

基于网络能量的高比例 DFIG 并网电力系统暂态稳定紧急控制

刘 钺¹, 张宇驰¹, 蔡国伟¹, 王 聪², 杨 慧³, 张铭娜⁴

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012;

2. 国家电网有限公司西北电力调控分中心, 西安 710048;

3. 国网安徽省电力有限公司广德市供电公司, 广德 242200;

4. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林 132000)

摘 要: 规模化风电并网场景下, 在电力系统暂态稳定紧急控制中, 若采用传统切除火电机组的方式, 因火电机组并网容量降低, 其可提供的最大切机量随之减少, 故而难以保证系统切机后一定可恢复至稳定运行状态, 且切除火电机组后, 系统惯量进一步降低, 会带来较大的切机代价。因此, 必须考虑包含风电切机措施的暂态稳定紧急控制策略。基于此, 提出了基于网络能量的高比例双馈风机并网电力系统暂态稳定紧急控制策略。首先, 计算含风机系统支路稳定度指标, 判断系统暂态稳定状态并识别系统临界割集。其次, 构建支路暂态势能灵敏度指标, 建立临界割集支路稳定度与火电机组和风电机组有功的联系。进而通过灵敏度指标筛选调控对象, 以切机量最小为目标, 预设割集稳定度和切机裕度为约束条件, 设计了一种风火协调定量调控策略。最后, 通过单机系统仿真分析了风机接入对暂态过程中网络能量分布的影响; 通过十机系统仿真验证了所提切机策略可实现风电并网系统暂态稳定的定量调控。

关键词: 双馈风机; 割集势能灵敏度指标; 支路暂态势能函数; 暂态稳定; 紧急控制; 灰狼优化算法

Transient Stability Emergency Control of High Proportion DFIG Grid-connected Power System Based on Network Energy

LIU Cheng¹, ZHANG Yuchi¹, CAI Guowei¹, WANG Cong², YANG Hui³, ZHANG Mingna⁴

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Dispatching and Control Center, Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

3. Guangde Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Guangde 242200, China;

4. Jilin Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: Under the scenario of large-scale wind power grid connection, if the traditional method of cutting off thermal power units is still adopted for the emergency control of power system transient stability, the maximum number of machines that can be provided by thermal power units will be reduced due to the reduction of grid-connected capacity of thermal power units. Therefore, it is difficult to ensure that the system can be restored to a stable operation state after power cut-off. And after the removal of thermal power units, system inertia is further reduced, which will bring a greater cost of machine cutting. Consequently, an emergency control strategy for transient stability including wind power cut-off measurement must be considered. We proposed an emergency regulation strategy for high-proportion DFIG grid-connected power system based on network energy. First, we calculated the branch stability index, judged the transient stable state, and identified the fragile cut set. Secondly, we constructed a branch potential energy sensitivity index, and established the relationship between stability of critical cut set branch and active power of generators. Thirdly, we selected a control object through sensitivity index, and designed a wind-thermal power coordinated cutting strategy after taking the minimum cutting amount as the goal and presetting the cutting set stability and cutting margin as constraints. Finally,

基金资助项目: 国家自然科学基金青年基金 (52007027); 吉林省教育厅科学研究项目 (JKH20210092KJ); 吉林市科技创新发展计划 (20210103093)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (Youth Science Foundation Project) (52007027), Scientific Research Project of Jilin Education Department (JKH20210092KJ), Jilin Science and Technology Innovation Development Plan Project (20210103093).

through the simulation of single-machine system, we analyzed the influence of wind turbine access on network energy distribution in transient process. Through the simulation of ten-machine system, the proposed cutting strategy which can achieve quantitative control of DFIG grid-connected power system is verified.

Key words: DFIG; cut set potential energy sensitivity index; branch potential energy function; transient stability; emergency control; grey wolf optimizer

0 引言

推动风、光等新能源发电快速发展是实现碳达峰、碳中和的重要途径^[1]。风力发电是可再生能源中发展最快、也是最成熟的技术。随着风电并网规模的不断扩大,其对系统的安全稳定运行也带来了不容小觑的威胁。特别是高比例风电接入后,系统惯量降低,暂态稳定特性改变,保证故障后系统的暂态稳定运行尤为重要。

现有研究大多针对双馈风机(doubly fed induction generator, DFIG)对暂态稳定特性的影响展开。文献[2-7]分析了大规模风电场接入电力系统后影响暂态功角稳定性的关键因素;文献[8]基于扩展等面积准则(extended equal-area criterion, EEAC),研究了风电和直流综合作用对暂态功角稳定的影响机理;文献[9-15]研究了双馈风机控制环节对暂态稳定性的影响;文献[16]探讨了风电的不同运行方式、不同接入位置和不同装机量对系统暂态稳定性的影响。然而,以上大部分方法都是从发电机角度分析电力系统暂态问题,若能从网络角度分析高比例风电并网电力系统暂态稳定,则会避免风电机组的复杂建模,为暂态稳定分析提供一种更为便捷的研究思路。文献[17]提出了支路暂态势能法,基于网络能量分析了电力系统的暂态稳定,但仅在传统火电机组并网场景下进行了讨论,针对高比例风电并网电力系统的暂态稳定网络分析方法仍有待研究。

此外,DFIG接入给电力系统暂态稳定调控带来了极大的挑战。文献[18]通过分析发现,在高比例风电并网电力系统中采用传统切除火电机组的紧急调控方式难以保证系统稳定运行。因此,构建适用于风电并网电力系统的暂态稳定调控策略具有重要意义。文献[19-20]提出了DFIG并网电力系统暂态稳定调控措施,其中文献[19]运用支路暂态能量函数对故障后系统的运行特性进行分析,建立了考虑风力发电机的最优切机决策模型;文献[20]对比分析了传统火电机组与风电机组的暂态稳定差异性,并提出了系统故障失稳后的优化切机方案。上述文献针对风火协调切机控制进行了一些有益的工

作,但仍存在以下需要研究的方向:①如何确定高比例风电并网电力系统最优切机地点;②如何实现高比例风电并网电力系统暂态稳定的定量调控。

为此,本文从网络能量角度提出了一种高比例DFIG并网电力系统暂态稳定紧急控制策略。首先计算含风机系统支路稳定度指标,以此来判断系统暂态稳定状态并识别系统脆弱割集;进而推导了支路暂态势能灵敏度指标;基于灵敏度指标筛选调控机组,根据紧急控制中构建的约束条件,设计了风火协调定量调控策略;最后,在单机系统和十机系统中探求了不同风电渗透比下暂态过程中能量的分布特征并验证了本文所提调控策略的有效性和正确性。

