

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240426

弱电网下 VSG-DFIG 暂态功角稳定性分析及优化策略

张澳¹, 王鑫达², 张学广¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

摘要: 电压源型双馈风电机组通过采用虚拟同步机控制这种典型的构网型控制方式, 可以为电网提供一定的阻尼与惯性, 而在电网发生电压跌落故障时, 其可能会出现与同步机相似的功角稳定问题。首先, 借助等面积定则分析电网电压发生三相对称跌落时, 网侧转差功率与变功率给定值对暂态功角稳定性的影响。同时为使变功率给定控制策略在暂态期间适应网侧变流器动态变化, 提出了一种基于暂态功角前馈的虚拟同步机控制双馈风电机组稳定性优化方法。将功角偏差量通过前馈的方式补偿暂态过程中虚拟同步机的不平衡转矩, 加速功角越过暂态期间平衡点后的减速过程。通过暂态功角曲线的加减速面积确定前馈系数的选取范围, 在保证功角收敛的情况下维持电压源型控制穿越故障。最后, 通过仿真与硬件在环实验平台验证上述理论分析的正确性及优化方法的有效性。

关键词: 电压源型控制; 双馈风电机组; 虚拟同步机控制; 等面积定则; 暂态功角前馈

Transient power angle stability analysis and optimization strategy of a VSG-DFIG in a weak power grid

ZHANG Ao¹, WANG Xinda², ZHANG Xueguang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China)

Abstract: The voltage-source doubly-fed induction generator (DFIG), controlled by the typical grid-forming control method of a virtual synchronous generator (VSG), can provide damping and inertia to the power grid. However, during voltage dip faults, they may encounter similar power angle stability issues to those experienced by synchronous machines. First, the impact of grid-side converter power and variable power reference on transient power angle stability using the equal-area criterion when the grid voltage experiences a three-phase symmetrical voltage dip are analyzed. To adapt the variable power reference control strategy to the dynamic changes of the grid-side converter during the transient period, a stability optimization method for a VSG-controlled DFIG (VSG-DFIG) based on transient power angle feedforward is proposed. The method compensates for the imbalance torque of the VSG by feeding forward the power angle deviation, thus accelerating the deceleration process after the power angle passes the equilibrium point during the transient period. The selection range of the feedforward coefficient is determined by the acceleration and deceleration areas of the transient power angle curve, ensuring that the power angle converges while maintaining the fault ride-through capability of the voltage-source control. Finally, the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the optimization method are verified through simulation and a hardware-in-the-loop experimental platform.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977046).

Key words: voltage-source control; doubly-fed induction generator; virtual synchronous generator control; equal area criterion; transient power angle feedforward

0 引言

随着电网中风电等分布式电源的占比逐渐上升,

电力系统电力电子化程度逐渐提高^[1-2]。传统电流源型控制双馈风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)无法提供灵活动态调压、调频特性, 而电压源型控制方式由于能够主动支撑电压、频率, 因此相比于电流源型控制方式能够在一定程度上提升系

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977046)

统惯性^[3-4]。虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制这一电压源型控制结构,通过模拟同步机的动态特性^[5-7],在控制系统中引入有功摇摆方程和无功下垂方程^[8],使设备具有与同步机相似的调压、调频能力,通过调整功率外环惯性、阻尼系数改变DFIG机组对外接口特性^[9-10]。

VSG控制的稳态性能优势明显,但在暂态过程中可能出现与同步机相似的功角稳定问题^[11-13]。文献[14]从暂态特性的角度比较了功率和转矩控制两种方法,定量分析了VSG电压暂态过程对其暂态功角稳定性的影响。文献[15]从虚拟同步强阻尼特性的角度分析虚拟功角饱和曲线与非饱和曲线之间的转变原理,基于VSG功角强时变特性分析得到暂态功角稳定判据。文献[16]采用等面积判据分析VSG暂态功角稳定性,利用VSG控制环参数灵活调控的特点,提出电网低压暂态过程中抑制功角失稳的改进控制方法,同时可抑制短路电流。

以上文献研究了虚拟同步变流器的暂态功角问题,而DFIG的暂态功角研究集中于风电场接入对电力系统功角稳定的影响^[17-18],针对虚拟同步机控制的双馈风电机组(VSG controlled DFIG, VSG-DFIG)自身的功角稳定性研究较少。文献[19]基于等面积定则分析了双馈风机接入对系统暂态功角稳定性的影响,得到双馈风电机组的功率特性相比于火电厂对系统暂态功角稳定性具有正向作用的结论。文献[20]在分析DFIG输出功率对系统暂态稳定性影响方式的基础上,利用节点注入功率方程推导各同步机电磁功率的改变量,分析风电场对同步机之间互同步性和系统暂态功角稳定性的影响。

