

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240101

双馈风电场有功恢复控制对风火打捆系统首摆稳定性的影响及其改善控制策略

张锋¹, 陈武晖¹, 李柯江¹, 郭小龙², 薛安成³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要:“风火打捆”是当前风电集中外送的重要形式之一,研究风火打捆系统暂态稳定性问题具有重要意义。针对双馈风机在故障清除后电压、电流以及功率的时变特性对风火打捆系统首摆功角稳定性的影响,建立了涵盖双馈风机动态特性的时变阻抗模型。然后应用扩展等面积定则构建了风火打捆系统等值单机无穷大模型。解析了风机有功恢复对暂态功角曲线的六种影响情况。应用等面积定则分析不同情况下有功恢复速率对系统首摆幅值的影响,揭示了不同系统参数下有功恢复速率对首摆稳定性的影响规律。基于上述理论分析,提出了改善首摆稳定性的双馈风机有功恢复控制策略。最后通过仿真实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 扩展等面积定则; 双馈风电场; 风火打捆系统; 有功恢复; 首摆稳定性

Impact of active recovery control on first-swing stability of a wind-fire bundling system in doubly-fed wind farms and its improvement control strategy

ZHANG Feng¹, CHEN Wuhui¹, LI Kejiang¹, GUO Xiaolong², XUE Ancheng³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Grid Xinjiang Control Center for Power Dispatching, Urumqi 830002, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: “Wind-fire bundling” is currently one of the important forms of centralized wind power transmission. Studying the transient stability issues of wind-fire bundling systems is of great significance. This paper establishes a time-varying impedance model that covers the dynamic characteristics of doubly-fed wind turbines to consider the impact of the time-varying characteristics of voltage, current, and power after fault clearance on the first swing angle stability of such bundling systems. By applying the extended equal area criterion, an equivalent single-machine infinite bus model of the wind-fire bundling system is constructed. The analysis reveals six different effects of active power restoration on transient power angle curves of wind turbines. This paper also examines the impact of active power restoration rates on the initial swing amplitude in different scenarios, uncovering the influencing rules of first swing stability with varying active power restoration rates for different system parameters. Based on the theoretical analysis, a control strategy for improving the first swing stability of doubly-fed wind turbines through active power restoration is proposed. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified through simulation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977098).

Key words: extended equal area criterion; doubly-fed wind farms; wind-fire bundled system; active recovery; first swing stability

0 引言

GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977098); 新疆维吾尔自治区重大科技专项资助(2022A01007-1); 新疆电力公司科技项目资助(SGTYHT/21-JS-223)

术规定》中要求: 自故障清除时刻起, 要求风机有功至少以 20%/s 的速率恢复至正常运行值^[1]。而对于风火打捆系统, 风电和火电共用同一输电通道, 风电机组故障后功率恢复速度较宽泛的调节范围影响风火打捆系统的首摆稳定性, 控制故障后风电场有功恢复速度可能改善打捆火电机组的首摆稳定性。以风电与火电打捆为风电主要外送形式的背景

下, 大范围内风机有功恢复速率对首摆稳定影响及面向改善火电首摆稳定性的风电场有功恢复速度的控制策略具有重要意义。

目前, 风机接入下的电力系统暂态稳定性已开展了较多研究^[2]。采用时域仿真法^[3-8], 文献[3-4]提出风机向系统注入无功功率的方式在稳定性方面起到关键作用; 文献[5-6]分析了不同风机型号、容量、渗透率等对转子角稳定性的影响, 提出系统暂态稳定裕度主要受同步机输出功率和临界群(或余下群)的惯量所影响; 文献[7]对比了附加阻尼控制与低电压穿越控制、电压依赖有功功率注入控制策略对暂态稳定性的影响, 结果表明附加阻尼控制具有快速抑制振荡的作用, 对转子角第一摆幅值降低幅度很大; 文献[8]得出对于同一低压馈线上的机组来说, 故障后若有功出力最大的机组暂态失稳, 则其他机组早已暂态失稳; 反之, 有功出力最小的机组暂态稳定, 则其他机组也暂态稳定。

采用直接法^[9-19], 文献[9]推导了双馈风机(double-fed induction generator, DFIG)接入区域系统的惯性中心运动方程, 揭示了 DFIG 以不同方式接入系统时对系统惯性中心功角加速度暂态响应的影响机理; 文献[10]研究了两区域互联系统双馈风机等效惯量控制环节对系统功角首摆稳定的影响机理; 文献[11]提出了含风电电力系统暂态功角稳定的临界等效惯量, 根据暂态临界惯性指数可实现稳定裕度量化分析并给出风险等级; 文献[12]将 DFIG 对外功率特性等效为接地导纳, 应用扩展等面积定则分析了双馈风电场接入多机系统的暂态稳定性; 文献[13]推导了计及惯性控制和外环控制作用的直驱风电场暂态能量函数, 可快速有效地评估系统的暂态稳定性; 文献[14]将 DFIG 等效为压控电流源, 研究了双机系统中 DFIG 参与调频前后对系统暂态功角稳定性的影响; 文献[15-16]将 DFIG 等效为功率注入模型, 采用直流潮流模型构建双机系统等效转子运动方程并求取解析解, 从而判断功角稳定性。文献[17]建立了单端送电系统的电磁功率表达式, 通过负荷接入与风电接入两种接入方式对比分析 DFIG 在故障后对电磁功率的影响; 文献[18]将风机注入电流折算在同步机内节点增加的接地导纳, 基于扩展等面积定则分析了含风电场的单机无穷大系统暂态稳定机理; 文献[19]推导了风火打捆交直流混联外送系统功角方程, 分析了受端分别为无穷大和非无穷大系统时风电比例对暂态稳定性的影响。

故障清除后, 风机有功出力并不是恒定值, 而是以一定斜率连续恢复。为了防止故障冲击造成暂态过电压、过电流和电力电子设备过热等问题, 在

不违反规定的情况下, 往往通过设置有功恢复速率使其缓慢恢复至故障前值, 降低变流器中电流值。文献[20]假设 DFIG 在故障恢复过程中电压恒定, 以时变电流源描述 DFIG 有功恢复过程对暂态稳定的影响, 提出了风电并网系统暂态功角第二摆失稳的充要条件, 但是故障恢复过程中 DFIG 的电压电流都是时变的, 假设电压恒定缺乏合理性; 文献[21]将风机有功恢复控制用一恒定负电阻表示, 得出故障清除后, 有功恢复越快, 功角曲线右移和下移越多, 但功角曲线右移会增大减速面积, 而下移会减小减速面积, 衡量减速面积的相对大小存在较大难度; 文献[22]采用风机时变有功模型和直流潮流模型研究了风机有功恢复速率对系统暂态稳定性的影响, 但只用了有功功率来衡量风机动态行为, 未引入无功、电压等其他重要变量, 未能完整建模风机故障恢复过程中的动态行为, 其次, 采用直流潮流方法来简化研究模型对分析结果有较大的影响。

综上所述, DFIG 在故障恢复过程中电压、电流以及功率都是时变的, 上述提出的 DFIG 模型假设了部分变量恒定, 未能准确描述故障恢复过程中 DFIG 影响功角稳定的动态行为; DFIG 电流源模型没有计及风机故障恢复过程中机端电压变化的影响; 恒定负电阻模型无法表征故障切除后风机功率的时变性; 功率源模型只单一地引入有功功率, 没有考虑无功功率和电压的影响。同时, 上述文献均未研究有功恢复速率的整个调节范围及改善 DFIG 首摆稳定性的控制策略。针对这些不足, 本文以时变阻抗描述双馈风机动态行为, 将风机有功、无功、电压时变信息全部引入分析模型, 全范围分析有功恢复速率对首摆稳定性的影响, 提出面向改善首摆稳定的 DFIG 功率恢复控制策略。文章主要包括 4 部分内容: 1) 建立了 DFIG 接入下的风火打捆系统等值单机无穷大模型; 2) 推导了风机有功恢复控制对系统功角曲线的影响; 3) 探讨了不同有功恢复速率下角首摆幅值的变化规律; 4) 针对不同情况提出相应的有功恢复控制策略。最后通过仿真验证了所提理论的正确性。

1 含 DFIG 的风火打捆系统功角特性建模

1.1 双馈风机时变阻抗等值模型

图 1 为风机故障穿越功率输出曲线图, 包含了故障前、故障期间和故障清除后 3 个时间段。假设故障在 t_f 时刻发生, 在 t_c 时刻清除, 故障前风机输出功率为 P_{w0} , 故障期间输出功率为 P_d , 故障清除后, 风机有功功率以斜率 k 逐渐恢复。因此, 故障清除后, 风机功率是动态变化的, 双馈风机等值模

