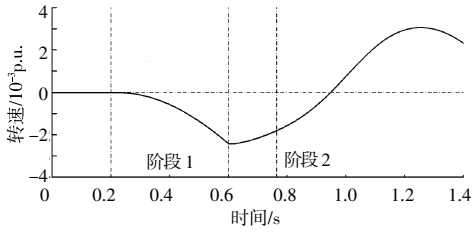
Fig.6 Comparison of parameters and system electromagnetic power changes

由图 6(a)可知,故障期间有$(\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2})>0$,即阶段 1。故障清除后的系统功角首摆期间有$(\beta'-\frac{H_1}{H_1+H_2})<0$,即阶段 2。由图 6(b)和式(15)可知,故障期间,$f_{WDPAS}>0$,DFIG 附加下垂控制将增大故障期间系统的电磁功率,即阶段 1;故障清除后的系统功角首摆期间,$f_{WDPAS}<0$,DFIG 附加下垂控制将减小系统的电磁功率,即阶段 2。

DFIG 附加下垂控制、MPPT 控制的等效单机无穷大系统转速和转速差值变化趋势如图 7 所示。



(a)系统转速对比



(b)系统转速差值变化趋势

图 7　下垂控制与 MPPT 控制,系统转速及转速差值的仿真波形图

Fig.7 Simulation waveform of system speed and speed difference between droop control and MPPT

由图 7(a)可知,由于故障期间的系统机械功率大于电磁功率,因此等效单机无穷大系统转速增加,图中阶段 1;由图 7(b)可知,故障清除后的系统功角首摆期间,系统机械功率小于电磁功率,等效单机无穷大系统转速减小,图中阶段 2。与 MPPT 控制相比,由于 DFIG 附加下垂控制提高了故障期间的系统电磁功率,因此,抑制了系统转速增加,且两种控制下的系统转速差值变化量逐渐增大,即图 7(b)中阶段 1;故障清除后的系统功角首摆期间,DFIG 附加下垂控制降低系统电磁功率,抑制了系统转速差值降低,两种控制方式下的系统转速差值变化量逐渐减小,即图 7(b)中阶段 2。

因此,与 MPPT 控制相比,接入送端区域的风电机组附加下垂控制时,有利于抑制加速阶段的扩展两机系统同步机转速差值增加,即减小加速阶段的扩展两机系统同步机转速差值,降低系统暂态能量,但会抑制减速阶段的扩展两机系统同步机转速差值减小,即增加减速阶段的扩展两机系统同步机转速差值,增大系统暂态能量。由于到达系统功角首摆幅值时,相对于 MPPT 控制,DFIG 附加下垂控制仍降低了扩展两机系统的同步机转速差值,减小系统暂态能量,因此,提高了系统的功角首摆稳定,功角首摆幅值降低,如图 8 所示。

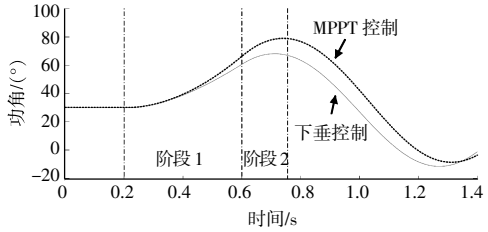


图 8　系统功角曲线对比

Fig.8 System power angle curve comparison diagram

4　结论

本文针对风电机组附加下垂控制影响系统功角首摆稳定性的问题,以扩展两机系统的联络线中间节点发生三相短路故障为例,基于等面积定则建立了系统暂态能量与扩展两机系统同步机转速差值间的联系,通过分析风电机组附加下垂控制对系统电磁功率的影响,建立了风机出力和并网位置等影响参数与风机调频功率分配系数 β' 间的联系,并提出风机下垂控制对扩展两机系统同步机转速差值的影响指标 WDPAS;当系统功角首摆期间 $f_{WDPAS}>0$,即风机调频功率分配系数 β' 大于送端同步机惯性时间常数占系统总惯性时间常数的比例 $\frac{H_1}{H_1+H_2}$ 时,相对于 MPPT 控制,风电机组附加下垂控制将提高系统的电磁功率,从而降低扩展两机系统同步机转速差值,减小系统暂态能量,增强系统功角首摆稳定性。反之,当 $f_{WDPAS}<0$ 时,将降低系统功角首摆稳定性。

在 DIgSILENT/PowerFactory 中搭建仿真模型,对扩展两机系统同步机电磁功率、转速差值及系统功角进行仿真分析,将系统参数导入数据分析软件计算风机调频功率分配系数 β' 并判断指

标 WDPAS 的符号。研究结果表明,本文所提出的 WDPAS 指标合理,可以较好表征由于风电机组附加下垂控制,在三相故障期间和故障清除后,风机出力、并网位置和系统中的惯量分布等参数对系统功角首摆稳定性的影响。

参考文献:

[1] 董雪涛,冯长有,朱子民,等.新型电力系统仿真工具研究初探[J].电力系统自动化,2022,46(10):53-63.