VSG控制通过在功率外环引入惯性和阻尼,提高了稳态运行时抗扰动能力,使并网发电设备能够获得更大可控的调节裕度^[21]。但惯性环节的滞后作用使得VSG-DFIG的暂态响应速度变慢,不利于暂态电流的抑制。当电网发生电压对称跌落时,VSG-DFIG不仅对电力系统暂态功角特性有一定负面影响,其自身也可能出现功角失稳现象^[22],相比于电流源型控制更难实现低压穿越,完全依靠电压源型控制策略很难达到故障穿越的并网标准。因此针对电网跌落程度较深的情况,一般考虑通过投切硬件保护、电压源型-电流源型模式切换等方式来实现故障穿越^[23]。电网发生故障位置的不同会对机组处的电压跌落程度有影响。当电网短路故障出现的位置与双馈机组相隔较远时,机组处的电压跌落程度较小^[24]。此时DFIG机组仍有能力继续保持在电压源型控制模式,不过此时机组可能会出现暂态功角稳定问题,需要通过对VSG控制结构进行调整以改善

其暂态稳定性。

综上,本文重点研究电网电压三相接地短路故障的位置较远时,VSG-DFIG自身的机电暂态时间尺度功角稳定性问题,利用等面积定则论证变功率给定控制策略对DFIG暂态功角稳定裕度的影响。针对恒变功率给定值的局限性,研究基于暂态功角前馈的VSG-DFIG稳定性优化策略,通过计及转差功率的暂态功角平衡点计算,确定前馈系数取值范围。对越过暂态稳定平衡点后虚拟不平衡转矩进行动态补偿,使VSG-DFIG在维持电压源型控制的基础上穿越故障。最后通过仿真与硬件在环实验平台对上述分析及改进控制方法进行验证。

1 VSG-DFIG 拓扑与控制方法

双馈风电系统接线图如图1所示。图1中: U_g 为电网电压; U_s 为DFIG机端电压; X_g 为线路电抗。DFIG并网系统传输有功功率 P_c 与无功功率 Q_c 的表达式分别如式(1)、式(2)所示,其中 δ 为系统的虚拟功角。

$$P_c = \frac{U_s U_g \sin \delta}{X_g} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{U_g (U_g - U_s \cos \delta)}{X_g} \quad (2)$$

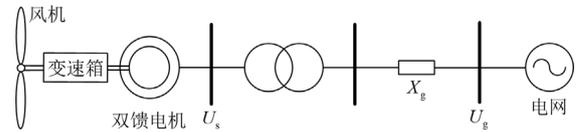


图1 双馈风电系统接线图

Fig. 1 Topology diagram of doubly-fed wind power system

风机捕获风能拖动DFIG转子旋转,定子直接并网,转子通过背靠背变流器接入电网,系统结构框图如图2所示。

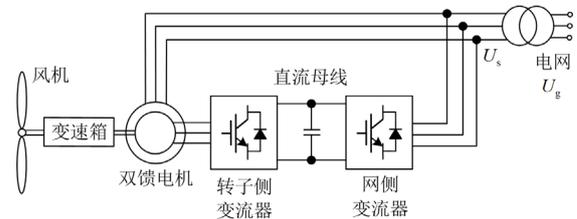


图2 DFIG系统结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of DFIG system

DFIG的不同控制策略可以通过改变转子侧变流器的控制方法来实现。VSG功率外环控制输出跟踪给定,得到并网同步角度和电压幅值,内环依据

功率环输出控制定子电压、转子电流, 其控制结构框图如图 3 所示。控制器分为 VSG 功率环和电压电流双闭环两部分, 其中: P_s 、 Q_s 和 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为定子侧输出有功功率、无功功率及其参考值; ω 为 VSG 输出角频率; ω_2 为转差角频率; ω_n 为额定同步角频率; θ 为 VSG 输出角度; U 为输出电压幅值; U_n 为输出电压基值; E 为 VSG 内电势幅值; k_{pu} 、 k_{iu} 与 k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电压环与电流环的 PI 控制参数; 下标 r 代表转子侧, s 代表定子侧; ref 代表给定值。