型需要表征动态的变化规律。

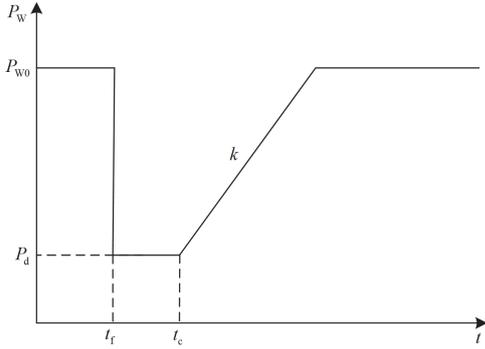


图 1 风机故障穿越功率输出曲线

Fig. 1 Fault ride-through power output curve for wind turbines

已知 DFIG 是异步感应电机, 暂态情况下 DFIG 是以类似非线性功率源的方式, 通过功率的暂态输出特性对系统的暂态稳定性产生影响^[23]。因此引入反映 DFIG 对外功率特性的接地导纳, 其接入改变了系统中的节点导纳, 通过借助接地导纳将风机重要信息(有功、无功、端口电压)引入系统节点导纳矩阵, 分析风机接入对同步机节点等效电气距离的影响, 求取 DFIG 注入功率与其造成的系统节点电压矢量的改变量之间的关系式, 计算出风机作用在同步机上电磁功率的改变量^[12]。因此, 在暂态过程中, 风机可以表示为随着有功、无功和端口电压时变的导纳, 如式(1)所示。

$$y_{dfig} = -g_{dfig} + jb_{dfig} = -\frac{P_{dfig}(t)}{U_{dfig}^2(t)} + j\frac{Q_{dfig}(t)}{U_{dfig}^2(t)} \quad (1)$$

式中: $P_{dfig}(t)$ 和 $Q_{dfig}(t)$ 分别为 DFIG 输出的有功功率和无功功率; $U_{dfig}(t)$ 为 DFIG 端电压; g_{dfig} 为时变电导, 包含了故障恢复过程中有功和电压的变化信息; b_{dfig} 为时变电纳, 包含了故障恢复过程中无功和电压的变化信息。所以式(1)包含了有功、无功以及电压的时变信息, DFIG 的时变自导纳可用来描述风机的动态行为。

1.2 含 DFIG 的风火打捆系统功角特性建模

本节利用 1.1 节的模型进行分析, 着重研究风火打捆系统的暂态功角特性。由于风火打捆系统与火电系统相比, 容量小, 惯量低, 且打捆系统通过长距离传输线路与大系统相连, 稳定性相对较弱, 故在系统受到大扰动后, 根据扩展等面积定则(extended equal area criterion, EEAC)^[12], 可将打捆火电机组划分为受扰严重的机群, 即领先群 S, 其余机群划分为余下群 A。双馈风电场节点定义为 W。双馈风机在领先同步机与余下同步机之间接入电网, 并一同向负荷 Z_F 供电, 具体风火打捆系统拓扑结构如图 2 所示。

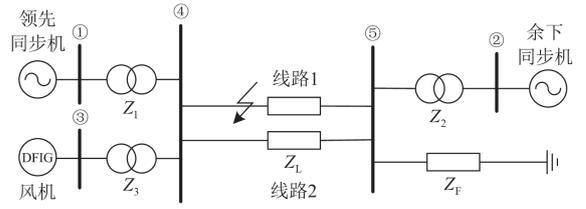


图 2 风火打捆系统拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of wind-fire bundled system

由图 2 得到只包含同步机和风机的 3 节点电压方程, 如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_S \\ \dot{I}_A \\ \dot{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \frac{Y_1 Y_3}{Y_{44}} \\ Y_{21} & Y_{22} & \frac{2Y_L Y_2 Y_3}{Y_{44}(2Y_L + Y_F + Y_2)} \\ \frac{Y_1 Y_3}{Y_{44}} & \frac{2Y_L Y_2 Y_3}{Y_{44}(2Y_L + Y_F + Y_2)} & Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{E}_A \\ \dot{U}_W \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } Y_{11} &= Y_1 + \frac{Y_1^2}{Y_{44}}; \quad Y_{12} = Y_{21} = \frac{2Y_L Y_1 Y_2}{Y_{44}(2Y_L + Y_F + Y_2)}; \\ Y_{22} &= Y_2 - \frac{Y_2^2}{2Y_L + Y_F + Y_2} - \frac{4Y_L^2 Y_2^2}{(2Y_L + Y_F + Y_2)^2 Y_{44}}; \quad Y_{44} = \\ &= -Y_1 - Y_3 - 2Y_L + \frac{4Y_L^2}{2Y_L + Y_F + Y_2}. \end{aligned}$$

式中: \dot{I}_S 、 \dot{I}_A 、 \dot{I}_W 分别为等值 S 机群、等值 A 机群、双馈风电场节点注入电流; Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为领先同步机、余下同步机和风机的等效自导纳; Y_L 为线路导纳; Y_F 为等效负荷导纳; \dot{E}_S 、 \dot{E}_A 、 \dot{U}_W 分别为等值 S 机群、A 机群和双馈风电场节点电压。

在风火打捆系统中, 风电场并入与其打捆的火电集群(即 S 机群), 并通过长距离线路接入系统(即 A 机群), DFIG 与 A 机群的等效电气距离远大于与 S 机群之间的电气距离, 即风机节点 W 到 A 机群内各同步机的等效电抗远大于到 S 机群内各同步机节点的电抗, 故在节点导纳矩阵中可近似满足式(3)。

$$\frac{2Y_L Y_2 Y_3}{Y_{44}(2Y_L + Y_F + Y_2)} \approx 0 \quad (3)$$

则系统的节点电压方程可进一步简化为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_S \\ \dot{I}_A \\ \dot{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \frac{Y_1 Y_3}{Y_{44}} \\ Y_{21} & Y_{22} & 0 \\ \frac{Y_1 Y_3}{Y_{44}} & 0 & Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{E}_A \\ \dot{U}_W \end{bmatrix} \quad (4)$$

进一步将风机节点看作负荷节点, 并修改风机

节点自导纳为 $Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} - \frac{P_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2} + j \frac{Q_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2}$ 。

将式(4)中风机节点进行收缩后求得双同步机系统的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_S \\ \dot{I}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{Y_1^2 Y_3^2}{Y_{44} (Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} - \frac{P_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2} + j \frac{Q_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2})} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{E}_A \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{令} \begin{cases} Y_{11} = G_{11} + jB_{11}, Y_{12} = G_{12} + jB_{12} \\ Y_{21} = G_{21} + jB_{21}, Y_{22} = G_{22} + jB_{22} \end{cases}。$$

故根据扩展等面积定则得到含 DFIG 的风火打捆系统等值单机无穷大模型转子运动方程表达式为

$$M_{SA} \ddot{\delta}_{SA} = \frac{1}{M_T} (P_m^*(t) - (P_c + P_{\max} \sin(\delta_{SA} + \varphi_{SA}) + \Delta P_e)) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} M_{SA} = M_S M_A M_T^{-1}, M_T = \sum_{i=1}^n M_i \\ P_c = M_A E_S^2 G_{11} - M_S E_A^2 G_{22} \\ P_{\max} = \sqrt{[(M_A + M_S) E_S E_A B_{12}]^2 + [(M_A - M_S) E_S E_A G_{12}]^2} \\ \varphi_{SA} = \arctan \left[\frac{(M_A - M_S) G_{12}}{(M_A + M_S) B_{12}} \right] \\ \Delta P_e = -M_A E_S^2 \text{Re} \left[\frac{Y_1^2 Y_3^2}{Y_{44} (Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} - \frac{P_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2} + j \frac{Q_{\text{dfig}}}{U_{\text{dfig}}^2})} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_{SA} 为等值单机无穷大系统惯量; M_T 为系统所有同步机的惯量和; M_A 和 M_S 分别为 A 机群和 S 机群的等值惯量; δ_{SA} 为等值单机系统的功角; $P_m^*(t)$ 为等值机械功率; P_c 为功角曲线的直流偏移量, 与系统参数有关, 一般为恒定值; P_{\max} 和 φ_{SA} 分别为等值同步机电磁功率幅值和相角; n 为风机台数; ΔP_e 为风机接入风火打捆系统后产生的电磁功率分量, 由式(7)可知, 该分量与风机电压、输出功率及系统参数有关, 也可看成功角曲线直流偏移的一部分。

2 含 DFIG 的风火打捆系统首摆稳定性

2.1 风机有功恢复控制对功角曲线的影响

式(6)求出了 DFIG 作用在风火打捆系统的电磁功率分量, 该分量可看成功角曲线直流偏移的一部

分。已知原功角曲线为幅值不变的正弦曲线, 叠加该直流分量后, 功角曲线会产生多种变化, 衍生出多种可能的运行轨迹, 不同运行轨迹对应不同暂态减速面积, 决定了系统的首摆幅值大小和首摆稳定性。接下来进一步探讨故障清除后风机有功恢复控制对系统功角曲线的影响。令:

$$\begin{cases} \frac{Y_1^2 Y_3^2}{Y_{44}^2} = G_{C1} + jB_{C1} \\ Y_3 + \frac{Y_3^2}{Y_{44}} = G_{C2} + jB_{C2} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)后化简得风电作用的电磁功率分量为

$$\Delta P_e = -M_A E_S^2 U_{\text{dfig}}^2 \frac{(U_{\text{dfig}}^2 G_{C2} - P_{\text{dfig}}) G_{C1} + (U_{\text{dfig}}^2 B_{C2} + Q_{\text{dfig}}) B_{C1}}{(U_{\text{dfig}}^2 G_{C2} - P_{\text{dfig}})^2 + (U_{\text{dfig}}^2 B_{C2} + Q_{\text{dfig}})^2} \quad (9)$$

假设系统正常运行时, 单台 DFIG 输出功率为 P_{W0} , 则当风电接入比例为 k_w 时, 风机台数为: $n = k_w P_{\text{ms}0} / P_{W0}$, 其中 $P_{\text{ms}0}$ 为风机未接入时的系统总机械功率。故障前, 不同有功恢复速率下的系统工作点一致, 且故障在同一时刻发生, 在同一时刻清除, 故不同有功恢复速率对应故障期间的系统工况也相等。

