

双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响

郝正航^{1,2}, 余贻鑫¹

(1. 天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 双馈感应发电机 (DFIG) 在定子磁链或电压定向的矢量控制下, 其功角动态行为均具有快变特性, 致使 DFIG 对常规同步发电机 (SG) 的首摆稳定性和阻尼特性产生重要影响。研究发现, DFIG 和 SG 的功角摇摆曲线可能存在两类交点, 将其分别定义为主动交越点和被动交越点, 交越性质决定了 DFIG 对 SG 稳定性影响的性质。大扰动时, SG 的首摆期间有主动交越交点, DFIG 降低了系统的暂态稳定性; 后续摇摆期间有被动交越交点, DFIG 起到了正阻尼作用。

关键词: 电力系统; 风力发电; 双馈电机; 暂态稳定; 阻尼特性

The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system

HAO Zheng-hang^{1, 2}, YU Yi-xin¹

(1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: When vector control strategy is employed, based on stator flux orientation or stator voltage orientation, the power angle of DFIG has a sensitive dynamic behavior. Due to this characteristic, the first swing stability and damping of conventional synchronous generator (SG) are greatly influenced by DFIG. It is found that two sorts of power angle curve crosses will be produced when DFIG and parallel SG are integrated into power grid. In this paper, the two angle curves crosses are defined as positive cross and passive cross, whose cross nature determines the effect of DFIG on the stability of SG. When a large disturbance happens in power grid, the positive cross will appear in the period of first swing and transient stability of power system will be weakened. But, the passive cross will occur in the succeeding seconds and DFIG will accordingly enhance damping of SG.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (973) (No. 2004CB217904).

Key words: power system; wind generation; doubly fed induction generator; transient stability; damping character

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0007-05

0 引言

双馈感应发电机 (DFIG) 已经成为大型风电场主要机型^[1]。虽然 DFIG 与传统笼型电机相比有很多优势^[2-3], 但是, 百万千瓦级双馈式风电场, 对电力系统稳定性的影响不容忽视。文献[3]认为 DFIG 和传统笼型机组对比, 有利于电力系统暂态稳定, 但该文未给出 DFIG 与常规 SG 的对比结果。文献[4]研究了 DFIG 与常规 SG 并列后再经远距离输电线路接入大系统的情形, 用时域仿真法证实 DFIG 没有降低系统稳定性。文献[5]认为风电机组不参与电力系统低频振荡, 风电接入将增强系统阻尼。文献[6]

用特征分析法研究了一个 4 机系统, 得出 DFIG 风电场对附近发电机参与的模式有正阻尼贡献, 对远方机组的本地模式没有影响; 在大扰动下, 不同场景对首摆稳定性有正面影响, 也有负面影响。文献[7]认为 DFIG 取代部分常规机组后, 系统总机械惯性减小, 由此提出, 通过计算特征值对惯性常数的灵敏度, 来判断 DFIG 对系统影响的性质。文献[8]认为 DFIG 风电场能改善电力系统稳定性。文献[9]则认为 DFIG 对临近同步电机的阻尼有利, 而对大扰动下暂态稳定不利。

DFIG 对电力系统稳定的影响是有利还是不利? 以往文献给出的结论并不完全一致, 其原因是使用的模型和研究方法不同导致的。因此, 为深入认识 DFIG 风电场对系统稳定的影响, 还需多角度深入研究。本文研究方法以往不同之处: ①从

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2004CB217904)

DFIG 功角动态行为角度, 揭示 DFIG 对 SG 影响的机理; ②对于矢量控制下 DFIG, 使用相量模型是不准确的。故本文使用了三相瞬时值模型, 并详细模拟了双闭环控制结构。

1 DFIG 功角的含义

功角是常规电力系统稳定分析中重要的基础概念。对于常规同步发电机, 功角有“时间”和“空间”两层含义: ①表达发电机内电势相位信息; ②体现转子的物理位置。DFIG 的功角只取第①层含义。在单机无穷大系统(图 1(a))中, 文献[10]将内电势 \vec{E}_0 和 q 轴夹角 δ' 定义为功角(图 1(b))。但根据电力系统稳定分析的习惯^[11], 本文将功角 δ 定义为内电势 \vec{E}_0 无穷母线电压 \vec{V}_s 的夹角。