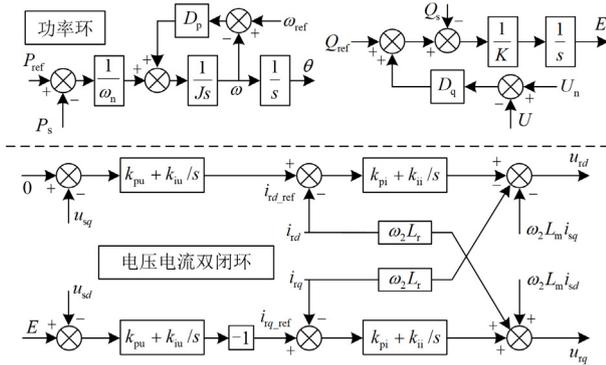


图 3 VSG 控制结构框图

Fig. 3 Structure block diagram of VSG control

功率环模拟同步机机械方程以提供惯性和阻尼, 控制方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = D_p (\omega_n - \omega) + \frac{1}{\omega_n} (P_{ref} - P_s) \quad (3)$$

$$K \frac{dE}{dt} = Q_{ref} - Q_s + D_q (U_n - U) \quad (4)$$

式中: D_p 为有功-频率下垂系数; D_q 为无功-电压下垂系数; J 为虚拟转动惯量; K 为惯性系数。

2 VSG-DFIG 功角失稳机理分析

由式(1)可知, 稳态时的功角与线路阻抗正相关, 如式(5)所示。

$$\delta = \arcsin \left(\frac{P_c X_g}{U_s U_g} \right) \quad (5)$$

当 VSG-DFIG 工作在额定状态, 即 $P_{ref} = 1$ p.u. 时, 发电机内电势、机端电压与电网电压约为额定电压, 即 E_q 、 U_g 、 U_s 为 1 p.u.。式(5)可简化为

$$\delta = \arcsin(X_g) \quad (6)$$

DFIG 接强电网时, 即短路比 SCR ≥ 10 , 线路阻抗较小, 稳态时 $(U_s U_g / X_g) \geq 10 P_{ref}$, 功角曲线幅值较大。由式(6)可知, 此时稳态工作点功角极小。

加速面积有限, 而减速面积极大, 难以发生功角失稳的情况。而弱电网工况下发生电压跌落故障, 线路功率传输能力大幅降低, VSG-DFIG 硬件设备不易过流, 但仍有可能发生功角失稳的情况。

DFIG 根据转子转速与同步转速的关系可将运行状态分为次同步运行和超同步运行。DFIG 定子输出额定功率时, 由于其运行状态的不同, 网侧变换器输出转差功率不同, 因此并网点处输出功率不仅与电机电磁功率相关, 也与运行状态有关。DFIG 的网侧功率 $P_g = s P_s$, 其中 P_s 为定子输出功率, 稳定运行时转差率满足 $-0.3 \leq s \leq 0.3$ 。此时线路流过功率如式(7)所示, 其中负号代表方向。

$$P_e = -P_g + P_s = \frac{U_s U_g \sin \delta}{X_g} \quad (7)$$

将网侧功率折算到定子侧, 得到 VSG-DFIG 定子输出有功功率与功角的关系, 如式(8)所示。

$$P_s = \frac{U_s U_g \sin \delta}{(1-s) X_g} \quad (8)$$

由式(8)可知, 超同步工况下, 暂态期间 DFIG 网侧变换器输出的转差功率占用了线路的传输容量, 体现在功角关系上可等效为增大了线路电抗。根据式(8)绘制功角曲线, 如图 4 所示。其中曲线 I、II 分别表示故障前、故障中的 VSG-DFIG 功角曲线, A 和 A' 分别为系统的稳定平衡点、不稳定平衡点, 系统故障在 B 点恢复。此时转差功率使得功角曲线的幅值产生变化, 功角曲线从实线变为虚线, 即超同步运行状态下, 网侧变换器输出功率使暂态功角稳定裕度降低, 次同步运行状态反之。

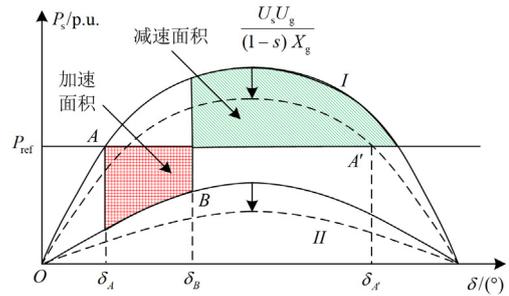


图 4 计及转差功率的 DFIG 功角曲线

Fig. 4 DFIG power angle curve considering the influence of slip power

VSG-DFIG 功角失稳的原理是给定功率和输出功率之差导致 VSG 产生持续的虚拟不平衡转矩, 进而造成 VSG-DFIG 虚拟功角失控、振荡发散。在电网故障期间通常采用降低输出有功功率的方式来避免风电场硬件设备过流, 但在弱电网下仍有可能发