故障清除后, 假设 Q_{dfig} 迅速衰减到 0, 风机重新回到单位功率因数运行, 此时风机输出有功功率为随时间连续变化的斜坡函数, 如图 1 所示。故障清除后, 风机输出有功功率 P_f 的表达式为:

$P_f = k_w P_{\text{ms}0} (P_d + P_{W0} \text{ramp}(k, t - t_c))$ 。将上述假设代入式(9)得到故障清除后 ΔP_e 的近似表达式为

$$\Delta P_e = -M_A E_S^2 U_{\text{dfig}}^2 \frac{(U_{\text{dfig}}^2 G_{C2} - P_f) G_{C1} + U_{\text{dfig}}^2 B_{C2} B_{C1}}{(U_{\text{dfig}}^2 G_{C2} - P_f)^2 + U_{\text{dfig}}^4 B_{C2}^2} \quad (10)$$

ΔP_e 对风机输出有功功率 P_f 求偏导得

$$\frac{\partial \Delta P_e}{\partial P_f} = \frac{-M_A E_S^2 U_{\text{dfig}}^2 (G_{C1} P_f^2 - 2A P_f + B)}{(U_{\text{dfig}}^2 G_{C2} - P_f)^2 + U_{\text{dfig}}^4 B_{C2}^2} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} A = (B_{C1} B_{C2} + G_{C1} G_{C2}) U_{\text{dfig}}^2 \\ B = (G_{C2}^2 G_{C1} + 2G_{C2} B_{C2} B_{C1} - B_{C2}^2 G_{C1}) U_{\text{dfig}}^4 \end{cases} \quad (12)$$

令 $\partial \Delta P_e / \partial P_f = 0$, 得

$$P_{g1,2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - G_{C1} B}}{G_{C1}} \quad (13)$$

图 3 为判别式小于 0 情况下的偏导函数图和功

角曲线实际运行轨迹图。由式(11)可知, 偏导函数为关于 P_f 的开口向下的二次函数, 当判别式 $A^2 - G_{Cl}B \leq 0$ 时, 偏导数方程无根或存在单根, 如图 3(a) 所示。原函数 ΔP_e 为关于 P_f 的单调递减函数。故障清除后, ΔP_e 随风机有功功率 P_f 恢复不断减小, 等值单机无穷大系统功角曲线不断向下偏移, 直至风机功率恢复为额定值, 功角曲线实际运行轨迹如图 3(b) 中红色曲线所示。其中 δ_0 为系统正常运行时的工作点对应功角, δ_c 为故障清除时刻对应功角, 曲线 $P_c + \Delta P_{e1}$ 为故障清除后的初始状态, 即风机有功功率保持在故障期间值, 也可等效为有功恢复速率 $k=0$; $P_c + \Delta P_{e2}$ 为功角曲线的最终状态, 即 $P_f = P_n$ 时的情况, 可等效为有功恢复速率 $k=\infty$; P_c 为同步机等值电磁功率; P_n 为故障前的双馈风电场的有功功率。

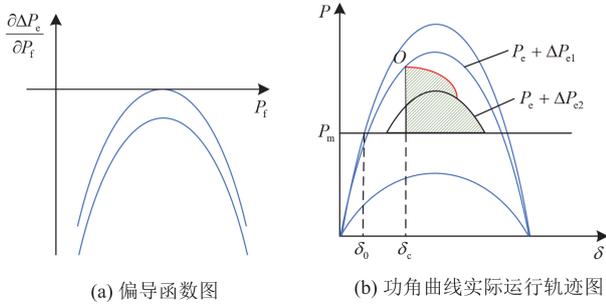


图 3 判别式小于 0 情况下的功角曲线
Fig. 3 Power angle curve in the case of the discriminant is less than zero

当 $A^2 - G_{Cl}B > 0$ 时, 偏导数方程存在两个实根, 原函数 ΔP_e 随着 P_f 的增大先减小, 再增大, 再减小。

由式(12)可知, 线路参数通常为感性, 恒大于 0, 风机端电压也为一恒大于 0 的常数, 故 $A \geq 0$ 恒成立。故由式(13)可得:

1) 当 $B > 0$ 时, 偏导数方程包含两个正实根, 此时存在与风机故障前有功功率 P_n 相关的 3 种情况, 如图 4 所示。图 4 为判别式大于 0 且 $B > 0$ 情况下的偏导数函数曲线图和原函数曲线图。

(a) 当 $P_{n1} < P_{g1}$ 时, 风机故障前有功功率 P_{n1} 小于最小实根, ΔP_e 随着 P_f 的增大单调递减, 这种情况与 $A^2 - G_{Cl}B \leq 0$ 情况相似。即故障清除后, 电磁功率曲线不断向下偏移直至风机有功出力恢复到故障前的值。

(b) 当 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$ 时, 风机故障前有功功率 P_{n2} 在两个实根之间。 ΔP_e 随着 P_f 的增加先减小, 然后再增大, 即故障清除后, 同步机电磁功率曲线先

向下偏移, 再向上移动至风机恢复为额定出力值, 该情况下同步机功角曲线实际运行轨迹如图 5 中红色曲线所示。功角曲线先从 $P_c + \Delta P_{e1}$ 运行到 $P_c + \Delta P_{e2}$ 再运行到 $P_c + \Delta P_{e3}$ 。其中, 初始曲线 $P_c + \Delta P_{e1}$ 和最终状态曲线 $P_c + \Delta P_{e3}$ 含义同上, 曲线 $P_c + \Delta P_{e2}$ 对应 $P_f = P_{g1}$ 时的情况。

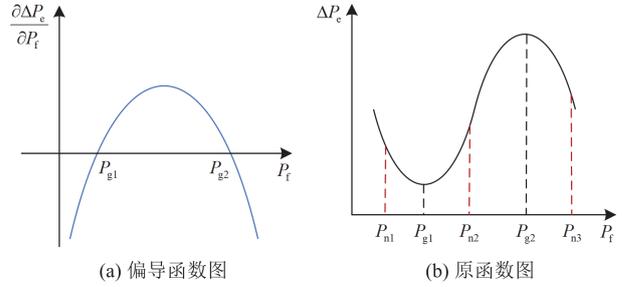


图 4 判别式大于 0 且 $B > 0$ 情况下的函数曲线
Fig. 4 Function curve with discriminant greater than zero and $B > 0$

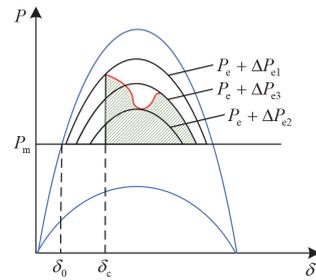


图 5 $B > 0$ 情况下额定功率在两个实根之间的功角曲线
Fig. 5 Power angle curve of rated power between two real roots when $B > 0$

(c) 当 $P_{n3} > P_{g2}$ 时, 风机故障前有功功率大于最大实根。则 ΔP_e 随着 P_f 的增加先减小, 再增大, 然后再减小, 该情况下同步机功角曲线实际运行轨迹如图 6 中红色曲线所示。故障清除后, 随着风机有功功率 P_f 的恢复, 电磁功率曲线将先从 $P_c + \Delta P_{e1}$ 运

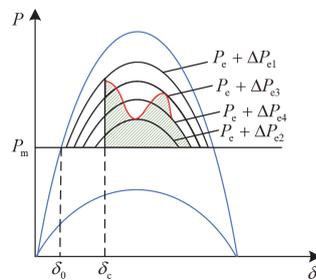


图 6 $B > 0$ 情况下额定功率大于最大实根下的功角曲线
Fig. 6 Power angle curve with rated power greater than the maximum real root when $B > 0$

运行到 $P_c + \Delta P_{e2}$ 再运行到 $P_c + \Delta P_{e3}$, 最后运行到 $P_c + \Delta P_{e4}$, 其中 $P_c + \Delta P_{e2}$ 对应 $P_f = P_{g1}$ 时的情况, $P_c + \Delta P_{e3}$ 对应 $P_f = P_{g2}$ 时的情况。

2) 当 $B < 0$ 时, 偏导数方程存在一个正实根和一个负实根, ΔP_e 曲线向坐标系左半平面偏移, 具体判别式大于 0 且 $B < 0$ 情况下的偏导函数和原函数的曲线如图 7 所示。由于风机出力值 P_f 始终大于等于 0, 故舍弃 $P_f \leq 0$ 的情况, ΔP_e 关于 P_f 先增大后减小, 此时存在与风机故障前有功率 P_n 相关的两种情况。

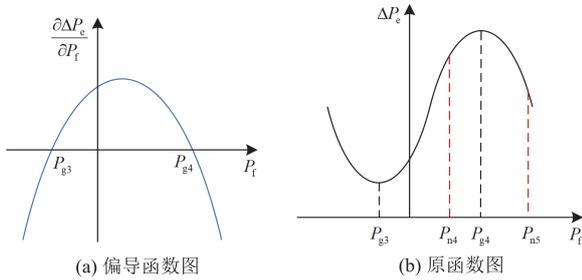


图 7 判别式大于 0 且 $B < 0$ 情况下的函数曲线
Fig. 7 Function curve with discriminant greater than zero and $B < 0$

(a) 当 $0 < P_{n4} < P_{g4}$ 时, 故障清除后, ΔP_e 随着风机出力恢复单调递增, 等值功角曲线不断向上偏移至风机有功恢复为故障前值, 功角曲线实际运行轨迹如图 8 中红色曲线所示。其中曲线 $P_c + \Delta P_{e1}$ 对应风机出力等于故障期间出力值; $P_c + \Delta P_{e2}$ 对应风机出力恢复为故障前出力值。