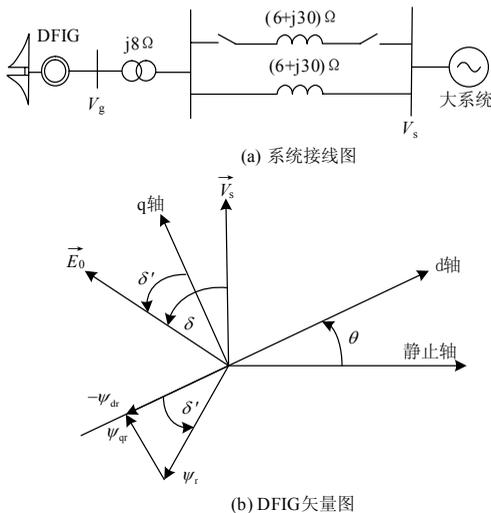


图 1 单机 (DFIG) 无穷大系统及其矢量图

Fig.1 DFIG-based infinite system and vector diagram

2 DFIG 功角的快变特性

虽然 DFIG 在功角概念上可以与 SG 统一起来, 但是两种电机的功角动态行为相差甚远。SG 功角动态受转子惯性时间常数 (H_j) 影响很大, 大型 SG 的 $2H_j$ 一般在 5~10 s 范围^[11]。因此, 即使在极端故障(电磁转矩降为 0)下, SG 的功角由初始值摇摆到临界值也需要 1 s 左右的时间。可以说 SG 功角动态是“慢变”的, 这正是常规电力系统抵御大扰动最重要的保证。然而, DFIG 的功角动态是“快变”的, 分析如下。

DFIG 的广义派克方程如式 (1) 所示^[12]:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} & u_{qs} & u_{dr} & u_{qr} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} r_s + l_s p & -\omega_l l_s & l_m p & -\omega_l l_m \\ \omega_l l_s & r_s + l_s p & \omega_l l_m & l_m p \\ l_m p & -\omega_l l_m & r_r + l_r p & -\omega_l l_r \\ \omega_l l_m & l_m p & \omega_l l_r & r_r + l_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: l_s 、 l_r 和 l_m 是定、转子自感和互感; r_s 、 r_r 是定、转子电阻; ω_l 和 ω_s 是同步转速和转差; u_{dr} 、 u_{qr} 是励磁电压; u_{qs} 、 u_{ds} 是定子电压; p 是微分算子。

对于 DFIG, 试图建立象传统 SG 那样以功角为状态变量的动态方程是不简洁的。为了建立状态变量与功角的联系, 将转子电流替换为定、转子磁链表达, 且认为定子磁链近似恒定, 忽略其动态方程, 则方程 (1) 转化为式 (2)。

$$pl'l_s \psi_{dr} = -l_r r_s \psi_{dr} + l_m r_r \psi_{ds} - l_2 u_{dr}^* \quad (2)$$

$$pl'l_s \psi_{qr} = -l_r r_s \psi_{qr} + l_m r_r \psi_{qs} - l_2 u_{qr}^* \quad (3)$$

式中: $l_2 = l_m^2 - l_s l_r$; u_{dr}^* 、 u_{qr}^* 是引入前馈补偿后代替 u_{dr} 、 u_{qr} 的新控制量。式 (2) 和式 (3) 表明, 在故障扰动下, ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 会产生时间常数 $\tau = l' / r_r$ (约为数 10 ms) 的快变行为。根据转子磁链和内电势的对应关系, ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 分别对应内电势的 q 和 d 轴分量。由于 DFIG 引入了 dq 轴解耦调节^[2], 当出现其中一个轴向的过度调节时, 必然引起功角的突变。