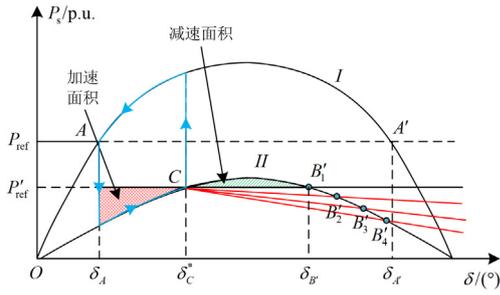


图 7 暂态功角前馈功角曲线

Fig. 7 Power angle curve of transient angle feedforward strategy

由上述分析可知, 为保证暂态期间功角稳定, 前馈系数 K_S 的最小值应满足减速面积不小于变功率给定后的加速面积, 最大值应满足前馈等效有功给定值与暂态功角曲线的不稳定平衡交点位于横轴上方, 即第一摆稳定极限不出现功率倒灌。

由图 7 得采用暂态功角前馈的加、减速面积, 其计算公式为

$$\begin{cases} S_{\text{加}} = \int_{\delta_A}^{\delta_C^*} (P'_{\text{ref}} - A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta) d\delta \\ S_{\text{减}} = \int_{\delta_C^*}^{\delta_B} \{A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta - [K_S \omega_n (\delta - \delta_C^*) + P'_{\text{ref}}]\} d\delta \end{cases} \quad (14)$$

综上所述, 前馈系数 K_S 的最小值可由式(15)确定。

$$\begin{cases} P_s - P'_{\text{ref}} = K_{S_{\text{min}}} \omega_n (\delta - \delta_C^*) \\ P_s = A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta \\ S_{\text{加}} = S_{\text{减}} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $K_{S_{\text{min}}}$ 为功角前馈系数最小值。为简化计算, 将积分结果在理论平衡点 δ_C^* 进行泰勒展开, 略去三阶以上高阶项, 得到 $K_{S_{\text{min}}}$ 的近似表达式, 如式(16)所示。

$$K_{S_{\text{min}}} = \frac{t}{\arcsin\left(\frac{P'_{\text{ref}} - t}{A_m \cdot d_{\text{dip}}^2}\right) - \delta_C^*} \quad (16)$$

其中

$$t = \frac{\delta_C^* - \delta_A}{\pi - 2\delta_C^*} (P'_{\text{ref}} - A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta_A) + P'_{\text{ref}} - A_m \cdot d_{\text{dip}}^2$$

求取前馈系数最大值的边界条件为

$$\begin{cases} P_s - P'_{\text{ref}} = K_S \omega_n (\delta - \delta_C^*) \\ P_s = A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta \\ \delta_C^* \leq \delta \leq \pi \end{cases} \quad (17)$$

得到前馈系数 K_S 的最大值 $K_{S_{\text{max}}}$ 的表达式为

$$K_{S_{\text{max}}} = \frac{P'_{\text{ref}}}{\pi - \delta_C^*} \quad (18)$$

根据以上求取的取值范围选取合适的前馈系数, 配合暂态期间变功率给定, 能够保证 VSG-DFIG 在电网低压暂态时的功角稳定。

定义采用暂态功角前馈补偿不平衡转矩后的虚拟电磁转矩为 G , 其表达式为

$$G = A_m \cdot d_{\text{dip}}^2 \sin \delta + K_S \Delta \delta \quad (19)$$

其中

$$\Delta \delta = \begin{cases} 0 & (\delta \leq \delta_C^*) \\ \delta - \delta_C^* & (\delta > \delta_C^*) \end{cases}$$

由式(19)得到改变虚拟输入转矩时的 G - δ 曲线, 如图 8 所示。通过暂态功角前馈补偿不平衡转矩, 增大减速过程的虚拟电磁转矩, 等效增大了减速面积, 提高了 VSG-DFIG 暂态期间功率输出能力, 增大了功角稳定裕度。并且针对相同的电网故障程度, 不同工况下的网侧变换器输出转差功率不同, 需对匹配的前馈系数取值范围进行相应调整, 以保证 VSG-DFIG 在暂态期间获得最大有功输出能力。