1 风电并网电力系统暂态稳定指标构建

在高比例DFIG并网电力系统中,为了避免电力电子设备的复杂建模问题,本文从风机的外特性角度出发,采用支路暂态势能法^[17,21]分析电力系统的暂态稳定。将风机对电力系统暂态稳定特性的影响映射到网络支路中,通过网络能量变化即可表征风电机组参与暂稳的动态过程。因此,在后续的指标构建中可不考虑风电机组的控制环节,只需调用网络中的电气量,在保证风机特性的前提下有效简化了分析与调控过程。

1.1 临界割集的基本概念与稳定性分析方法

暂态势能在网络中的分布具有积聚性。系统失稳时表现为网络中某一断面支路两端相角不断增大,支路暂态势能激增,造成系统失稳或者解列。定义系统中分担势能最大,失稳时导致系统在该断面上撕开的一组支路为系统的临界割集^[17,21-22]。临界割集的稳定度可表征系统稳定程度。

为了有效识别系统的临界割集,文献[17,21]通过支路暂态势能法定义了支路稳定度指标(branch stability index, SBI),表示为

$$S_{BI} = \frac{P_l(t_b) - P_l^s}{V_{pbl}(t_b, t_a)} \quad (1)$$

式中: $P_l(t_b)$ 表示支路 l 势能第1次达到极大值时刻对应的有功功率; P_l^s 表示支路 l 稳态时的有功功率; $V_{pbl}(t_b, t_a)$ 表示支路 l 势能第一摆极大值和极小值的

差值。

支路的 SBI 指标越接近 0, 则其稳定性越弱, 等于 0 时则该支路失稳, 系统失稳。某一工况下指标值最接近 0 的一组支路为系统的临界割集。同时, 可通过临界割集的 SBI 指标表征系统的稳定程度, 为后续暂态稳定定量调控提供重要依据。

1.2 含 DFIG 电网的割集支路暂态势能灵敏度

紧急控制主要采用切机操作减小重要线路支路势能, 将系统由失稳调控至稳定状态, 而合适切机地点的选择则会有效减少调控代价。本节通过推导临界割集支路稳定测度函数对风电和火电机组有功功率的灵敏度, 为切机地点的选择提供理论基础。根据拓扑能量函数, 对含高比例 DFIG 电力系统的任意支路 l , 其暂态势能函数可表示为

$$V_{\text{pbl}}(\theta_l) = \int_{\theta_l^0}^{\theta_l} (P_l(u) - P_l^s(\theta_l^0)) du \quad (2)$$

式中: $P_l(u)$ 表示支路 l 的有功功率; P_l^s 表示支路 l 稳态时的有功功率; θ_l 表示支路 l 两端的母线电压相角差; θ_l^0 支路 l 稳态时两端的电压相角差。

将 $d\theta/dt = \omega_N \omega(t)$ 代入式(2)中, $\omega(t)$ 为支路 l 两端的母线频率之差, ω_N 为额定角频率。以时间 t 为变量, 则式(2)可以描述为

$$V_{\text{pbl}}(t) = \int_{t_0}^t \omega_N (P_l(t) - P_l^s(t_0)) \omega_l(t) dt \quad (3)$$

式(3)对时间 t 求导得到

$$\dot{V}_{\text{pbl}} = \omega_l(t) (P_l(t) - P_l^s) \omega_N \quad (4)$$

V_{pbl} 对参数变量 θ 求导得到

$$\frac{\partial V_{\text{pbl}}}{\partial \theta_l} = P_l(t) - P_l^s \quad (5)$$

文献[17]定义了支路测度函数为

$$S_{\text{Bl}}(t) = \frac{P_l(t) - P_l^s}{V_{\text{pbl}}(t, t_a)} \quad (6)$$

同时

$$P_l = \frac{U_1 U_2}{x_l} \sin \theta_l \quad (7)$$

式中: x_l 为支路 l 的电抗; U_1 、 U_2 为支路 l 两端电压。对参数变量 θ 求导得到

$$\frac{dP_l}{d\theta_l} = \frac{U_1 U_2}{x_l} \cos \theta_l \quad (8)$$

P_l 对参数变量 $P_{G,g}$ 求导得到支路 l 有功对发电机 g 有功功率的转移因子 $D_{l,g}$ [23]

$$\frac{dP_l}{dP_{G,g}} = A_{l,g} + (P_l - \sum_{p \neq R} A_{l,p} P_{G,p}) / \sum_p P_{G,p} = \frac{M_l^T X_g}{x_l} + (P_l - \sum_{p \neq R} A_{l,p} P_{G,p}) / \sum_p P_{G,p} = D_{l,g} \quad (9)$$

式中: $P_{G,g}$ 可表示为发电机 g 的有功出力; $A_{l,g}$ 、 $A_{l,p}$ 分别表示发电机 g 、发电机 p 的功率转移分布因子; M_l^T 为支路 l 的节点关联向量; X_g 为直流潮流矩阵逆矩阵的第 g 个列向量; $P_{G,p}$ 表示发电机节点 p 的有功功率; R 为参考发电机节点。

支路稳定测度函数对参数变量 θ 求导得到

$$\frac{dS_{\text{Bl}}}{d\theta_l} = \frac{\frac{dP_l(\theta_l)}{d\theta_l} V_{\text{pbl}}(t, t_a) - (P_l(t) - P_l^s) \frac{dV_{\text{pbl}}(t, t_a)}{d\theta_l}}{V_{\text{pbl}}(t, t_a)^2} = \frac{U_1 U_2 \cos \theta_l V_{\text{pbl}}(t, t_a) - x_l (P_l(t) - P_l^s)^2}{x_l V_{\text{pbl}}(t, t_a)^2} \quad (10)$$