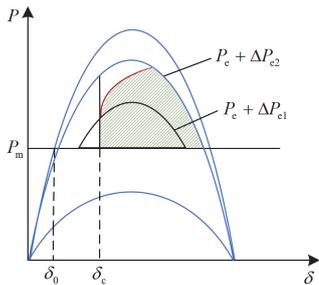


图 8 $B < 0$ 情况下额定功率小于最大实根情况的功角曲线
Fig. 8 Power angle curve for rated power less than the maximum real root when $B < 0$

(b) 当 $P_{n5} > P_{g4}$ 时, 风机故障前有功率大于最大实根。 ΔP_e 关于 P_f 先增大再减小, 功角曲线实际运行轨迹如图 9 中红色曲线所示。故障清除后, 随着风机有功功率 P_f 的恢复, 等值电磁功率曲线先从 $P_c + \Delta P_{e1}$ 运行到 $P_c + \Delta P_{e2}$ 再运行到 $P_c + \Delta P_{e3}$, 其中曲

线 $P_c + \Delta P_{e2}$ 对应 $P_f = P_{g4}$ 时的情况, 其他曲线与前文描述相同。

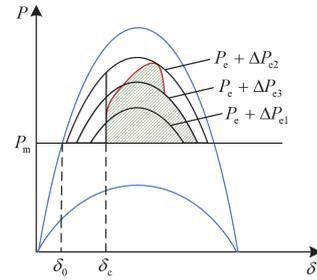


图 9 $B < 0$ 情况下额定功率大于最大实根的功角曲线
Fig. 9 Power angle curve with rated power greater than the maximum real root when $B < 0$

2.2 风机有功恢复速率对首摆稳定性的影响

由 2.1 节分析可得: 当 $A^2 - G_{C1}B \leq 0$ 或 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B > 0 \text{ 且 } P_{n1} < P_{g1})$ 时, ΔP_e 随风机有功功率 P_f 恢复不断减小, 即故障清除后, 电磁功率曲线不断向下偏移直至风机有功出力恢复为故障前值。该情况下同步机功角曲线运行轨迹如图 10 中红色轨线和蓝色轨线所示, 轨线 OA 的有功恢复速率为 k_1 , 轨线 OB 的有功恢复速率为 k_2 , 从图 10 中可明显看出 $k_1 < k_2$, 故障切除后, 在 δ_i 时刻, 轨线 OA 比轨线 OB 多了减速面积 OAB 。表明在这两种情况下, 故障清除后风机有功恢复速率的增加会降低系统首摆稳定性。

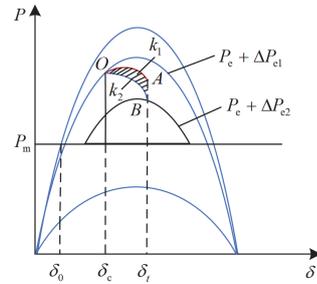


图 10 功角曲线单调递减对比
Fig. 10 Comparison of monotonic decline of power angle curve

当 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B < 0 \text{ 且 } P_{n4} < P_{g4})$ 时, ΔP_e 随风机有功功率 P_f 恢复不断增大, 即故障清除后, 电磁功率曲线不断向上偏移直至风机有功出力恢复为故障前值, 该情况下同步机功角曲线如图 11 中红色轨线和蓝色轨线所示。其中, 红色轨线对应的有功恢复速率要大于蓝色轨线, 相同时间内, 红色轨线对应的减速面积始终大于蓝色轨线对应的减速面积。故此时有功恢复速率越快, 系统首摆稳定性越高。

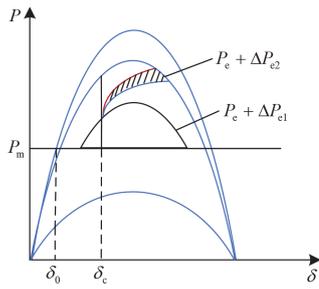


图 11 功角曲线单调递增对比

Fig. 11 Comparison diagram of monotonic increase of power angle curve

而其余 3 种情况 ($B > 0$ 且 $P_{n3} > P_{g2}$; $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$; $B < 0$ 且 $P_{n5} > P_{g4}$) 下, ΔP_e 随风机有功功率 P_f 恢复均为非单调变化, 即故障清除后, 功角曲线轨迹存在多段单调区间, 此时, 风机有功恢复速率不再单调影响系统首摆稳定性, 本文以 $B > 0$ 且 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$ 为例进行说明, 其余情况与该情况分析方法相同, 结论相似。

由上述分析可得, 该情况下, ΔP_e 随着 P_f 的恢复先减小再增大, 即故障清除后, 电磁功率曲线先向下偏移, 再向上移动至风机出力恢复为故障前出力值, 具体功角曲线实际运行轨迹如图 12 所示。图中红色曲线和蓝色曲线为有功恢复速率不同的两条轨线, 其中红色轨线的速率为 k_1 , 蓝色轨线的速率为 k_2 , 显然 $k_1 > k_2$, 两条轨线相交于 O 点, δ_1 为 O 点对应的功角, δ_2 为蓝色轨线与曲线 $P_c + \Delta P_{e3}$ 的交点。 O 点之前, 蓝色轨线幅值始终大于红色轨线, 对应减速面积相差 S_{B1} , O 点之后, 蓝色轨线幅值始终小于等于红色轨线, 对应减速面积相差 S_{B2} , 即 O 点前慢恢复速率轨线的幅值高, O 点之后快恢复速率轨线幅值高。由功角首摆稳定性理论可知, 故障清除后, 当暂态减速面积等于暂态加速面积时, 功角首摆结束, 进入第二摆。当功角加速面积 S_{A1} 小于 O 点前蓝色轨线所对应的最大减速面积时, 功角首摆将在 O 点前的某一 δ_1 对应的时刻结束, 此时, 蓝色轨线的减速面积大于红色轨线, 所对应的首摆幅值必定小于红色轨线, 即此时两条轨线中有功恢复速率较慢的一条首摆稳定性更高。

当暂态加速面积 S_{A1} 大于 O 点前蓝色轨线所对应的减速面积时, 功角首摆将在 O 点之后的某一 δ 对应的时刻结束。假设 $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$, 此时红色轨线幅值要大于蓝色轨线, 对应的减速面积也更大。当 $S_{B1} > S_{B2}$ 时, 表明蓝色轨线对应的减速面积在任意

时刻都大于红色轨线, 故此时两条不同速率的轨线中仍是有功恢复速率较慢的一条首摆稳定性更高。

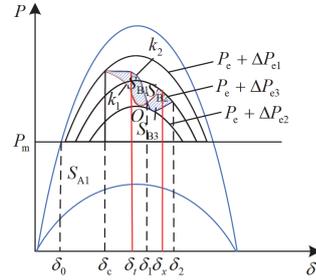


图 12 $B > 0$ 情况下额定功率在两个实根之间的不同恢复速率功角曲线对比

Fig. 12 Comparison diagram of power angle curves at different recovery rates between two real roots with rated power when $B > 0$

当 $S_{B1} < S_{B2}$ 时, 在 δ_1 和 δ_2 之间存在某一 δ_x , 使其满足 $S_{B1} = S_{B3}$, 此时蓝色轨线和红色轨线减速面积相同, 故二者的首摆幅值相同; 在 (δ_1, δ_x) 区间, 满足 $S_{B1} > S_{B3}$, 故此时慢恢复速率轨线对应的首摆幅值更小, 首摆稳定性更高; 在 (δ_x, δ_2) 区间, 满足 $S_{B1} < S_{B3}$, 故此时快恢复速率轨线对应的首摆幅值更小, 首摆稳定性更高。

当 $\delta > \delta_2$ 时, 两条轨迹运行在同一条功角曲线上, 故系统首摆幅值仍取决于 S_{B1} 和 S_{B2} 的大小, $S_{B1} > S_{B2}$ 时, 有功恢复速率较慢的轨线对应的首摆稳定性更高; $S_{B1} = S_{B2}$ 时, 两条有功恢复速率不同的轨线首摆幅值相等; $S_{B1} < S_{B2}$ 时, 有功恢复速率较快的轨线对应的首摆稳定性更高。

因此, 在 $B > 0$ 且 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$ 情况下, 比较有功恢复速率不同的轨线时, 有功恢复速率越慢, O 点前对应减速面积越大, 首摆在 O 点前结束的可能性越大, 此时, 首摆幅值将随着有功恢复速率的增加而单调增大。而随着有功恢复速率继续增大, O 点前对应的减速面积不足以抵消暂态加速面积, 首摆将在 O 点后结束, 有功恢复速率将可能不再单调影响首摆幅值, 而存在多种变化情况。总之, 随着有功恢复速率的增加, 系统首摆幅值先单调增大, 随后单调性可能发生改变。在 $B > 0$ 且 $P_{n3} > P_{g2}$ 情况下结论与该情况相同; 同理得: 在 $B < 0$ 且 $P_{n5} > P_{g4}$ 情况下, 系统首摆幅值将随着有功恢复速率的增加先减小, 随后单调性可能发生改变。