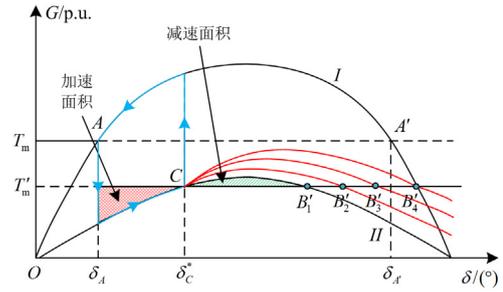


图 8 补偿虚拟电磁转矩-功角曲线图

Fig. 8 Compensation virtual electromagnetic torque-power angle curve

4 仿真与实验分析

对上述 VSG-DFIG 暂态功角特性及优化策略进行仿真验证, 主要参数如表 1、表 2 所示。

4.1 暂态功角前馈控制策略仿真验证

在短路比为 2 的弱电网工况下, DFIG 以额定功率稳定运行。2.5 s 时机组处电网电压分别对称跌落 50% 和 60%, 6 s 时故障恢复。仿真得到虚拟转矩-功角曲线、功角-时间曲线及相平面图仿真结果如图 9 所示。

由图 8 虚拟转矩-功角仿真波形可知, A - B 段为启动阶段, B 为 DFIG 稳定工作点, 对应图 9 中右侧功角相平面图稳态收敛点。2.5 s 时电压跌落, 则故障期间的稳态工作点为红线与功角曲线弧 CE 的

左侧交点 D 。其右侧交点 E 为不稳定平衡点，即暂态功角稳定振荡极限。

在图 9 所示两种情况下的功角曲线中，加速面积均大于减速面积，暂态过程中即使变功率给定，由于 DFIG 网侧变换器输出转差功率，功角也会越过不稳定平衡点 E 后发生失稳。

表 1 仿真主电路参数

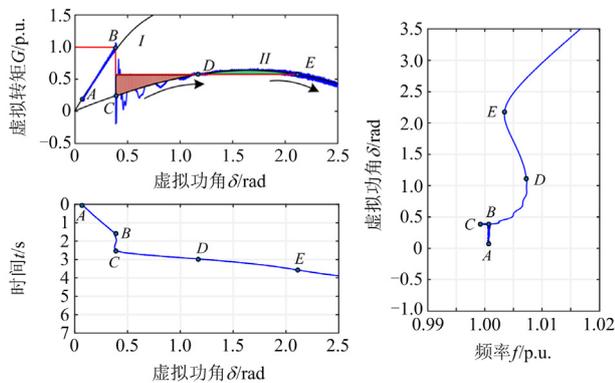
Table 1 Main circuit parameters of simulation

参数	数值
DFIG 额定电压 U_b/V	690
DFIG 基准容量 S_b/MVA	2.6
额定频率 f/Hz	50
转子漏感 $L_r/p.u.$	0.16
定子漏感 $L_s/p.u.$	0.18
转子电阻 $R_r/p.u.$	0.016
定子电阻 $R_s/p.u.$	0.023
励磁电感 $L_m/p.u.$	2.9
直流母线电压 U_{dc}/V	1070
电网电感 $L_g/p.u.$	0.107
电网电阻 $R_g/p.u.$	0.068
电网电容 $C_g/p.u.$	6.67
并网高压母线电压 U_g/kV	40.5
并网变压器变比 n	$40.5 \times 10^3 : 690$
变压器短路电压 $U_T/\%$	6.05

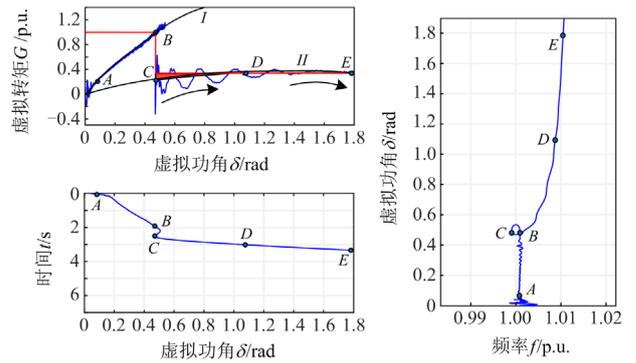
表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters

参数	数值
VSG 惯性时间常数 T_j	0.5
VSG 阻尼常数 D	30
VSG 电压环比例系数 k_{pu}	1.5
VSG 电压环积分系数 k_{iu}	50
VSG 电流环比例系数 k_{pi}	0.05
VSG 电流环积分系数 k_{ii}	10