结合式(8)、(9)、(10)以得到 $S_{\text{Bl}}(t)$ 对参数变量电源有功功率 $P_{G,g}$ 的灵敏度导数为

$$\frac{dS_{\text{Bl}}}{dP_{G,g}} = \frac{\frac{dS_{\text{Bl}}}{d\theta_l} \frac{d\theta_l}{dt}}{\frac{dP_{G,g}}{dP_l} \frac{dP_l}{d\theta_l} \frac{d\theta_l}{dt}} = \frac{\frac{dS_{\text{Bl}}}{d\theta_l}}{\frac{dP_{G,g}}{dP_l} \frac{dP_l}{d\theta_l}} = \frac{D_{l,g} (U_1 U_2 \cos \theta_l V_{\text{pbl}}(t, t_a) - x_l (P_l(t) - P_l^s)^2)}{V_{\text{pbl}}(t, t_a)^2 U_1 U_2 \cos \theta_l} \quad (11)$$

综上, 将临界割集支路 c 的 $S_{\text{Blc}}(t)$ 对火电和风电机组有功功率的灵敏度指标(sensitivity index of cut set branch SBI, CSSI)定义为式(12)。

$$C_{\text{SSIC}} = \frac{D_{c,g} (U_1 U_2 \cos \theta_c V_{\text{pbc}}(t, t_a) - x_c (P_c(t) - P_c^s)^2)}{V_{\text{pbc}}(t, t_a)^2 U_1 U_2 \cos \theta_c} \quad (12)$$

通过 C_{SSIC} 的符号可判断临界割集稳定度与该电源的相关关系。以故障清除时刻割集支路对应功率流向为正方向, 若 $C_{\text{SSIC}} > 0$, 则临界割集支路稳定度与该发电机有功功率呈正相关关系, 切机后稳定指标降低, 恶化系统的稳定性; 若 $C_{\text{SSIC}} < 0$, 则临界割集支路稳定度与该发电机有功功率呈负相关关系, 切机后稳定指标提高, 改善系统的稳定性。通过 C_{SSIC} 符号即可确认可调机组。利用 C_{SSIC} 数值大小则可判断优先调控机组。在可调机组中按 C_{SSIC} 绝对值由大到小排序, C_{SSIC} 绝对值越高的机组进行切机操作后对 SBI 的提升幅度越大, 对系统暂态稳定性的改善效果越好。

2 基于 CSSI 的含高比例 DFIG 电力系统暂态稳定调控策略

2.1 调控地点选取

含高比例 DFIG 电力系统暂态稳定调控地点选取示意图如图 1 所示。在实际电网中, 广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)能够获取

支路有功功率, 电压相角等电气信息, 并将实时获取的信息发送给电力调控中心^[24]。本文提出的基于 CSSI 的调控机组筛选方法可与 WAMS 相结合, 具有一定的实际工程意义。

具体筛选过程为: 调控中心人员可从 WAMS 中挑选出所需的数据计算各支路的稳定度指标 SBI, 以此判断系统暂态稳定状态并识别系统临界割集。计算临界割集势能灵敏度指标, 选取灵敏度占优的风电和火电机组从而确定最优切机地点。最后, 调控中心对该发电机组发出有功调控信号, 以此达到调控地点选取目的。

2.2 切机量确定

灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO) 是一种群智能优化算法, 在 2014 年由澳大利亚的学者——Mirjalili 团队提出。该算法受到了灰狼捕食猎物活动的启发, 具有收敛性能好、参数少、易实现等特点, 是一种具有显著优势的优化搜索方法。本文采用 GWO 算法求解最优切机量。

以切机量最小为优化目标, 达到预设割集稳定度指标数值和风电和火电机组切机裕度为限制条件, 构建控制优化模型, 从而实现定量调控。考虑满足暂稳快速准确调节的需要, 设置 GWO 最大迭代次数为 500。为了便于工程计算, 本文采用线性拟合的方式, 离线选取发电机不同切机量下 SBI 的数据, 确定 SBI 与 ΔP_{Di} 的近似斜率 k_{Di} , 从而建立灵敏度占优机组切机量与 SBI 指标的关系式。目标函数及约束条件如式(13)、(14)所示。

$$\min \Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Gi} \quad (13)$$

$$\begin{cases} 0 < \Delta P_{Gi} < \Delta P_{Gi,max} \\ \left| \sum_{i=1}^n k_{Gi} \Delta P_{Gi} \right| \geq S_{Blc} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\Delta P_{Gi,max}$ 表示发电机 i 最大切机量; k_{Gi} 表示割集支路稳定度指标与发电机切机量之间的系数; S_{Blc} 为预设割集稳定度指标。

2.3 风火协调切机策略

针对高比例 DFIG 并网电力系统失稳状态下的风火协调切机策略具体步骤如下所述(见图 2)。

步骤 1: 通过量测数据计算支路 SBI 值, 确定系统临界割集。

步骤 2: 通过式(12)筛选灵敏度占优的风电和火电机组。

步骤 3: 离线获取两组(ΔP_{Gi} , SBI), 利用拟合

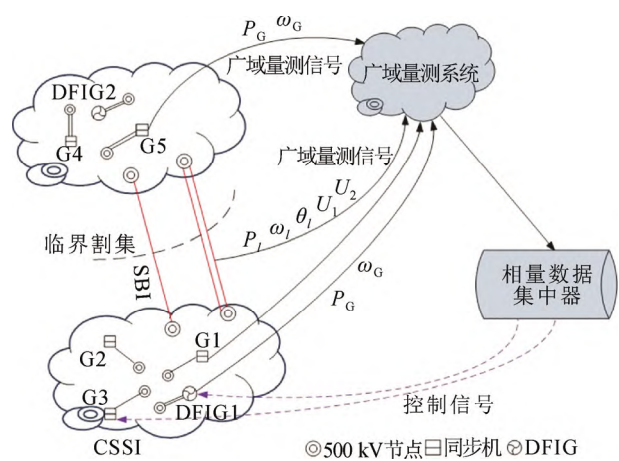


图 1 高比例 DFIG 并网电力系统暂态稳定调控地点选取
Fig.1 Selection of location for transient stability control of high-permeability DFIG grid-connected system