3 改善风火打捆系统首摆稳定性的 DFIG 有功恢复控制策略

基于前文分析的故障清除后风机有功恢复控制对风火打捆系统首摆稳定性作用机理。本节提出了相应的提高首摆稳定性的有功恢复控制改进策略。已知在风机有功功率恢复过程中, 由图 4(b)得, 风机作用的电磁功率分量 ΔP_e 存在一个先单调递减, 再递增, 再递减的过程, 该波动过程叠加在原功角曲线上会引起功角曲线运行轨迹的变化, 不同单调区间内有功恢复速率的影响并不相同。在单调递减区间, 风机有功恢复速率越慢, 系统暂态减速面积越大, 越利于首摆稳定。反之, 在单调递增区间, 有功恢复速率越快, 越有利于首摆稳定。

图 13 为风机故障全过程功率曲线。当 t_c 时刻切除故障后, 风机有功功率开始逐渐恢复。传统的有功恢复控制通常将恢复速率设定为一固定值 k_0 , 总恢复时间为 Δt , 满足式: $k_0 = (P_{w0} - P_d) / \Delta t$, 但恒定速率并不适应于各种首摆稳定情况。

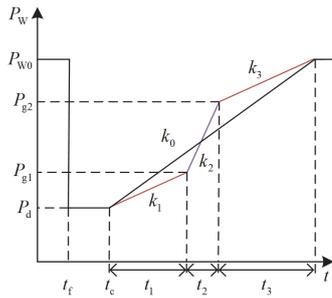


图 13 风机故障全过程功率曲线

Fig. 13 Power curve of the whole process of wind turbine failure

图 13 中 P_{g1} 和 P_{g2} 为图 4(b)中的两个极值点。为了改善首摆稳定性, 本节在前文分析的基础上将 ΔP_e 有功恢复过程分为 3 个阶段, 分别为: (P_d, P_{g1}) 、 (P_{g1}, P_{g2}) 、 (P_{g2}, P_{w0}) , 各阶段的有功恢复速率分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 , 时间间隔分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 。根据图 4 可知, 由于第一阶段和第三阶段都是递减区间, 所以令 $k_1 = k_3$ 。控制策略的总体思路为: 在保证总的恢复时间 Δt 不变的情况下, 降低递减区间的有功恢复速率 k_1 、 k_3 , 并提高递增区间的有功恢复速率 k_2 , 即满足: $k_1 = k_3 < k_0 < k_2$, 以此来增大系统暂态减速面积, 减小首摆幅值从而提高系统的首摆稳定性, 具体改善首摆稳定性的风机有功恢复控制策略如图 14 所示。详细过程说明如下。

控制策略 1: 当系统控制参数满足 $A^2 - G_{C1}B \leq$

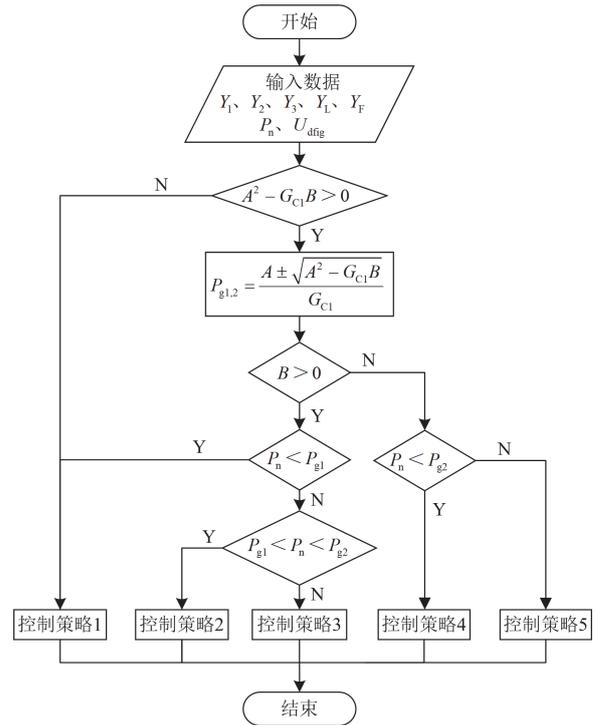


图 14 风机有功恢复控制策略

Fig. 14 Wind turbine active recovery control strategy

0 或 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B > 0$ 且 $P_{n1} < P_{g1})$ 时, 此时有功恢复速率越慢, 越有利于首摆稳定, 同时根据并网导则规定需满足恢复速率大于 20%/s, 因此该情况下以并网导则规定的最小有功恢复速率 $k = 20\%/s$ 作为 DFIG 有功恢复速率, 同时满足低电压穿越策略要求。

控制策略 2: 当系统控制参数满足 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B > 0$ 且 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2})$ 时, 有功恢复过程包含两个阶段, 分别为递减阶段 (P_d, P_{g1}) 和递增阶段 (P_{g1}, P_{w0}) 。令 $\Delta P_1 = P_{g1} - P_d$, $\Delta P_2 = P_{w0} - P_{g1}$ 。则原控制下两阶段的时间比为: $t_1 : t_2 = \Delta P_1 : \Delta P_2$, 在保证总恢复时间 t 一定的前提下, 当增大 t_1 、减小 t_2 时, 即可减小阶段 1 的恢复速率, 增大阶段 2 的恢复速率。本文令 $t'_1 = t_1 + t_2 / 2$, $t'_2 = t_2 / 2$, 有功恢复速率整定为

$$\begin{cases} k_1 = \Delta P_1 / t'_1 \\ k_2 = \Delta P_2 / t'_2 \end{cases} \quad (14)$$

此时满足: $k_1 < k_0 < k_2$ 。若计算得 $k_1 < 20\%/s$, 则令 $k_1 = 20\%/s$, 并重新计算 k_2 。

控制策略 3: 当系统控制参数满足 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B > 0$ 且 $P_{n3} > P_{g2})$ 时, 有功恢复速率包含 3 个阶段。令

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P_{g1} - P_d \\ \Delta P_2 = P_{g2} - P_{g1} \\ \Delta P_3 = P_{w0} - P_{g2} \\ t_1 : t_2 : t_3 = \Delta P_1 : \Delta P_2 : \Delta P_3 \\ t = t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (15)$$

先求出阶段 2 递增区间的时间 t_2 ，然后缩短递增区间时间，本文令 $t'_2 = t_2 / 2$ ，即可增大阶段 2 的恢复速率，得： $k_2 = \Delta P_2 / t'_2 > k_0$ 。再令：

$$\begin{cases} t'_1 : t'_3 = \Delta P_1 : \Delta P_3 \\ t - \frac{t_2}{2} = t'_1 + t'_3 \end{cases} \quad (16)$$

求出第一、三区间的时间 t'_1 和 t'_3 ，进一步可求得

$$k_1 = k_3 = \frac{\Delta P_1}{t'_1} = \frac{\Delta P_3}{t'_3} \quad (17)$$

此时满足： $k_1 = k_3 < k_0 < k_2$ 。若计算得 $k_1 = k_3 < 20\%/s$ ，则令 $k_1 = k_3 = 20\%/s$ 并重新计算 k_2 。

控制策略 4：当系统控制参数满足 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B < 0 \text{ 且 } P_{n4} < P_{g4})$ 时，此时有功恢复速率越快，越有利于首摆稳定，但直接设置过高的恢复速率有可能引起系统剧烈波动。可将 k 设置为连续增大的一次函数，线性函数可使恢复速率均匀增加，以减小对系统的冲击。

令 $k = mt + b$ ，其中 m 为一次函数斜率， b 为初值。按照并网导则规定将 b 设置为 0.2。在原控制所需时间 Δt 内，将恢复速率均匀增加到 k_0 ，则求得 m 为

$$m = \frac{k_0 - 0.2}{\Delta t} \quad (18)$$

控制策略 5：当系统控制参数满足 $A^2 - G_{C1}B > 0 (B < 0 \text{ 且 } P_{n5} > P_{g4})$ 时，此时包括阶段 2 和阶段 3，令 $\Delta P_2 = P_{g2} - P_d$ ， $\Delta P_3 = P_{w0} - P_{g2}$ ，且 $t_2 : t_3 = \Delta P_2 : \Delta P_3$ ，此时设定 $t'_2 = t_2 / 2$ ， $t'_3 = t_3 + t_2 / 2$ ，即可求出各阶段的恢复速率为

$$\begin{cases} k_2 = \Delta P_2 / t'_2 \\ k_3 = \Delta P_3 / t'_3 \end{cases} \quad (19)$$

此时满足： $k_3 < k < k_2$ 。同样若 $k_3 < 20\%/s$ ，则令 $k_3 = 20\%/s$ ，并重新计算 k_2 。

4 仿真验证

为验证本文所提风机有功恢复控制对系统首摆稳定性影响理论的正确性，在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件上建立如图 2 所示的风火打捆系统

模型。该模型以南网某地区实际系统为例，已知该地区火电装机容量达 98.42 GW，其中有 5400 MW 的火电与 3200 MW 的风电机组形成“风火打捆”系统并以交流送出，模型中 5400 MW 的火电机组等效为领先同步机群，剩余火电机组等效为余下同步机群，风电与火电打捆经双回传输线路送至 230 kV 电网。设置某一回传输线路于 3 s 发生瞬时三相接地短路故障，故障持续 0.1 s，3.1 s 后切除故障线路运行。

4.1 判别式 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B > 0$ 时的 3 类情况验证

设置系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数设定

Table 1 System parameter setting	
参数	数值
Z_1	j1.61
Z_2	j0.10
Z_3	j0.51
Z_4	3.52 + j3.24
Z_5	0.57 + j1.51

将参数值代入式(12)计算得： $A = 362.516$ ， $B = 1285.596$ 。由上文分析可得： $B > 0$ 时，系统可能存在 3 种情况，将 A 和 B 代入式(13)求得此时的偏导数方程根为： $P_{g1} = 1773$ ， $P_{g2} = 8127$ 。