3 功角动态特性及其影响因素

3.1 坐标定向方法对功角动态特性的影响

DFIG 的坐标定向方法有多种, 如定子电压、定子磁链、定子电流、气隙磁链和转子磁链等^[13]。最常用的是定子电压和定子磁链定向方法^[14-15], 本文将比较这两种方法的功角特性。考察单机无穷大系统(图 1(a)), DFIG 参数见文献[15]。设 $t=0.8$ s 时发生单回断线故障, 分别考察不同故障清除时刻 t_c 下的功角动态响应。图 2(a) 是 $t_c=0.86$ s 时的功角暂态曲线。在定子磁链定向条件下, 功角最大达到 71° ; 以定子电压定向时达到 69° 。图 2(b) 是 $t_c=0.88$ s 时的功角响应。在定子磁链定向条件下, 功角最大达到 86° ; 以定子电压定向时达到 80° 。图 2(c) 是 $t_c=0.9$ s 时的功角响应。定子磁链定向条件下功角失去稳定; 定子电压定向时功角达到 97° , 仍可以保持稳定。由以上可得出结论: ①当扰动强度不太大时, 两种坐标定向条件下的功角动态行为差别很小; 随着扰动强度的增大, 功角动态过程差异增加, 扰动强度达到一定程度时, 定子磁

链定向下的功角首先失稳。定子电压定向方法有较好的抗扰能力; ②持续 0.1 s 的一回断线扰动并不算严重故障 (对常规电厂而言), 然而对于 DFIG, 即使在定子电压定向条件下, 功角仍然由 39.6° 快速跃变到 97° , 功角对扰动非常敏感; ③单机 (DFIG) 无穷大系统的功角曲线是“不规则”的, 不具有常规 SG 的 (衰减) 正弦形状。

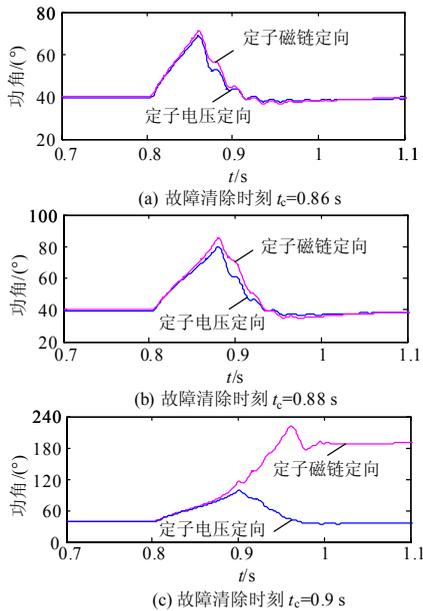


图 2 基于两种坐标定向方法的功角响应

Fig.2 Response of angle based on two orientation methods

3.2 励磁参数对功角动态特性的影响

DFIG 励磁变频器采用双闭环控制策略^[15], 控制器参数很多。本文仅研究功率控制环、电流控制环增益和控制器限幅对功角特性的影响。

设 $t=0.8$ s 时发生断线故障, $t=0.91$ s 故障清除, 研究励磁系统参数不同取值对功角动态响应的影响, 如图 3 (a)。参数 1: $cp=cq=0.003$, $kp=kq=0.12$; 参数 2: $cp=cq=0.003$, $kp=kq=0.1$; 参数 3: $cp=cq=0.002$, $kp=kq=0.1$; 以上 3 组参数的 PI 调节器输出限幅均取 ± 200 。cp 和 cq 分别是有功、无功调节回路的外环增益; kp 和 kq 分别有功、无功调节回路的内环 (电流环) 增益。比较参数 1 和参数 2 下的功角曲线可看出, 电流环增益越大, 功角上升速度越大; 比较参数 2 和参数 3 下的功角响应可知, 功率环增益越大, 功角上升速度越大, 而且恢复初值越快; 功率环增益较小时, 虽然功角幅度小, 但动态过程持续时间长。图 3 (b) 是同在参数 3 条件下, 而考虑限幅不同取值下的功角响应。可以看