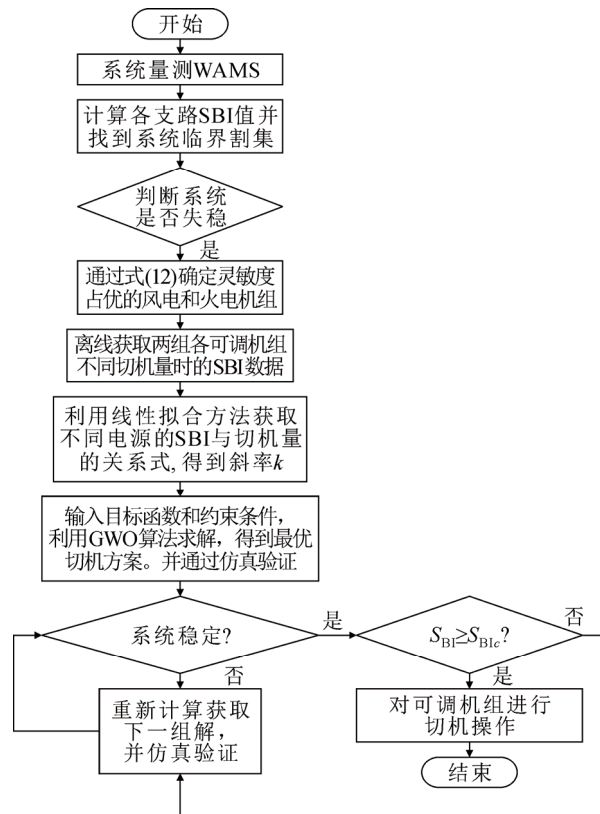


图 2 风火协调切机策略图

Fig.2 Wind turbine-thermal turbine coordinated cut-off strategy diagram

方法确定临界割集支路稳定度指标与灵敏度占优机组切机量的线性关系。

步骤 4: 通过式(13)和式(14), 利用 GWO 算法得到最优切机方案。

步骤 5: 仿真验证切机方案是否合理, 若不合

理, 返回至步骤 4; 若合理, 进一步观测临界割集支路 SBI 是否满足条件, 若不满足, 返回至步骤 4; 若满足, 则进行实际系统的切机操作。

3 DFIG 并网电力系统暂态特性分析

含有风电场的单机无穷大系统如图 3 所示。

本文采用 PSASP 软件进行仿真分析。以单机无穷大系统为例, 节点 2 接入双馈风机, G1 和风电机组总容量为 8.0(标么值)。0 s 时刻在节点 3 设置三相短路故障, 0.1 s 清除。分析不同比例风电接入系统后对系统支路势能和临界割集的影响。图 4 为故障清除后不同风电渗透率下单机系统的支路势能曲线。

由图 4 可知, 随着风电渗透率的增加, 支路势能振荡频率加快, 其波动性也越大。风电渗透率达到 75% 时, 系统失稳。势能始终集中于支路 2-3, 系统的临界割集不变。

在保持上述故障条件不变的情况下, 研究不同风电渗透率对系统临界割集 SBI 指标的影响。不同风电渗透率下临界割集 SBI 的计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 随着系统中风电渗透率的不断增加, 支路 2-3 SBI 值降低。风电渗透率提高至 75% 时, 支路 2-3 失稳, 指标值近似为 0。可通过临界割集指标定量评估 DFIG 并网电力系统的暂态稳定性。从图 4 和表 1 可以看出, 高比例风电并网恶化了系统临界割集稳定性, 系统稳定性也随之减弱。

4 紧急控制策略仿真分析

含风电场的 NEW ENGLAND 10 机 39 节点系统如图 5, 将 G06, G07, G08 替换为相同出力的双馈风机, 在 G01, G04, G05 接入位置以替换方式接入容量分别为 400 MVA、300 MVA、300 MVA 的双馈风机, 风机渗透率为 44.82%, 同步机采用经典二阶模型并考虑阻尼系数, 验证所提方法的正确性。

4.1 情景 1

设置节点 4 发生三相短路接地故障, 故障时间从 0 s 开始, 故障持续时间为 0.22 s。此时系统失稳, 系统支路势能曲线如图 6 所示, 部分支路 SBI 计算结果如表 2 所示。

从图 6 可以看出, 支路 {2-1, 8-9, 1-39, 9-39} 失稳。结合表 2, 可以分析得出系统临界割集为 {2-1, 8-9}。

计算 0.23 s 时刻灵敏度指标 CSSI, 图 7 和图 8

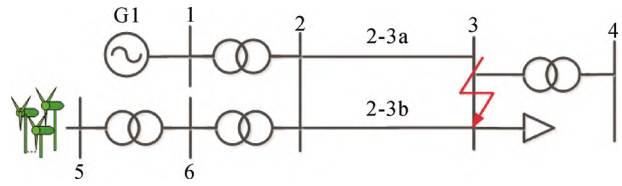


图 3 风电场接入单机无穷大系统图

Fig.3 Wind farm connected to a single infinite bus system diagram

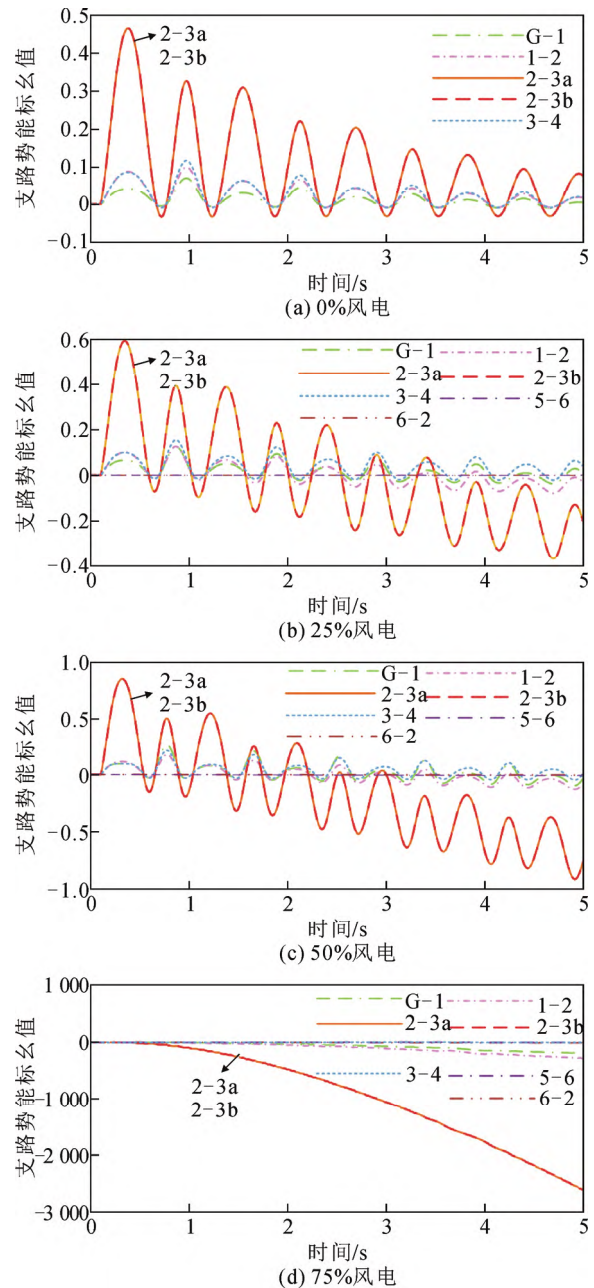


图 4 不同比例风电接入下的各支路势能图

Fig.4 Potential energy diagram of each branch under different wind power permeability