(a) 电压跌落50%



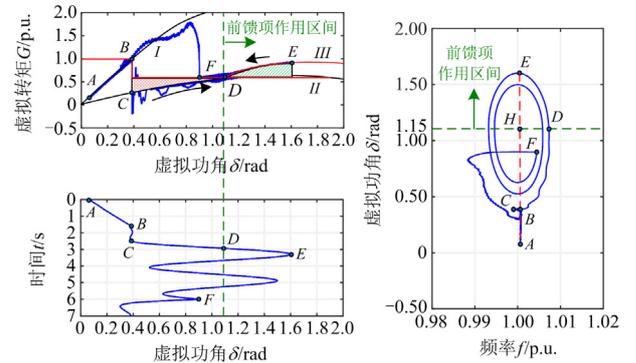
(b) 电压跌落60%

图 9 不采用功角前馈改进策略仿真图

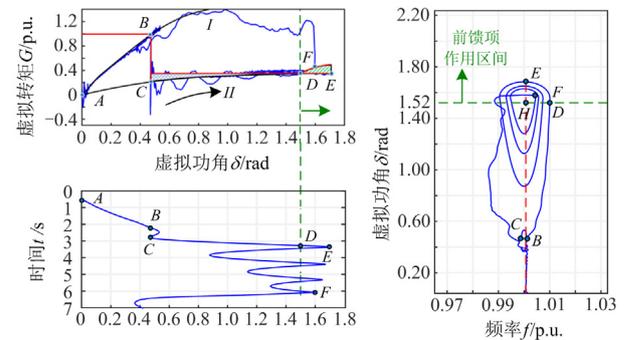
Fig. 9 Simulation diagram without the improved strategy of power angle feedforward

结合稳态工作点的功率给定和稳态功角，计算得到电压跌落 50% 时暂态收敛点 D 功角为 1.15 rad，电压跌落 60% 时功角为 1.52 rad，取前馈系数为 0.5 进行暂态虚拟不平衡转矩补偿。

在相同工况下采用暂态功角前馈策略，得到两种电压跌落深度下虚拟转矩-功角曲线、功角-时间曲线及相平面图，如图 10 所示。



(a) 电压跌落50%



(b) 电压跌落60%

图 10 采用暂态功角前馈策略仿真图

Fig. 10 Simulation diagram using transient power angle feedforward strategy

图 10 中的虚线指示区域即功角越过理论计算收敛点进入减速面积的区域, 依据角度偏差前馈补偿得到新的虚拟电磁转矩计算曲线 *III*。暂态期间虚拟电磁转矩-功角工作点沿新的计算曲线减幅振荡, 功角第一摆峰值点为 *E* 点, 对应右侧相平面图极大值点。暂态过程中对虚拟不平衡转矩施加阻尼使得功角减幅振荡趋于稳定, 相平面图中暂态收敛点为 *H* 点, 即极点 *D*、*E* 所在水平、竖直交点, 与理论计算收敛点相同。6 s 时故障恢复, 相平面图中对应工作点 *F* 处退出功角振荡, 有功给定值按照 20% p.u./s 的速率恢复, 工作点返回功角曲线 *I*。

对比图 8 未采用上述优化策略的 VSG-DFIG 仿真波形, 可知采用暂态功角前馈的方法能够削弱 DFIG 网侧变换器对暂态功角稳定性的负面影响, 有效改善 VSG-DFIG 在电网电压故障时的功角暂态稳定性。

4.2 暂态功角前馈优化策略硬件在环实验验证

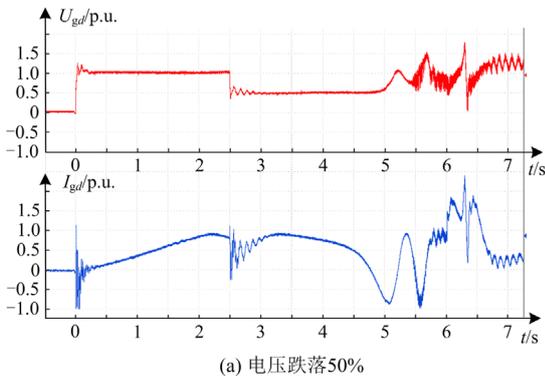
为验证上述暂态优化策略的有效性与正确性, 通过基于 RT-LAB 的硬件在环实验平台搭建 2.6 MW 双馈风机故障穿越实验环境, 实验平台如图 11 所示。电网、双馈风机参数与控制器参数同表 1、表 2。同样在 2.5 s 时机组处电网电压对称跌落 50% 与 60%, 6 s 时跌落故障恢复。