出, 限幅越小, 功角变化越小。

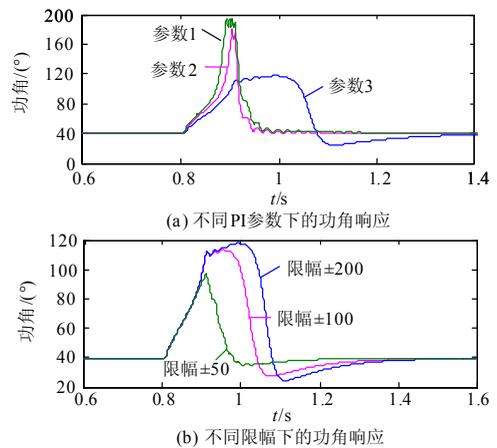


图 3 励磁系统参数对功角动态特性的影响

Fig.3 Influence of excitation parameter on dynamic angle character

3.3 DFIG 和 SG 功角响应的对比分析

为了认识 DFIG 功角动态行为的特点, 比较两个相同容量的 DFIG 和 SG 在相同条件下的功角受扰曲线, 如图 4。DFIG 功角摆幅为 80° , 而 SG 最大摇摆角和转子惯性有关, 当惯性时间常数 $H_J=3$ s 时, 摇摆角为 56° ; 当 $H_J=1.5$ s 时, 摇摆角为 51° 。可以看出, 在同样扰动下, DFIG 与 SG 相比, 功角变化快速而幅度大。DFIG 的这种功角“剧变”特性可能导致极其严重的后果, 给 DFIG 大规模并网带来巨大挑战。

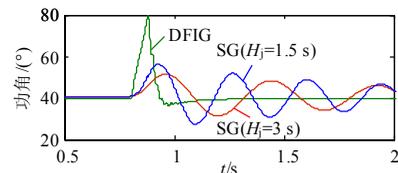


图 4 DFIG 与 SG 的功角响应对比

Fig.4 Angles response comparison between DFIG and SG

4 并列运行的 DFIG 和常规 SG 的交互作用

4.1 研究对象

在考察 DFIG 对电力系统稳定性影响时, 人们往往以常规 SG 为参考。希望知道同一节点接入 DFIG 风电场和接入相同容量的常规 SG 相比, 哪种情况稳定性更好? 图 5 (a) 是由 2 台常规 SG 经远距离输电组成的系统; 图 5 (b) 则是将 G2 替换为同容量的 DFIG, 系统其他条件均同图 5 (a)。下面是两种情形的对比研究。

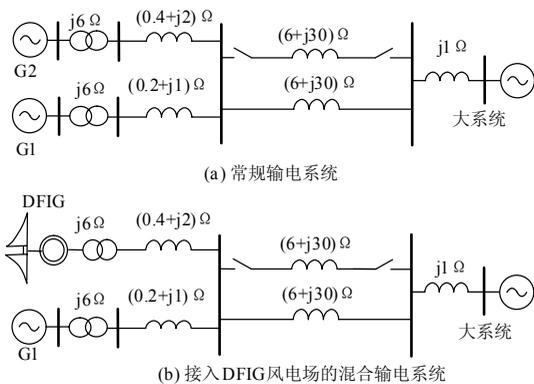


图 5 示例系统

Fig.5 Illustrative power systems

4.2 异种电机功角曲线的两种交点类型

根据传统动态电力系统研究经验，当图 5 (a) 系统受到扰动后，G1 和 G2 的功角运动具有同调性，表现在两条功角摇摆曲线近乎“平行”，即功角曲线无交点。然而，通过对含两种电机的混合系统（图 5 (b)）的研究发现，同调性往往不复存在，两类电机的功角曲线可能有交点。而且，通过对交点的分析和类型划分，可望对认识 DFIG 与 SG 的动态交互作用提供有益启示。

假设 DFIG 和 SG 的受扰功角曲线如图 6 (该图 为示意图)。根据交点的不同性质，本文定义两种交点类型：①主动交越；②被交交越。主动交越是 指 DFIG 功角 (δ_D) 和 SG 功角 (δ_S) 在扰动后， δ_D 较 δ_S 上升速度大而出 现的交点 (如 A 点)；或者在回摆过程中 δ_D 较 δ_S 下降速度大 (如 B 点)。被 动交越是 指扰动后 δ_S 较 δ_D 上升速度大而出 现的交点 (如 C 点)；或者在回摆过程中 δ_S 较 δ_D 下降速度 大 (如 D 点)。因此，对于主动交越的交点处，有 $|d\delta_D/dt| > |d\delta_S/dt|$ ；对于被 动交越的交点处，有 $|d\delta_D/dt| < |d\delta_S/dt|$ 。