为 C_{SS12-1} 、 C_{SS18-9} 计算结果。

表 1 不同风电渗透率下割集 SBI 数值表

Table 1 Cut set SBI value table under different wind power permeability

风电接入比例/%	临界割集	SBI 值
0	2-3	3.510
25	2-3	2.940
50	2-3	1.930
75	2-3	0.075

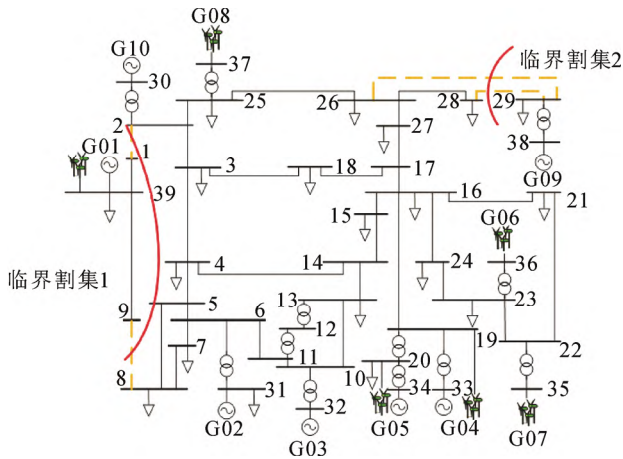


图 5 风机接入 10 机 39 节点系统图

Fig.5 Diagram of wind turbines connected to 10-machine 39-bus system

表 2 部分支路调节前 SBI 值

Table 2 SBI value of some branches before adjustment

支路名称	SBI	支路名称	SBI
2-1	0.010	8-9	0.015
1-39	2.935	9-39	0.029

根据图 7、图 8 可知 S_{B12-1} 对 G01、G02 的灵敏度大于 0, S_{B18-9} 对 G01、G08、G10 的灵敏度大于 0, 割集支路稳定度指标与 G01,G02,G08,G10 有功出力呈正相关关系, 降低其有功出力会恶化系统的暂态稳定性。因此, 可调机组为 G03—G07、G09。从图 6 可以看出割集支路 2-1 势能跌落的幅度高于支路 8-9, 且从表 2 中可以看出 S_{B12-1} 小于 S_{B18-9} , 其稳定性更差, 因此以 S_{B12-1} 为参考对象。针对支路 2-1, G03—G07、G09 的灵敏度绝对值排序为 $G09>G04=G05=G06=G07>G03$ 。

为了验证所提灵敏度指标 CSSI 的有效性, 在上述故障情况下将 G01—G10 在 0.23 s 分别切除 200 MW, 不考虑参考电机 G02。切机后支路 S_{B12-1} 计算结果如表 3。

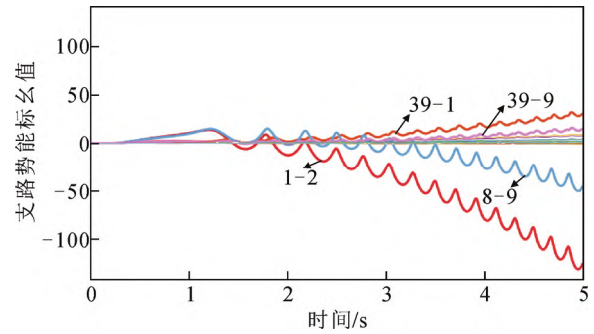


图 6 各支路势能曲线图

Fig.6 Potential energy curve of each branch

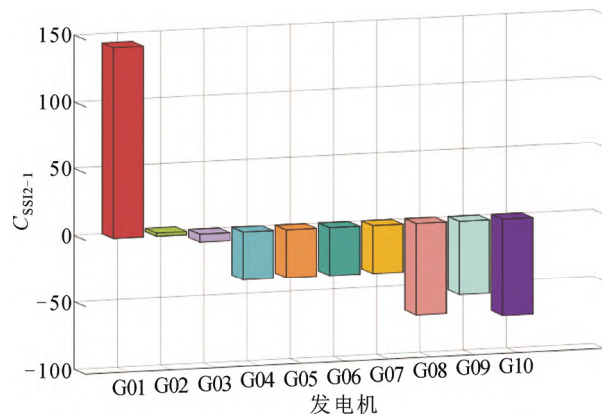


图 7 C_{SSI2-1} 柱状图

Fig.7 C_{SSI2-1} histogram

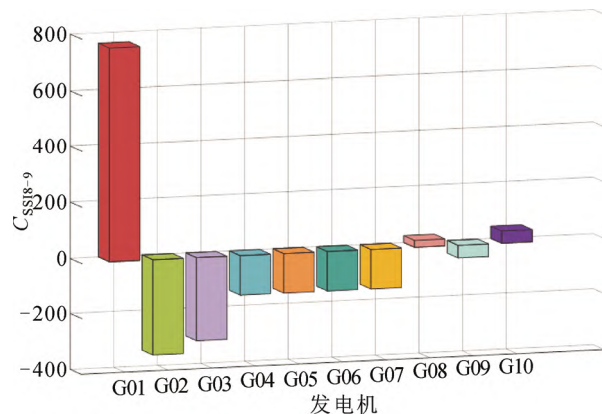


图 8 C_{SSI8-9} 柱状图

Fig.8 C_{SSI8-9} histogram

表 3 不同发电机切机后 S_{B12-1}

Table 3 S_{B12-1} value after adjustment

切机机组名称	S_{B12-1}	切机机组名称	S_{B12-1}
G01	失稳	G07	1.889
G03	失稳	G08	失稳
G04	1.873	G09	2.177
G05	1.896	G10	失稳
G06	1.921		

从表 3 中可以看出, 实际计算结果与灵敏度排序基本一致。根据灵敏度指标计算结果, 选择 G09,G06,G07 为优先切机对象, 并给定 3 台发电机的切机量不高于无故障情况下有功功率的 70%。