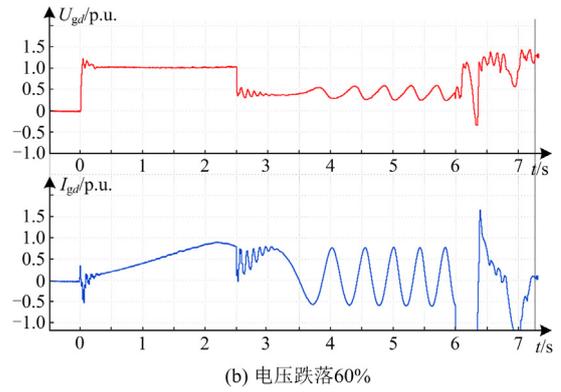
图 11 RT-LAB 硬件在环实验平台

Fig. 11 RT-LAB hardware-in-loop experimental platform

图 12 为考虑网侧变流器时并网点电压电流有效值实验波形, 针对该工况电网电压跌落, 系统出现功角失稳情况, 并网点电压电流发散。在此基础上采用暂态功角前馈优化策略, 波形如图 13 所示。



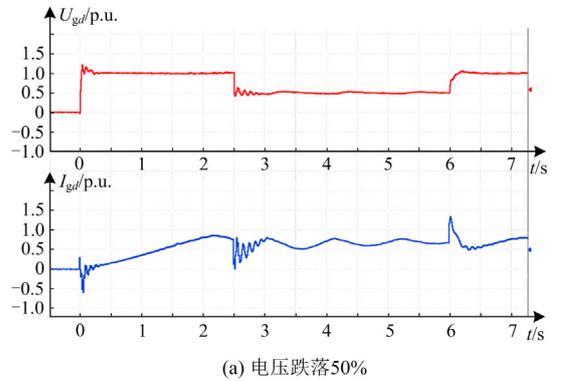
(a) 电压跌落50%



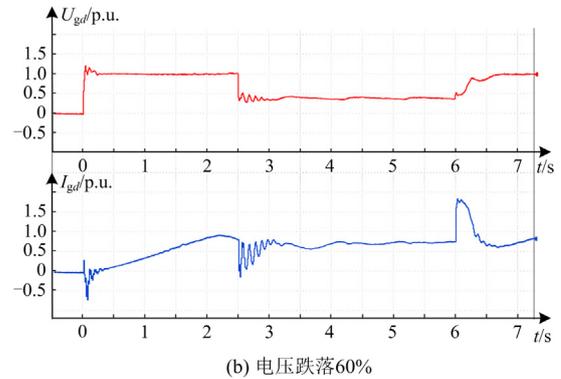
(b) 电压跌落60%

图 12 考虑网侧变流器时并网点电压电流有效值波形

Fig. 12 Waveform of interconnection point voltage and current effective value with grid-side converter



(a) 电压跌落50%



(b) 电压跌落60%

图 13 考虑前馈策略时并网点电压电流有效值波形

Fig. 13 Waveform of interconnection point voltage and current effective value considering feedforward strategy

加入改进控制策略后, 系统功角重回稳定, 重新实现低电压穿越功能。上述实验波形与仿真分析得到的结论相符, 证明了提出的暂态功角前馈优化控制策略的有效性。

5 结论

本文针对 VSG 控制下 DFIG 在电网发生三相接

地短路故障位置较远时可能会出现与同步机类似的暂态功角稳定性问题进行了系统分析,并提出了能够提高暂态稳定性的改进控制策略,主要贡献如下所述。

1) 从网侧变换器与变功率给定值的角度,借助等面积定则分析得出二者对 VSG-DFIG 暂态功角稳定性的影响:增大网侧转差功率会占用线路传输容量,等效为增大线路阻抗,导致功角稳定裕度降低;而恒定的变功率给定值策略在暂态过程中仍存在减速面积较小的问题,仍存在失稳风险。

2) 在变功率给定值策略的基础上提出了一种基于暂态功角前馈的 VSG-DFIG 稳定性优化方法,通过暂态功角前馈补偿不平衡转矩,实现了在保证功角收敛的情况下维持电压源型控制穿越故障。