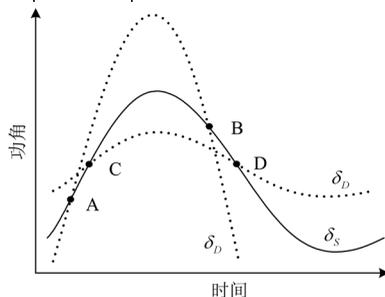


图 6 功角曲线的两类交点

Fig.6 Two types of angle curve crosses

从物理意义上可以推断：当 DFIG 与 SG 并列

运行时，若受扰后出现主动交越，则 DFIG 将使 SG 功角摆幅增大，降低系统暂态稳定性。若出现被动交越，则 DFIG 可使 SG 功角摆幅减小，提高系统暂态稳定性。

以上推断也可以根据发电机功率特性来说明：对于图 5 (b) 系统，设发生断线故障，在故障后 G1 加速期间 Δt 内，G1 的电磁功率可表示为^[16]：

$$P_e = \frac{E_s^2}{x_{11}} + \frac{E_s V}{x_{12}} \sin \delta_1 + \frac{E_s E_D}{x_{13}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (4)$$

其中： E_s 、 E_D 和 V 分别是 G1、DFIG 和无穷大母线的内电势或电压，并假设其恒定； δ_1 和 δ_2 分别是 G1 和 DFIG 的功角； x_{11} 、 x_{12} 和 x_{13} 是故障期间的自阻抗和转移电抗。考察式 (4) 第 3 项，有三种情况：①若 δ_1 与 δ_2 平行，则该项保持不变；②若发生主动交越，该项持续减小；③若发生被动交越。该项持续增加。所以，以情况①为基准，情况②的电磁功率小而导致加速转矩大，不利于 G1 首摆稳定；情况③的电磁功率大而造成加速转矩小，有利于 G1 首摆稳定。

4.3 大扰动下的首摆稳定性

设图 5 (b) 系统的双回输电线在 $t=0.8$ s 时断开一回， $t=1$ s 时重合。图 7 是该系统的受扰功角曲线。可以看出，在故障前 DFIG 的功角小于 G1 的功角，而在 0.8 s 受到扰动后，DFIG 功角增长较快，在 1.05 s 时超过了 G1，出现一次主动交越。在主动交越的过程中，DFIG 与 G1 发生了交互作用。由于 G1 和 DFIG 电气联系紧密、耦合性强，DFIG 功角快速增大必然“拉动”G1 的功角一起增大，使得 G1 的首摆角度增大，不利于 G1 的暂态稳定。

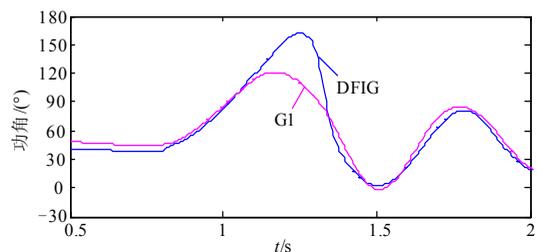


图 7 DFIG 与 SG 并列运行功角摇摆曲线

Fig.7 Angle swing curves as parallel operation of DFIG and SG

为了和常规输电系统对比，对图 5 (a) 系统做相同故障下的暂态分析，图 8 是相应的功角摇摆曲线。G1 和 G2 的功角曲线具有平行性，没有交点。由图 7 和图 8 可以看出，当 G1 和 G2 并列运行时，受扰后 G1 最大摇摆幅度为 89° ；当 G1 和 DFIG 并列且受到同样扰动后，G1 最大摇摆幅度达到 121° 。可见，DFIG 在常规双闭环控制下，对系统