通过离线计算得出 S_{BI2-1} 与 G09 切机量的斜率为 0.370, 与 G06,G07 切机量的斜率为 0.310。通过灰狼优化算法对等式(13)、(14)进行最优求解, 参考稳定度指标 $S_{BI2-1}=5$, 其约束条件如式(15)

$$\begin{cases} 0 < \Delta P_{G6} + \Delta P_{G7} < 8.470 \\ 0 < \Delta P_{G9} \leq 5.810 \\ 0.310(\Delta P_{G6} + \Delta P_{G7}) + 0.370\Delta P_{G9} + 1.440 \geq 5.000 \end{cases} \quad (15)$$

对于上述约束条件, 通过灰狼优化算法得到火电机组 G09, 风电机组 G06、G07 的切机量标幺值分别为 $\Delta P_{G9}=5.810$, $\Delta P_{G6}=2.278$, $\Delta P_{G7}=2.278$ 。按照计算结果在 0.23 s 施加切机扰动。经过仿真验证, 切机后系统重新回到稳定状态, 调节前后功角曲线和系统的支路势能曲线图如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 根据文中所提方法可以实现暂态稳定判别, 与传统的暂态稳定判别上的功角方法起到同样作用, 但本文能量方法的优势在于它能够更加直观的看出风电机组接入后的势能变化及网络薄弱环节。表 4 为切机后脆弱割集的 SBI 数值。从表 4 中可以看出调整后割集 {2-1, 8-9, 1-39, 9-39} 稳定度指标均提高, 达到了预期调控效果。

预设的 $S_{BI2-1}=5$, 从表 4 中可以看出, 按照求解出的切机方案切机后支路 2-1 SBI 提升至 4.916, 误差为 1.680%, 基本实现了定量调控。

4.2 情景 2

设置节点 28 发生三相短路接地故障, 故障时间从 0 s 开始, 故障持续时间为 0.19 s。此时系统失稳, 系统支路势能曲线如图 10 所示, 部分支路 SBI 计算结果如表 5 所示。

从图 10 可以看出, 支路 {29-26, 29-28, 28-26, 2-25} 失稳最为严重。结合表 5, 可以分析得出系统临界割集为 {29-26, 29-28}。

计算临界割集 SBI 对发电机有功功率的灵敏度 CSSI, 图 11 和图 12 为 $C_{SSI29-26}$ 、 $C_{SSI29-28}$ 的计算结果。

根据图 11、图 12 可知 $S_{BI29-28}$ 、 $S_{BI29-26}$ 对 G01—G08、G10 的灵敏度大于 0, 割集支路稳定度指标与 G01—G08、G10 有功出力呈正相关关系, 降低其有功出力会恶化系统的暂态稳定性。因此, 可调机组为 G09。

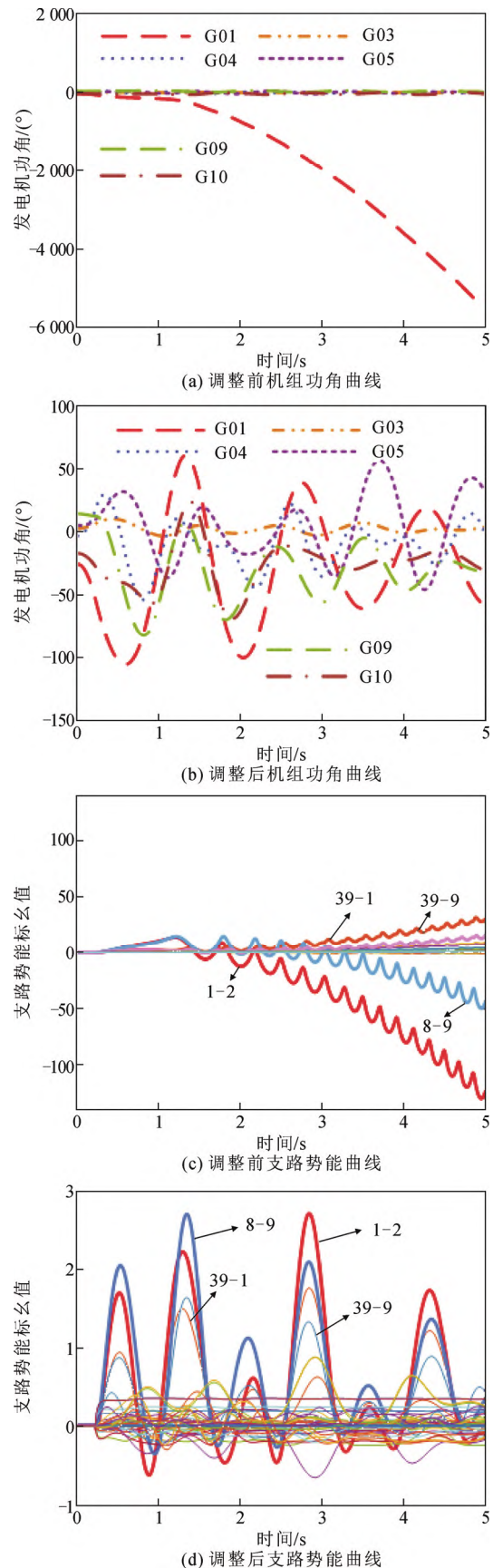


图 9 调整前后发电机功角和系统支路势能图

Fig.9 Generator power angle and system branch potential energy diagram before and after adjustment

表 4 调整前后脆弱割集 SBI 值

Table 4 SBI value of fragile cut set before and after adjustment

adjustment					
支路名称	调整前 SBI	调整后 SBI	支路名称	调整前 SBI	调整后 SBI
2-1	0.010	4.916	8-9	0.015	3.926
1-39	2.935	8.673	9-39	0.029	8.980