通过仿真与硬件在环实验平台验证了本文理论分析的正确性及优化方法的有效性,对提高 VSG-DFIG 在电网故障情况下暂态功角稳定性具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 王泽昆,程鹏,贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 118-127.
WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118-127.
- [2] 何瑞,谢振刚,程昱舒. 具有主动故障穿越能力的光伏逆变器自治控制方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 101-110.
HE Rui, XIE Zhengang, CHENG Yushu. Research on autonomous control method of photovoltaic inverter with active fault ride-through capability[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 101-110.
- [3] 徐耀,朱玲,吕振宇,等. 虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 1-11.
XU Yao, ZHU Ling, LÜ Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 1-11.
- [4] 赵晶晶,杜明,刘帅,等. 基于模型预测控制的双馈风电机组调频与转子转速恢复策略[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 11-17.
ZHAO Jingjing, DU Ming, LIU Shuai, et al. Frequency modulation and rotor speed recovery strategy of doubly-fed induction generator based on model predictive control[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 11-17.
- [5] DU Wenjian, DONG Wenkai, WANG Yang, et al. Small-disturbance stability of a wind farm with virtual synchronous generators under the condition of weak grid connection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5500-5511.
- [6] 颜湘武,王德胜,杨琳琳,等. 直驱风机惯量支撑与一次调频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3282-3292.
YAN Xiangwu, WANG Desheng, YANG Linlin, et al. Coordinated control strategy of inertia support and primary frequency regulation of PMSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3282-3292.
- [7] 曹炜,钦焕乘,陆建忠,等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [8] 程雪坤,刘辉,田云峰,等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 518-525.
CHENG Xuekun, LIU Hui, TIAN Yunfeng, et al. Review of transient power angle stability of doubly-fed induction generator with virtual synchronous generator technology integration system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 518-525.
- [9] LIU Yingjun, HAO Mukai, HE Yunpeng, et al. Review and applications of virtual synchronous machines technologies[C]// 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), May 21-24, 2019, Chengdu, China: 593-598.
- [10] 孔昱明,孙丹,年珩. 双馈风电机组系统功率响应特性建模方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 118-125.
KONG Minyue, SUN Dan, NIAN Heng. Modeling method for power response characteristics of DFIG-based wind turbine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 118-125.
- [11] 姜卫同,胡鹏飞,尹瑞,等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 124-133.
JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 124-133.
- [12] GE Pingjuan, XIAO Fan, TU Chunming, et al.

- Comprehensive transient stability enhancement control of a VSG considering power angle stability and fault current limitation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021: 1-10.
- [13] 葛平娟, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向暂态稳定性能提升的 VSG 参数灵活控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2109-2124.
GE Pingjuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement of a VSG based on flexible switching of control parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2109-2124.
- [14] CHEN Meng, ZHOU Dao, BLAABJERG F. Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [15] 孟志伟, 侯玉强, 方勇杰, 等. 强阻尼电压源型虚拟同步发电机大扰动功角稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 44-50.
MENG Zhiwei, HOU Yuqiang, FANG Yongjie, et al. Analysis on large disturbance power-angle stability of strong-damping voltage-source virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 44-50.
- [16] 李清辉, 葛平娟, 肖凡, 等. 基于功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on fault ride-through method of VSG based on power angle and current flexible regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.
- [17] 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.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power system—part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842.
- [18] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399-3405.
YU Qiang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Impact on angle stability of power system with doubly fed induction generators connected to grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3399-3405.
- [19] 盛四清, 俞可, 张文朝, 等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 82-90.
- SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 82-90.
- [20] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999-1005, 1276.
JIANG Huilan, WU Yuzhang, ZHOU Zhaoqing, et al. A method to analyze the transient angle stability of multi-machine system with DFIG-based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 999-1005, 1276.
- [21] 姜静雅, 王玮, 吴学智, 等. 基于自适应无功功率补偿的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2747-2756.
JIANG Jingya, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Power decoupling strategy in virtual synchronous generator based on adaptive reactive power compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2747-2756.
- [22] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [23] 王鑫达, 张澳, 李少林, 等. 电压源型双馈风电机组低压穿越控制策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 21-29.
WANG Xinda, ZHANG Ao, LI Shaolin, et al. Low voltage ride through control strategy of VSG controlled doubly fed wind turbine[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3): 21-29.
- [24] 袁辉, 辛焕海, 王康, 等. 弱电网下远端严重电压跌落时逆变器并网失稳机理分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 38-43, 117.
YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Kang, et al. Instability mechanism analysis of inverters connected to weak grid during severe voltage sag on remote grid side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 38-43, 117.

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-06-29

作者简介:

张 澳(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电变流器控制; E-mail: zhang_aohit@stu.hit.edu.cn

王鑫达(1998—), 男, 硕士, 研究方向为风力发电变流器控制; E-mail: 985607014@qq.com

张学广(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电技术。E-mail: zxghit@126.com

(编辑 姜新丽)