4.1.1 $P_{n1} < P_{g1}$ 情况验证

当改变风机输出功率为 1600 MW 时，满足 $P_{l,max} < P_{g1}$ ，此时，根据理论分析得：故障清除后，同步机功角曲线随着风机有功恢复单调递减。随着有功恢复速率的增加，系统首摆幅值单调增大，首摆稳定性变差。

为验证前文所提风机作用的电磁功率分量 ΔP_e 与同步机功角曲线具有相同的变化趋势，假设有功恢复速率为 1000%/s，保证风机有功恢复过程在 0.1 s 内完成，图 15 给出了该情况下的风机有功功率和端电压曲线。从图 15 中可以看出，在故障恢复过程中，DFIG 的有功功率和电压都是时变的曲线，不能假设电压不变建立 DFIG 分析暂态稳定性。

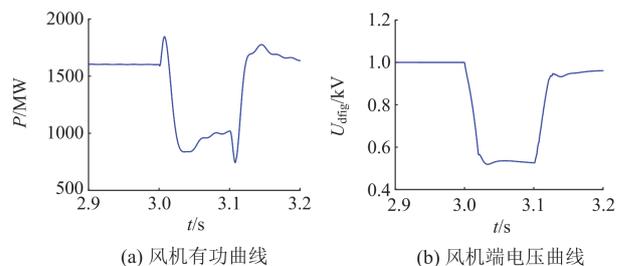


图 15 风机输出曲线

Fig. 15 Wind turbine output curve

将系统参数及图 15 中风机有功功率和端电压曲线在 3.1~3.2 s 间的数值代入式(10)中, 作出风机作用的电磁功率分量 ΔP_e 如图 16(a)所示, 同时取故障清除后 0.1 s 内的同步机电磁功率和功角数值, 作出故障清除后风机有功恢复过程对应的功角曲线如图 16(b)所示。

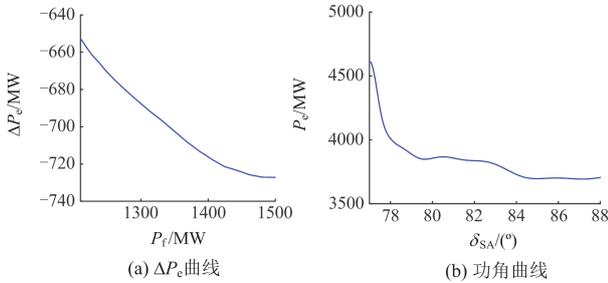


图 16 ΔP_e 和功角曲线单调递减图

Fig. 16 Monotonically decreasing diagram of ΔP_e and the power angle curve

由图 16 可得, 风机有功恢复期间作用下的电磁功率分量同功角曲线变化趋势一致, 验证了 2.1 节中当 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B > 0$ 、 $P_{n1} < P_{g1}$ 时, 风火打捆系统功角曲线随着风电场有功功率恢复单调递减的情况。改变有功恢复速率, 得到同步机首摆曲线如图 17 所示。

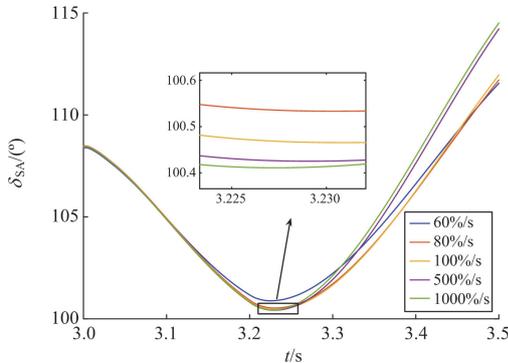


图 17 首摆幅值随着有功恢复速率增加单调增大

Fig. 17 Monotonically increasing diagram of first swing amplitude with increasing active recovery rate

由图 17 可得: 随着有功恢复速率的增加, 功角首摆幅值单调增大, 验证了 2.2 节中所述的第一类情况。从图 17 中还可以看出, 有功恢复速率超过 500%/s 时, 功角首摆幅值几乎相等, 表明此时系统功角曲线实际运行轨迹近乎重合。

4.1.2 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$ 情况验证

改变风电输出功率为 2400 MW, 使其满足 $P_{g1} < P_{f,max} < P_{g2}$, 此时由理论分析可得: 故障清除后, 功角曲线随着风机有功恢复先递减后递增。随

着有功恢复速率的增加, 系统首摆幅值先增大, 而后可能减小。同理作出此时风机作用下的电磁功率分量及对应的同步机功角曲线如图 18 所示。

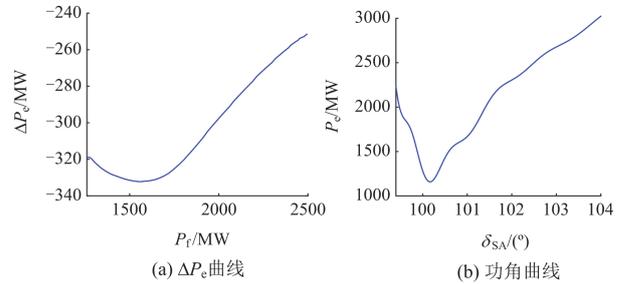


图 18 ΔP_e 和功角曲线先递减再递增

Fig. 18 ΔP_e and power angle curve decreasing and then increasing

由图 18 可得, 风机作用下的电磁功率分量与同步机功角曲线变化趋势一致, 验证了 2.1 节中 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B > 0$ 、 $P_{g1} < P_{n2} < P_{g2}$ 时, 风火打捆系统功角曲线随着风机有功功率的恢复先单调递减, 然后再单调递增的情况。改变有功恢复速率, 得到功角首摆曲线如图 19 所示。

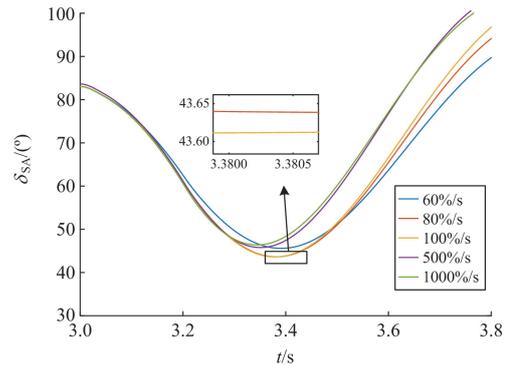


图 19 首摆幅值随有功恢复速率增加先增大后减小

Fig. 19 First swing amplitude increasing and then decreasing with increasing active recovery rate

从图 19 中可以看出: 当风机有功恢复速率低于 100%/s 时, 将单调影响系统首摆幅值, 首摆幅值随着有功恢复速率的增加而增大, 当有功恢复速率超过 100%/s 后, 同步机的首摆幅值随着有功恢复速率的增加而减小, 验证了 2.2 节中所述的第三类情况。

4.1.3 $P_{n3} > P_{g2}$ 情况验证

继续增大风机输出功率为 8400 MW, 使其满足 $P_{f,max} > P_{g2}$, 作出此时风机作用下的电磁功率分量及对应的同步机功角曲线如图 20 所示。二者变化趋势相同, 验证了 2.1 节中当 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B > 0$ 、 $P_{n3} > P_{g2}$ 时, 风火打捆系统功角曲线随着风机有功功率的恢复先单调递减, 再单调递增, 再单调递减

的情况。有功恢复速率的影响结果与 $P_{g1} < P_{f,max} < P_{g2}$ 相同, 仿真结果与图 19 类似, 故本文不再赘述。

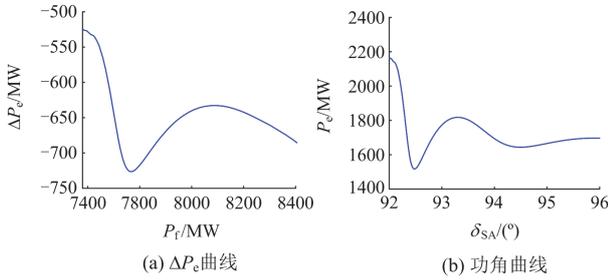


图 20 ΔP_e 和功角曲线先递减再递增再递减

Fig. 20 Decreasing, then increasing, then decreasing of ΔP_e and power angle curve

4.2 判别式 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B < 0$ 时的两类情况验证

修改系统参数如表 2 所示。

表 2 系统参数设定

Table 2 System parameter setting

参数	数值
Z_1	$j0.89$
Z_2	$j0.31$
Z_3	$0.25 + j3.29$
Z_L	$1.21 + j3.67$
Z_F	$0.57 + j1.51$

将参数代入式(12)中计算可得: $A = 2.01$, $B = -443$ 。根据上文分析可得: 当 $B < 0$ 时, 系统可能存在两种情况, 将 A 、 B 代入式(13)求得此时的偏导数方程根为 $P_{g3} = -543$, $P_{g4} = 4458$ 。

4.2.1 $0 < P_{n4} < P_{g4}$ 情况验证

当风电接入 3200 MW 时, 满足风机有功恢复 $P_{f,max} < P_{g4}$, 由前文分析可得, 在该情况下, 故障清除后, 系统功角曲线随着风机有功功率的恢复单调递增, 且风机有功恢复速率越快, 系统首摆幅值越小, 首摆稳定性越高。作出风机作用的电磁功率分量 ΔP_e 及风机有功恢复过程对应的功角曲线如图 21 所示。