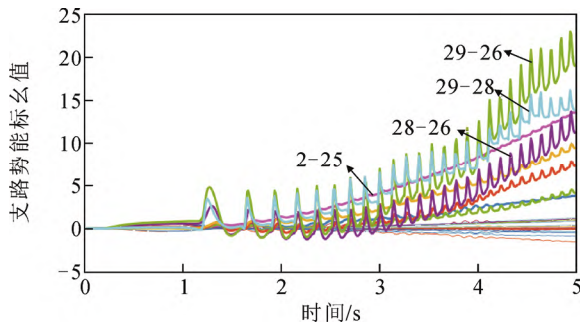


图 10 各支路势能曲线图

Fig.10 Potential energy curve of each branch

表 5 调节前支路 SBI 值

Table 5 SBI value of some branches before adjustment

支路名称	SBI	支路名称	SBI
29-26	-0.011	29-28	-0.065
28-26	1.132	2-25	17.992

支路 29-26 势能增长幅度高于支路 29-28, 且 $S_{BI29-26}$ 相较于 $S_{BI29-28}$ 更接近 0, 其稳定性更差, 因此选择 $S_{BI29-26}$ 为调控对象。离线计算建立 G09 切机量与支路 29-26 SBI 值的线性关系。通过灰狼优化算法对等式(13)、(14)进行最优求解, 参考稳定度指标 $S_{BI29-26}=10$, G09 切机量不高于无故障情况下有功出力的 0.7。其约束条件如式(16)

$$\begin{cases} 0 < \Delta P_{G9} < 5.810 \\ 1.120\Delta P_{G9} + 3.729 \geq 10.000 \end{cases} \quad (16)$$

对于上述约束条件, 通过灰狼优化算法得到发电机 G09 的切机量标么值为 $\Delta P_{G9}=5.59839$ 。按照计算结果在 0.20 s 施加切机扰动。仿真计算调整前后的发电机功角曲线及支路势能如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 切机后系统恢复稳定。表 6 为切机前后临界割集的 SBI 指标。从表中数据可以看出, 切机后系统临界割集的稳定度指标提高, 达到了预期的调控效果。

预设的 $S_{BI29-26}=10$, 从表 6 中可以看出, 按照求解出的切机方案切机后支路 29-26 SBI 提升至

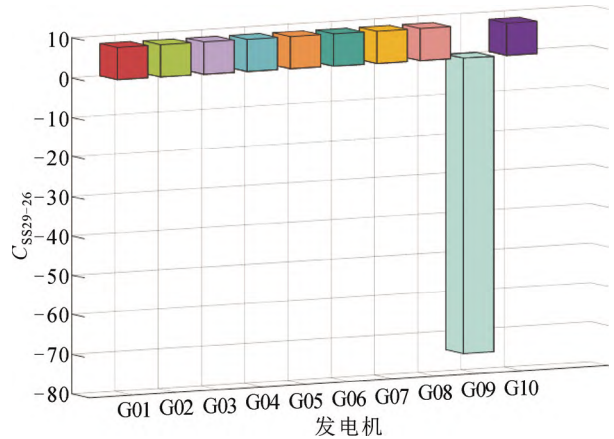


图 11 $C_{SSI29-26}$ 柱状图

Fig.11 $C_{SSI29-26}$ histogram

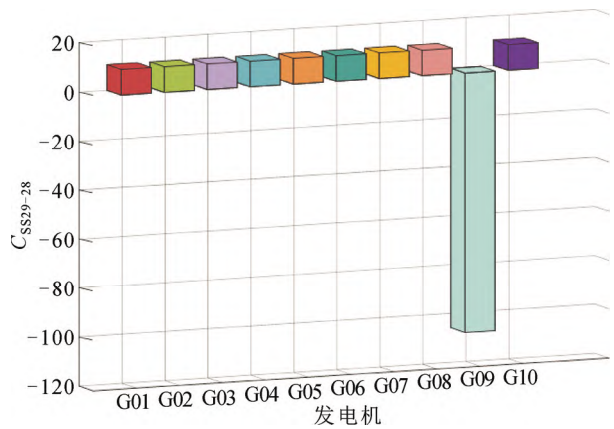


图 12 $C_{SSI29-28}$ 柱状图

Fig.12 $C_{SSI29-28}$ histogram

表 6 调整前后临界割集 SBI 值

Table 6 SBI value of critical cut set before and after adjustment

adjustment					
支路名称	调整前 SBI	调整后 SBI	支路名称	调整前 SBI	调整后 SBI
29-26	-0.011	9.405	29-28	-0.065	31.129

9.405, 误差为 6.000%, 基本实现了定量调控。

5 结论

本文从网络能量角度分析高比例 DFIG 并网电力系统暂态稳定问题, 并提出了基于网络能量的暂态稳定紧急控制策略, 得到如下结论:

- 1) 研究了风电并网对电力系统暂态稳定特性的影响。规模化风电并网电力系统暂态失稳表现为系统同步运行在临界割集上撕开, 因此, 选取临界割集 SBI 指标表征系统暂态稳定程度。随着风电渗透率的增加, 系统的临界割集未发生改变; 割集 SBI 指标降低, 恶化了系统的暂态稳定性。

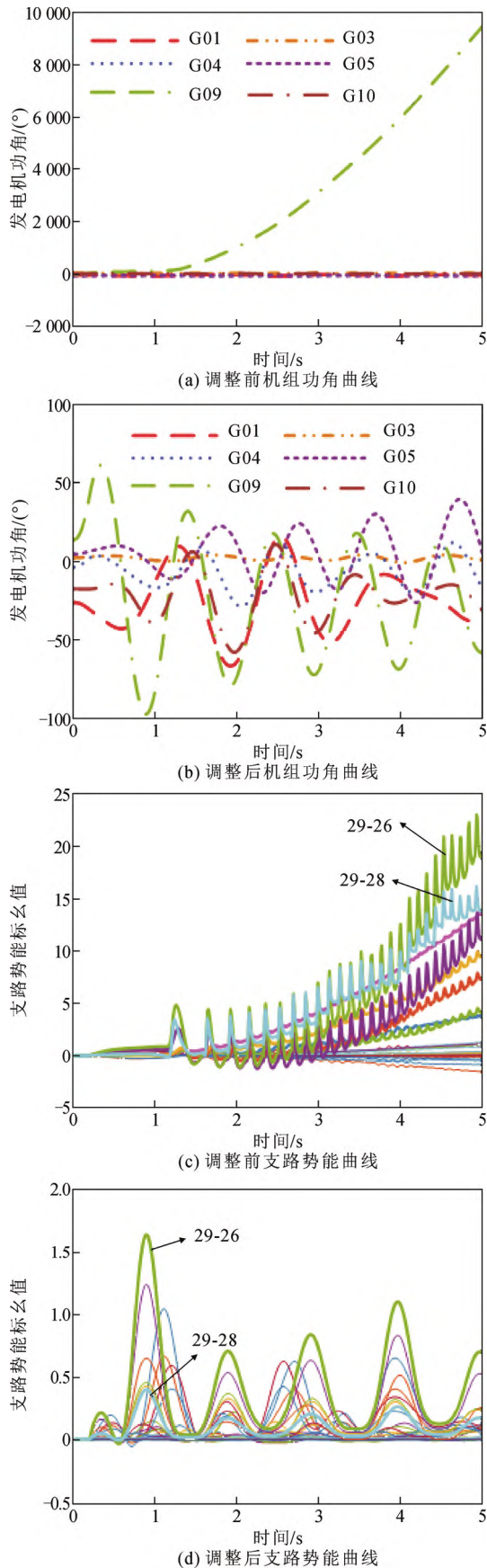


图 13 调整前后发电机功角和系统支路势能图

Fig.13 Generator power angle and system branch potential energy diagram before and after adjustment