抵御大扰动的能力有削弱作用。

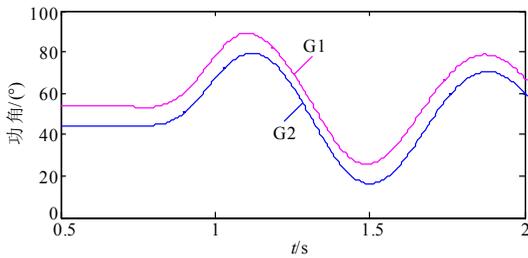


图 8 常规输电系统功角摇摆曲线

Fig.8 Angle swing curves of conventional power transmission system

为了更全面地认识 DFIG 的接入对系统暂态稳定性的影响, 通过多次时域仿真得到不同控制参数下的稳定极限(用故障的极限清除时间量度), 如表 1。由表 1 可见, 控制参数对稳定极限有一定影响, 较小的控制器限幅有利于防止过度调节, 对暂态稳定有利。同时还计算了图 5 (a) 系统相同故障的极限清除时间为 0.46 s。可见, DFIG 替代 SG 后, 系统的暂态稳定性是显著降低的。

表 1 各种控制参数组合下极限清除时间

Tab.1 Critical clearing time based on different control parameters

	参数 1	参数 2	参数 3
限幅±50	0.21 s	0.23 s	0.22 s
限幅±100	0.20 s	0.21 s	0.20 s
限幅±200	0.20 s	0.21 s	0.20 s

4.4 阻尼特性

阻尼特性属于小扰动稳定性的范畴, 可以用特征分析法研究, 也可以对时域仿真曲线做 prony 分析得到主导特征值。分别对图 7 和图 8 的 G1 功角曲线做 prony 分析得到特征值分别为 $-0.7665 \pm j12.2649$ 和 $-0.3719 \pm j10.0356$ 。可见, DFIG 接入后, G1 的阻尼和频率均增大。阻尼增大的原因仍然可用 4.2 节的判据解释。由图 7 看出, 在首摆以后, 交点性质发生了改变, 主动交越变为被动交越, DFIG 在 1.5 s 以后起到了阻尼 G1 振荡的作用。

5 结论

(1) 对于单机无穷大系统, DFIG 功角动态行为为具有快变特性。无论是采用定子磁链定向还是定子电压定向, 功角动态行为相差不大, 但后者的抗大干扰能力好于前者。矢量控制下励磁调节参数对功角动态行为有一定影响。如何优化调节参数值得进一步研究。

(2) 对于 DFIG 与常规 SG 并列运行情形, 扰

动后功角运动可能没有同调性, 两种电机的功角摇摆曲线有多个交点。根据交点的交越性质可判断 DFIG 对 SG 的稳定性影响。

(3) 大扰动下, 在 SG 的首摆期间, 交点类型是主动交越, DFIG 的接入削弱了首摆稳定性; 在后续摇摆过程中, 交点类型是被动交越, DFIG 对系统有正阻尼作用。因此, 对于双馈风电场与常规电站“打捆”的输电系统, 风电场一方面增强了系统阻尼, 同时可能降低了系统暂态稳定性。

参考文献

- [1] 阿赫玛托夫. 风力发电用感应发电机[M]. 刘长浔, 王伟胜, 等, 译.北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 樊艳芳, 晁勤, 高瑜. 大型双馈式变速恒频发电机组对电网影响仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 30-37.
FAN Yan-fang, CHAO Qin, GAO Yu. Simulation of influence of large double-fed variable speed wind turbine into grid[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 30-37.
- [3] 赵宇, 郭清滔, 王奔, 等. 基于变结构控制的交流励磁变速恒频风力发电机励磁控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 12-23.
ZHAO Yu, GUO Qing-tao, WANG Ben, et al. Research of AC excited VSCF wind power generator excitation control system based on variable structure control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 12-23.
- [4] Muljadi E, Butterfield C P, Parsons B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Trans on Energy Converters, 2008, 22 (1): 29-35.
- [5] Slootweg J G, Kling W L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations[J]. Elect Power Syst Res, 2003 (67): 9-20.
- [6] RUEDA J L, SHEWAREGA F. Impact of large scale wind power integration on small signal stability[EB/OL]. <http://www.uni-due.de/ean/downloads/papers/rueda2009a.pdf>
- [7] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1426-1434.
- [8] 闫广新, 吐尔逊, 晁勤. 交流励磁双馈风力发电机组的稳定性仿真分析[J]. 继电器, 2007, 35(14): 7-9.
YAN Guang-xin, TUERXUN, CHAO Qin. Analysis of simulation of stability of AC excited double-fed wind generator[J]. Relay, 2007, 35(14): 7-9.