由图 21 可得, 风机作用下的电磁功率分量 ΔP_e 与风机有功恢复期间的功角曲线变化趋势一致, 验证了 2.1 节中当 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B < 0$ 、 $0 < P_{n4} < P_{g4}$ 时, 风火打捆系统功角曲线随着风机有功功率的恢复单调递增的情况。通过改变风机有功恢复速率从 60%/s 变化到 1000%/s, 得到同步电机功角首摆曲线如图 22 所示。

由图 22 可知, 该情况下, 系统首摆幅值随着风机有功恢复速率的增加不断降低, 验证了 2.2 节中所述的第二类情况。当有功恢复速率超过 500%/s 后, 首摆幅值趋于相等, 表明随着有功恢复速率的增加, 系统首摆稳定性不断提高。

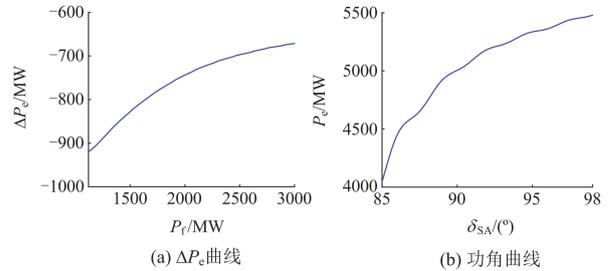


图 21 ΔP_e 和功角曲线单调递增图

Fig. 21 Monotonically increasing diagram of ΔP_e and power angle curve

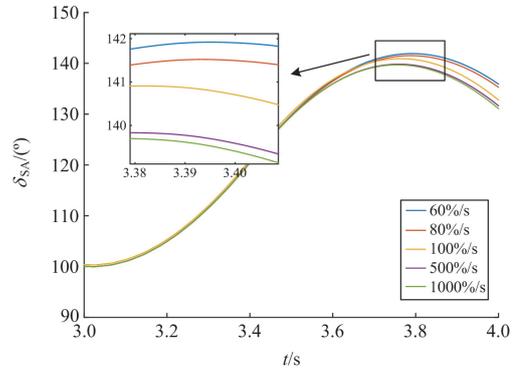


图 22 首摆幅值随有功恢复速率单调递减

Fig. 22 Monotonically decreasing diagram of first swing amplitude with active recovery rate

4.2.2 $P_{n5} > P_{g4}$ 情况验证

将风机发出功率增大为 $P_n = 4800$ MW, 此时满足 $P_{f,max} > P_{g4}$, 由前文分析可知, 在该情况下, 故障清除后, 同步机功角曲线随着风机有功恢复先上升再下降, 首摆幅值随着有功恢复速率的增加先减小, 随后可能增大。作出此时风机作用下的电磁功率分量及故障清除后的功角曲线如图 23 所示。

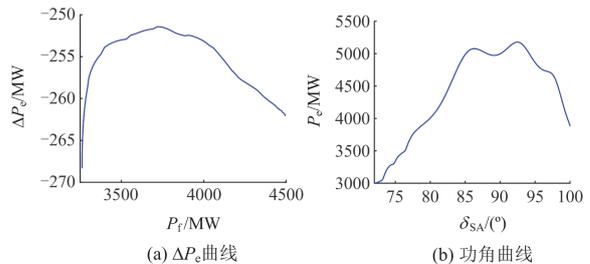


图 23 ΔP_e 和功角曲线先上升后下降

Fig. 23 ΔP_e and power angle curve rising and then falling

由图 23 可知, 风机有功恢复期间作用的电磁功率分量同功角曲线变化趋势一致, 验证了 2.1 节中当 $A^2 - G_{C1}B > 0$ 且 $B < 0$ 、 $P_{n5} > P_{g4}$ 时, 风火打捆系统功角曲线随着风机有功功率的恢复先单调递增, 后单调递减的情况。通过改变风机有功恢复速率从 60%/s 变化到 1000%/s, 得到同步电机功角曲线如图 24 所示。

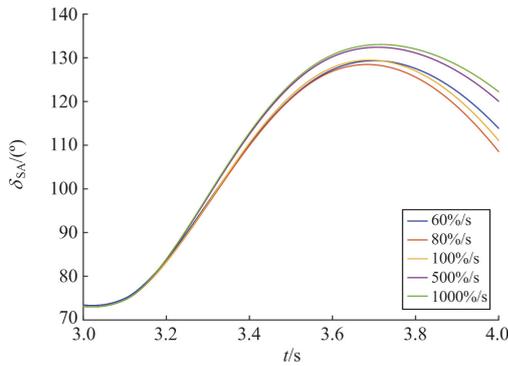


图 24 首摆幅值随有功恢复速率先减再增

Fig. 24 First swing amplitude decreasing and then increasing with the active recovery rate

从图 24 中可以看出: 风机有功恢复速率小于 80%/s 时, 系统首摆幅值随有功恢复速率的增加单调减小, 超过该值后, 首摆幅值随着有功恢复速率的增加开始增大, 超过 500%/s 后, 首摆幅值开始趋于一致。表明系统首摆稳定性随着有功恢复速率的增加先升高然后降低, 与 2.2 节中所述的第三类情况类似。

4.3 系统判别式 $A^2 - G_{C1}B \leq 0$ 情况验证

保持其他参数不变, 仅改变线路电阻 $R_L = 5.2 \Omega$, 将参数代入式(12)和式(13)中得 $A^2 - G_{C1}B < 0$, 故此时偏导数方程无根, 功角曲线单调递减, 且随着有功恢复速率的增加, 系统首摆幅值将不断增大, 实际仿真同图 17 所示, 本文不再赘述。

4.4 有功恢复控制改进策略验证

传统风机有功恢复控制中通常将恢复速率设定为一固定值, 在本文中, 假定原有控制中恢复速率为 100%/s, 则风机从故障切除到恢复为故障前功率需要 1 s, 设定各情况下风机故障期间功率跌落均为 $P_g = 950 \text{ MW}$, 系统仍于 3 s 发生三相短路故障。下面分别对不同控制策略进行验证。

控制策略 1 验证: 保持 4.1.1 节中系统参数不变, 此时有功恢复过程仅包含阶段 1。仿真测得: 当有功恢复速率为 100%/s 时, 系统极限切除时间为 $t_c = 0.161 \text{ s}$ 。如果此时有功恢复速率按照所提控制

策略 1 变为 $k_1 = 20\%/s$, 作出原控制和控制策略 1 的对比如图 25 所示。由图 25 可知, 该情况下将有功恢复速率调整为 20%/s, 避免了转子角首摆失稳, 验证了控制策略 1 的正确性。

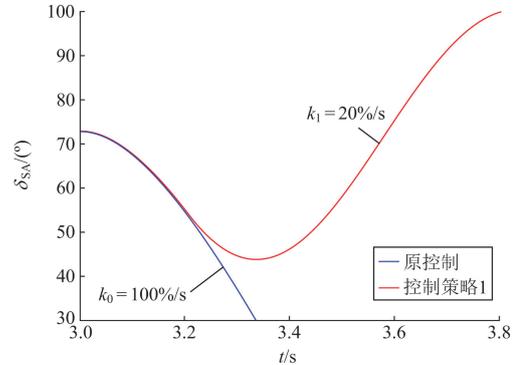


图 25 原控制和控制策略 1 对比图

Fig. 25 Comparison of original control and control strategy 1

控制策略 2 验证: 保持 4.1.2 节中系统参数不变, 经仿真得, 该情况下有功恢复速率为 100%/s 时, 系统极限切除时间为 $t_c = 0.165 \text{ s}$ 。按照控制策略分析可知, 此时包含阶段 1 和阶段 2, 可求得 $\Delta P_1 = 823 \text{ MW}$, $\Delta P_2 = 627 \text{ MW}$, 两阶段时间分别为 $t'_1 = 0.784 \text{ s}$, $t'_2 = 0.216 \text{ s}$, 计算得: $k_1 = 43.73\%/s$, $k_2 = 120.95\%/s$ 。通过改变两段时间内的恢复速率得到控制策略 2 与原控制下的功角首摆曲线对比如图 26 所示。由图 26 可知, 将风机有功恢复过程分为两个阶段, 通过降低阶段 1 的恢复速率和提高阶段 2 的恢复速率可使原控制下的首摆失稳恢复稳定, 有利于系统首摆稳定性。

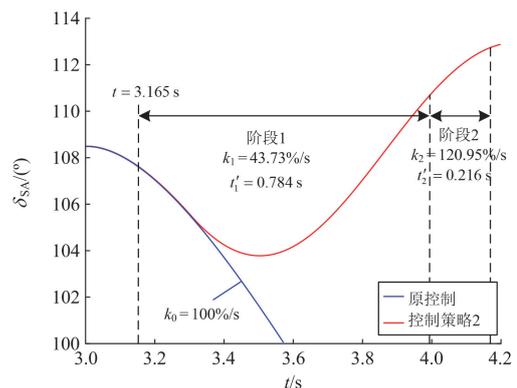


图 26 原控制和控制策略 2 对比图

Fig. 26 Comparison of original control and control strategy 2

控制策略 3 验证: 保持 4.1.3 节系统参数不变, 此时系统极限切除时间为 $t_c = 0.171 \text{ s}$ 。求得 3 个阶段功率差分别为: $\Delta P_1 = 823 \text{ MW}$, $\Delta P_2 = 6354 \text{ MW}$,