2) 提出了临界割集 SBI 对规模化 DFIG 并网电力系统风电和火电机组有功出力的灵敏度指标 CSSI。通过 CSSI 的符号可确认可调机组, 利用 CSSI 数值大小可判断优先调控机组。从而确定电力系统发生严重故障后的最优切机地点。

3) 提出了适用于高比例 DFIG 并网电力系统发生严重故障后保证系统稳定运行的风火协调定量调控策略。通过十机系统仿真验证了该暂态稳定紧急控制策略可在保证切机量最小的同时实现定量调控。

4) 本文采用灰狼优化算法设计考虑 DFIG 的最优切机策略, 在后续研究中将结合工程实际需要通过对减小数据需求量, 缩短计算时窗等手段进一步提高该切机策略计算的时效性, 以满足实际电网快速准确调节的需要。

参考文献 References

- [1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
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.
- [5] 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.
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.
- [6] 卢锦玲, 徐超, 程晓悦, 等. 基于 DFIG 的变速风电机组对系统暂态稳定影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 68-73.
LU Jinling, XU Chao, CHENG Xiaoyue, et al. Study on transient stability of power system integrated with variable speed wind turbines based on DFIG[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 68-73.
- [7] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳

- 定的影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 875-881.
- WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-Based wind power integration on the transient stability of power systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 875-881.
- [8] 江 琴, 刘天琪, 曾雪洋, 等. 大规模风电与直流综合作用对送端系统暂态稳定影响机理[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2038-2046.
- JIANG Qin, LIU Tianqi, ZENG Xueyang, et al. Influence mechanism of comprehensive action of large-scale wind power and HVDC transmission system on sending system transient stability[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2038-2046.
- [9] FU Y, HUANG L S, ZHANG H Y, et al. DFIG virtual inertia control in micro-grid based on setting trigger condition and ZN method for parameters optimisation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(15): 3765-3775.
- [10] 王 杰, 彭志炜, 田 宇, 等. 双馈风电机组故障穿越对系统暂态稳定的影响[J/OL]. 电测与仪表, 2020: 1-8[2021-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200727.1226.006.html>.
- WANG Jie, PENG Zhiwei, TIAN Yu, et al. Influence of fault ride-through of doubly-fed induction generators on transient stability of power systems[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020: 1-8[2021-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200727.1226.006.html>.
- [11] 张祥宇, 朱正振, 付 媛. 风电并网系统的虚拟同步稳定分析与惯量优化控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2922-2932.
- ZHANG Xiangyu, ZHU Zhengzhen, FU Yuan. Virtual synchronous stability analysis and optimized inertia control for wind power grid-connected system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2922-2932.
- [12] 龚文忠. 风电场虚拟惯性对互联系统功角暂态稳定影响分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 41-45.
- GONG Wenzhong. Impact of wind farms virtual inertia on the transient angle stability of interconnected power systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 41-45.
- [13] 潘尔生, 王智冬, 王 栋, 等. 基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 170-177.
- PAN Ersheng, WANG Zhidong, WANG Dong, et al. Stability analysis of phase-locked loop synchronized DFIGs in weak grids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 170-177.
- [14] 郑 超, 李顺昕, 李惠玲, 等. 双馈风机电暂态模型及规模化风光并网系统受扰特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1023-1033.
- ZHENG Chao, LI Shunxin, LI Huiling, et al. Electromechanical transient simulation model of double fed induction generator and disturbed characteristic of scale wind/photovoltaic hybrid system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1023-1033.
- [15] 杨 琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042-2047.
- YANG Qi, ZHANG Jianhua, LI Weiguo. Analysis on transient stability of integration of wind farms into power systems[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 2042-2047.
- [16] NON-MEMBER I N. Review of DFIG wind turbine impact on power system dynamic performances[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12(3): 301-311.
- [17] 蔡国伟, 穆 钢, CHAN K W, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.
- CAI Guowei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [18] 杨濛濛. 大规模风电外送安全稳定控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- YANG Mengmeng. Research on security and stability control of large-scale wind power delivery system[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2015.
- [19] 杨濛濛, 郭 雷, 王春华, 等. 基于改进支路暂态能量函数的风电并网暂态最优切机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 72-77.
- YANG Mengmeng, GUO Lei, WANG Chunhua, et al. Transient optimal tripping control of grid-connected wind farms based on advanced branch transient energy function[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 72-77.
- [20] 邵云昶. 赤峰某风电基地的有功功率紧急控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- SHAO Yunchang. Research of active power emergency control on a wind power base in Chifeng[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.
- [21] CAI G W, CHAN K W, YUAN W P, et al. Identification of the vulnerable transmission segment and cluster of critical machines using line transient potential energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(3): 199-207.
- [22] 张剑云, 孙元章. 基于脆弱割集选择紧急控制地点的灵敏度分析方法[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 21-26.
- ZHANG Jianyun, SUN Yuanzhang. A vulnerable cutsets based sensitivity analysis method for locating emergency controls[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 21-26.
- [23] NG W Y. Generalized generation distribution factors for power system security evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(3): 1001-1005.
- [24] 刘劲风, 王述洋. WAMS在电力系统分析和控制中的应用的新进展[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 182-185.
- LIU Jinfeng, WANG Shuyang. Survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 182-185.



LIU Cheng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

刘 铖(通信作者)

1985—, 男, 博士, 副教授, 硕导
主要研究方向为电力系统稳定分析与控制
E-mail: 05dylc@163.com

收稿日期 2021-04-22 修回日期 2021-12-15 编辑 陈 蔓