(下转第 17 页 continued on page 17)

- shedding under vulnerable operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4) : 1199-1205.
- [9] 朱旭凯, 刘文颖, 杨以涵. 基于协同学思想的电网连锁反应故障预防模型[J]. 电网技术, 2007, 31 (23) : 62-67.
ZHU Xu-kai, LIU Wen-ying, YANG Yi-han. A precautionary model of power grid cascading failure based on synergetic theory[J]. Power System Technology, 2007, 31 (23) : 62-67.
- [10] 杜正旺, 哈恒旭, 宋扬, 等. 基于灵敏度-补偿法的电力网络开断潮流新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 103-107.
DU Zheng-wang, HA Heng-xu, SONG Yang, et al. New algorithm based on the sensitivity and the compensation methods for line-outage problem of power network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16):103-107.
- [11] 朱旭凯, 刘文颖, 杨以涵. 电网连锁故障演化机理与博弈预防[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (5) : 29-33.
ZHU Xu-kai, LIU Wen-ying, YANG Yi-han. Evolution mechanism and preventing strategies for cascading failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (5) : 29-33.
- [12] 杨明玉, 田浩, 姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9):1-5.
YANG Ming-yu, TIAN Hao, YAO Wan-ye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9):1-5.
- [13] 施莉, 赵东成, 杨明玉. 关于继电保护系统中隐形故障的探讨[J]. 继电器, 2004, 32 (5) :66-69.
SHI Li, ZHAO Dong-cheng, YANG Ming-yu. Discussion on hidden failures in relay protection[J]. Relay, 2004, 32 (5) :66-69.
- [14] 陈为化. 基于风险的电力系统静态安全分析与预防控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Wei-hua. Risk-based security analysis and preventive control in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [15] 付蓉, 王蓓蓓, 李扬, 等. 输电网络约束下发电商的市场力行为分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (5) : 6-11.
FU Rong, WANG Bei-bei, LI Yang, et al. Analysis of market power behavior of electricity suppliers under network constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (5) : 6-11.

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-06-03

作者简介:

付蓉 (1974-), 女, 副教授, 博士后, 研究方向为复杂电力网络安全稳定控制; E-mail: furong@njupt.edu.cn

蒋国平 (1966-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为复杂网络分析与稳定控制; E-mail: jianggp@njupt.edu.cn

王保云 (1964-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为网络信息获取与控制。

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [9] Elkington K, Valerijs Knazkins V, Ghandhari M. On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1477-1484.
- [10] Hughes F M, Lara O A, Jenkins N, et al. Control of DFIG-based wind generation for power network support[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20 (4) : 1958-1966.
- [11] Kundur P. Power system stability and control[J]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [12] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] 吴胜, 黄声华, 周理兵, 等. 双馈电机交直交控制系统仿真分析[J]. 华中科技大学学报, 2003 (1): 80-83.
WU Sheng, HUANG Sheng-hua, ZHOU Li-bing, et al. Analysis of double-fed machine with the AC/ DC/ AC control strategy and its simulation[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2003 (1): 80-83.
- [14] Chondrogiannis S, Barnes M. Stability of doubly-fed induction generator under stator voltatge orientated vector control[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2 (3): 170-180.
- [15] 郭金东, 赵栋利, 林资旭, 等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (6): 1-6.
GUO Jin-dong, ZHAO Dong-li, LIN Zi-xu, et al. Research of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (6): 1-6.
- [16] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

收稿日期: 2010-02-28; 修回日期: 2010-06-25

作者简介:

郝正航 (1972-), 男, 博士生, 副教授, 研究方向为电力系统稳定和风力发电; E-mail: haozhenghang@163.com

余贻鑫 (1936-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事电力系统安全性与稳定性、智能电网和风力发电等领域的研究。