$\Delta P_3 = 273 \text{ MW}$ ，计算得各阶段时间分别为： $t'_1 = 0.431 \text{ s}$ ， $t'_2 = 0.426 \text{ s}$ ， $t'_3 = 0.143 \text{ s}$ ，恢复速率分别为： $k_1 = k_3 = 22.73\%/s$ ， $k_2 = 177.57\%/s$ 。作出故障策略 3 和原控制下的功角首摆曲线与图 26 相似，验证了控制策略 3 的正确性，本文不再赘述。

控制策略 4 验证：保持 4.2.1 节系统参数不变，此时系统极限切除时间 $t_c = 0.184 \text{ s}$ 。当增大风机有功恢复速率为 $200\%/s$ 时，作出此时的功角首摆曲线如图 27 所示。

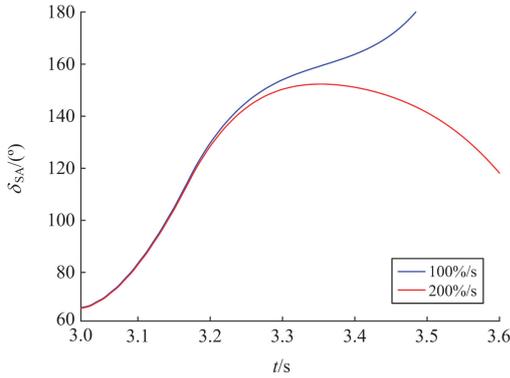


图 27 功角首摆曲线对比图

Fig. 27 Comparison diagram of first swing curves

由图 27 可得，增大风机有功恢复速率可使首摆重新恢复稳定，但此时恢复速率较大，可能引起系统波动。根据控制策略 4 得该情况下仅包含阶段 2。已知 $k_0 = 2$ ， $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ ，则求得有功恢复速率函数为： $k = 3.6t + 0.2$ ，将风机有功恢复速率按一次函数线性增大。作出新控制策略和原控制下的同步机频率曲线如图 28 所示。由图 28 可知，经过线性控制有功恢复速率增加后，同步电机的频率波动明显低于原控制，更利于系统稳定。

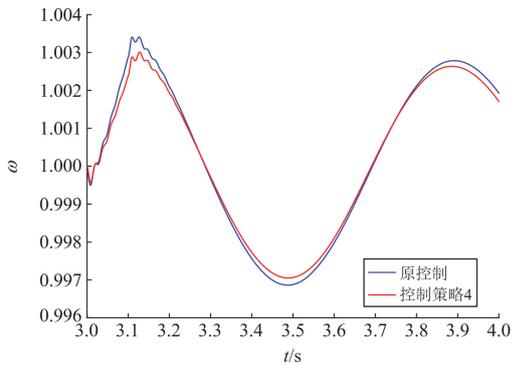


图 28 原控制和控制策略 4 对比图

Fig. 28 Comparison of original control and control strategy 4

控制策略 5 验证：保持 4.2.2 节系统参数不变，此时系统极限切除时间为 $t_c = 0.198 \text{ s}$ 。根据控制策

略得该情况下包含阶段 2 和阶段 3。计算得： $\Delta P_2 = 3508 \text{ MW}$ ， $\Delta P_3 = 342 \text{ MW}$ ，设定 $t'_2 = 0.456 \text{ s}$ ， $t'_3 = 0.544 \text{ s}$ 。此时有功恢复速率分别为： $k_2 = 160.27\%/s$ ， $k_3 = 13.1\%/s < 20\%/s$ ，则令 $k_3 = 20\%/s$ ，并重新计算 $t'_2 = 0.644 \text{ s}$ ， $t'_3 = 0.356 \text{ s}$ ，此时 $k_2 = 113.48\%/s$ 。作出该情况下控制策略 5 与原控制的功角曲线对比如图 29 所示。由图 29 可知，控制策略 5 下的功角首摆恢复稳定，验证了所提控制的正确性。

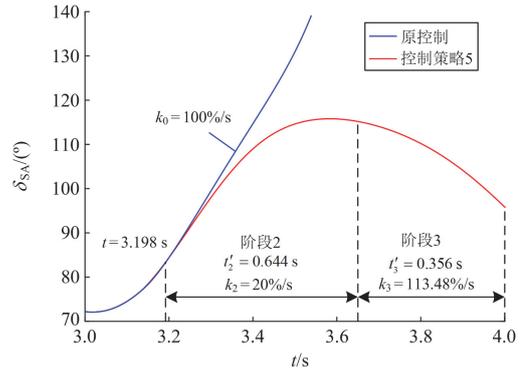


图 29 原控制和控制策略 5 对比图

Fig. 29 Comparison of original control and control strategy 5

5 结论

本文构建了含 DFIG 的风火打捆系统功角特性，基于扩展等面积定则，探讨了故障清除后风机有功恢复速率对暂态功角的影响，并提出了相应的控制策略。结合理论和仿真验证，得到如下结论。

1) 本文所提的 DFIG 时变阻抗模型能够涵盖 DFIG 故障恢复过程中电压、电流以及功率的时变信息，能够准确描述 DFIG 功率恢复过程中对首摆稳定性的影响。

2) 风机接入后会对原模型功角曲线产生直流偏移，故障清除后，不同的系统参数导致 DFIG 对系统首摆稳定的影响规律不同，根据解析结果可以分为 6 种情况，仿真结果表明对 6 种情况的分析符合风电对风火打捆系统首摆稳定性的影响规律。

3) 根据 DFIG 有功恢复速率对风火打捆系统首摆稳定性的影响规律，所提控制策略能够改善风火打捆系统首摆稳定性。将风机有功恢复过程分为 3 个阶段，通过改变各个阶段的恢复速率可有效增大系统暂态减速面积，降低功角曲线首摆幅值，提高系统的首摆稳定性。

参考文献

[1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电: GB/T

- 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [2] 林旻威, 温步瀛. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响研究综述[J]. 电气技术, 2017(4): 1-8, 38.
- LIN Minwei, WEN Buying. The overview of influence of large scale wind generation on transient stability of power system[J]. Electrical Technology, 2017(4): 1-8, 38.
- [3] VITTAL E, O'MALLEY M, KEANE A. Rotor angle stability with high penetrations of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 353-362.
- [4] ZHENG Yuanjie, XUE Ancheng, WANG Qing, et al. The impact of LVRT on the transient stability of power system with large scale wind power[C] // 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, December 8-11, 2013, Hong Kong, China: 1-5.
- [5] YU Chen, JAMES G, XUE Yusheng, et al. Impacts of large scale wind power on power system transient stability[C] // 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 6-9, 2011, Weihai, China: 277-283.
- [6] LIU Mosi, SUN Zhiyuan, LIU Guangshi, et al. Study on the influence of large-scale wind power integration on transient stability of power system[C] // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China: 1156-1159.
- [7] PAPADAKIS S, PERILLA A, TORRES J R, et al. Real-time EMT simulation based comparative performance analysis of control strategies for wind turbine type 4 to support transient stability[C] // 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 2-6, 2020, Montreal, QC, Canada: 1-5.
- [8] 柳飞扬, 曾平, 李征. 电网故障下全功率风电场内部机组的暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 43-54.
- LIU Feiyang, ZENG Ping, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with a full-scale converter under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 43-54.
- [9] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对接入区域系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 56-61.
- LIU Siwei, LI Gengyin, ZHOU Ming. Impact analysis of doubly-fed induction generator on the transient angle stability of the region with wind power integrated[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 56-61.
- [10] 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.
- WANG Ke, QIN Wenping, ZHANG Yu, et al. Mechanism analysis of effect of equivalent proportional coefficient of inertia control of DFIG on stability of first swing of power angle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 741-753.
- [11] 张钢, 宗启航, 柯贤波, 等. 基于临界惯量和预想故障的含风电电力系统暂态功角稳定在线预警[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 72-83.
- ZHANG Gang, ZONG Qihang, KE Xianbo, et al. Online warning of transient power angle stability of power systems with wind power based on critical inertia and anticipated faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 72-83.
- [12] 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.
- [13] 纪泰鹏, 赵伟, 李永达, 等. 基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 38-48.
- Ji Taipeng, ZHAO Wei, LI Yongda, et al. Transient synchronization stability analysis of PMSG-based wind farm with virtual inertial control based on an energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 38-48.
- [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.
- ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 18-29.
- [15] 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 systems—part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):

- 3832-3842.
- [16] 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(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043-4051.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051.
- [17] 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 Wenzhao, 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.
- [18] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105-110, 115.
LIN Li, YANG Yihan. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105-110, 115.
- [19] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34-40.
TANG Yi, ZHAO Lili, GUO Xiaojiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 34-40.
- [20] 董哲, 周明, 李庚银, 等. 风机有功控制对系统暂态功角第二摆稳定性影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4680-4690, 4893.
DONG Zhe, ZHOU Ming, LI Gengyin, et al. Influence mechanism of active power control of wind turbine generators on power system transient second swing stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4680-4690, 4893.
- [21] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 16-21.
TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Performances of DFIG-based wind turbines during system fault and its impacts on transient stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 16-21.
- [22] 于珍, 沈沉, 张雪敏. 双馈风机故障穿越后功率恢复速率对系统暂态稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3781-3791, 4019.
YU Zhen, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Analysis on the impact of post-fault power recovery speed of doubly-fed induction generators on power system transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3781-3791, 4019.
- [23] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对并网电力系统暂态稳定性的影响模式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 471-476.
LIU Siwei, LI Gengyin, ZHOU Ming. Influence mechanism of doubly fed induction generator on power system transient stability[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 471-476.

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-04-30

作者简介:

张 锋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 512978182@qq.com

陈武晖(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: chenwuhui@tyut.edu.cn

(编辑 魏小丽)