[2] 刘钊汛,秦亮,杨诗琦,等.面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述 [J]. 电网技术,2023,47(1):1-16.

[3] 文云峰,杨伟峰,林晓煌.低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(9):211-222.

[4] 李艳生,蔺红.储能系统协同常规机组调峰控制策略研究[J].可再生能源,2021,39(4):507-513.

[5] J Kim,E Muljadi,V Gevorgian,et al.Dynamic capabilities of an energy storage-embedded DFIG system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55 (4):4124-4134.

[6] 和鹏,吴兴扬,何廷一,等.风电参与电网频率调控潜力的价值评估研究[J].可再生能源,2023,41(7):986-994.

[7] David N,Prevost T,Xavier F,et al.Model-based control addition to prescribe DFIG wind turbine fast frequency response[J].Wind Energy,2019,22(10):1343-1355.

[8] 周双喜,鲁宗相.风力发电与电力系统[M].北京:中国电力出版社,2011.

[9] Gonzalez Torres J C,Damm G,Costan V,et al.Transient stability of power systems with embedded VSC-HVDC links: stability margins analysis and control [J].IET Generation Transmission & Distribution,2020,14(17):3377-3388.

[10] Gonzalez-Torres J C,Damm G,Costan V,et al.A novel distributed supplementary control of multi -terminal VSC-HVDC grids for rotor angle stability enhancement of AC/DC systems [J].IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(1):623-634.

[11] 袁小明,张美清,迟永宁,等.电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J].中国电机工程学报,2022,42(5):1904-1917.

[12] Kerdphol T,Watanabe M,Hongesombut K,et al.Self-adaptive virtual inertia control -based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration[J].IEEE Access,2019,7:76071-76083.

[13] 高晖胜,辛焕海,黄林彬,等.新能源电力系统的共模频率分析及其特征量化[J].中国电机工程学报,2021,41(3):890-900.

[14] 张雪娟,束洪春,孙士云,等.双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):18-29.

[15] 陈汉杰,罗毅,张磊,等.双馈风机虚拟惯量控制对电力系统暂态稳定的影响 [J]. 现代电力,2018,35(4):66-71.

[16] 王科,秦文萍,张宇,等.双馈风机等效惯量控制比例系数对系统功角首摆稳定的影响机理分析[J].电工技术学报,2023,38(3):741-753.

[17] Munkhchuluun E,Meegahapola L,Vahidnia A.The large disturbance rotor angle stability with dfig wind farms[A].2019 9th International Conference on Power and Energy Systems[C].Perth:ICPES,2019.1-6.

[18] Cheema K M,Milyani A H,El Sherbeeny A M,et al.Modification in active power -frequency loop of virtual synchronous generator to improve the transient stability [J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,128(6):1-9.

[19] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述 [J]. 电网技术,2020,44(8):2998-3007.

[20] 张琛,蔡旭,李征.具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):476-486.

[21] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3832-3842.

[22] 汪小明,刘涤尘,吴军,等.基于能量函数法的电网暂态稳定性分析[J].电网技术,2011,35(8):114-118.

[23] 滕林,刘万顺,贠志皓,等.电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):64-69.

[24] 穆刚,安军.电力系统分析[M].北京:机械工业出版社,2020.

[25] 李战龙,王祥君,王海云,等.基于直流风电机组的风电全直流输电系统综述 [J]. 电测与仪表,2022,59(12):14-24.

Mechanism analysis of effect of droop control of wind turbine on stability of first swing of power angle

Liu Hongbo[1], Ren Yang[1], Shi Peng[2], Wang Xi[2], Sun Li[1]

(1.Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2.Electric Power Research Institute of Sichuan Power Company of State Grid Corporation of China, Chengdu 610000, China)

Abstract: With the large-scale access of wind turbines with frequency regulation functions to the power system, the influence of frequency regulation control on the transient power angle stability of the system is increasingly prominent. In this paper, an extended two-machine system with a wind turbine connected to the sending end area and a three-phase short-circuit fault at the intermediate node of the tie line is taken as the research background. Aiming at the influence mechanism of the droop control of the wind turbine on the stability of the first swing of the power angle of the system, firstly, based on the equal area rule, the relationship between the speed difference of the synchronous machine and the transient energy of the system is established, and the WDPAS index, including the influence factors such as the output of the wind turbine, the grid-connected position, and the inertia distribution of the system, is proposed to analyze the influence of the droop control of the wind turbine on the speed difference of the synchronous machine. Then, based on the system state of the maximum power point tracking (MPPT) control of the wind turbine, the dynamic changes of the system transient energy during the fault and after the fault clearance are studied. Finally, the first swing stability of the system power angle is evaluated by the maximum offset of the system power angle first pendulum, and an extended two-machine system simulation model is built in the DIgSILENT/PowerFactory simulation software to verify the rationality of the index and the correctness of the conclusion.

Keywords: wind turbine; droop control; the first swing stability of system power angle; synchronous machine speed difference; transient energy