

# 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述

谭 谨, 王晓茹, 李龙源

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对风电并网对电力系统带来的小扰动稳定性问题, 从对小扰动稳定性的影响和风机附加阻尼控制两方面对该领域的最新进展进行了综述。简述了小扰动稳定性的相关概念, 介绍了风电机组的类型和模式。将目前的研究方法归纳为两类: 基于确定性方法和概率分析方法, 并分析指出了不同类型的风电机组对小扰动稳定性的影响及存在的问题。综合讨论了风机附加阻尼控制器提高系统阻尼的方法, 提出了该领域需进一步开展的工作。

**关键词:** 电力系统; 并网风电; 小扰动稳定; 阻尼控制; 电力系统稳定器

## A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration

TAN Jin, WANG Xiao-ru, LI Long-yuan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This paper reviews the latest development of the impact of the large amount of integrated wind power on small signal stability (SSS) of power systems and the auxiliary control strategies to improve SSS. Firstly, the basic concepts of SSS are illuminated. And different types of the wind turbines and the related modes are introduced. Secondly, the study methods are classified into two categories: determined analysis-based method and probabilistic analysis method. And the impacts of various wind turbines on SSS of power systems are analyzed. Then the auxiliary controllers of wind turbines to improve the damping of power systems are summarized and discussed. Finally, the further work is proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50937002).

**Key words:** power systems; integrated wind power; small signal stability; damping control; power system stabilizer

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0015-09

## 0 引言

安全稳定一直是电力系统运行的核心问题。在现代电网互联和超特高压远距离输电的趋势下, 大电网区域间和区域内的弱阻尼或负阻尼问题十分突出。其中, 低频振荡已成为影响电力系统稳定性以及远距离传送容量的重要因素, 严重威胁联网系统的安全运行<sup>[1-5]</sup>。

随着能源问题的日益突出, 风电作为最具有开发潜力的可再生能源在世界范围内发展迅速<sup>[6-7]</sup>。大规模风电并网后对系统的小扰动稳定性的影响值得研究。一方面, 为接纳大规模风电的并网, 电力系统的结构、潮流和开停机方案将做出相应调整, 这将对传统电力系统安全稳定运行产生根本影响, 从而影响到

系统的小扰动稳定性<sup>[8-9]</sup>。另一方面, 变速风电机组本质上是一个具有波动性和随机性的输入, 通过电力电子设备并网与电网非同步运行的复杂机电系统, 这与传统同步发电机的发电特性、运行特性和控制机理有很大不同。因此, 有必要根据风力发电系统自身的特点, 从影响和控制系统阻尼方面, 对大规模风电并网后系统小扰动稳定性问题进行全面的研究。

本文首先简要阐述了传统电力系统中的小扰动稳定的基本概念, 根据近年文献, 综述了风电并网对系统小扰动稳定性研究的最新动向和进展。从并网风电对电力系统小扰动稳定的影响和风机附加阻尼控制方法等方面逐一介绍, 并进行了分析。最后, 提出了该领域有望进一步开展的研究工作。

## 1 小扰动稳定性相关概念简述

根据美国电气与电子工程师协会和国际大电

网组织联合工作组 (IEEE/CIGRE) 对电力系统稳定性的定义和分类, 小扰动稳定性是指当电力系统受到小扰动时, 仍有保持功角同步的能力<sup>[10-11]</sup>。在电力系统中, 不改变系统结构的扰动通常被称为“小扰动”, 如: 负载投切、负荷波动、参数的缓慢变化等。电力系统时刻遭受小扰动, 因此保证电力系统正常运行的首要条件是小扰动稳定。

小扰动稳定性问题产生机理可分为: 负阻尼机理<sup>[12]</sup>、强迫共振机理<sup>[13]</sup>、非线性理论机理<sup>[14]</sup>等。最常用的分析方法有特征值分析法和时域仿真法; 另外, 近年来基于非线性理论的正规形等方法、基于系统实测信号的分析方法和基于广域测量信息分析方法也发展迅速<sup>[15-16]</sup>。

功率、功角等物理量的振荡是电力系统是否稳定的外在表现形式。按振荡特性可分为<sup>[11]</sup>: 区域内振荡, 系统中某一台或一组发电机与区域内其余机组的摇摆模式 (0.7~2 Hz); 区域间振荡, 系统中两组机群间的振荡 (0.1~0.7 Hz)。这两种振荡类型因振荡频率较低, 又称为低频振荡。

## 2 风电系统

### 2.1 风电机组的类型

目前, 市场上的主流风电机组类型可分为以下三类: 恒速异步风力发电机 (Squirrel-cage Induction Generator, SCIG)、双馈异步变速风力发电机 (Double Fed Induction Generator, DFIG) 和永磁同步变速风力发电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)。不同类型风力发电机的结构、控制、并网方式和运行特性均不相同, 故在研究含风电的系统小扰动稳定问题时需逐一讨论。

### 2.2 风电系统的模式

研究并网风电系统的模式及参数对其稳定性的影响, 是进一步研究大规模风电并网对系统小扰动稳定性的基础。

通过对并网 DFIG 进行模式分析, 认为风电系统可能存在四种振荡模式: 次同步振荡模式、超同步振荡模式、机电模式和轴系振荡模式<sup>[17]</sup>。其中, 轴系振荡是风机系统中存在的一种极具风险性的振荡模式, 由于其振荡频率与电力系统的低频振荡频率相近, 可能给系统稳定带来不利的影 响。正常运行时, SCIG 的转差对轴系振荡有一定的阻尼作用, 然而 DFIG 和 PMSG 型风机的阻尼作用较小, 故需附加控制器来阻尼轴系振荡<sup>[18-19]</sup>。

研究风电系统模式的基本方法是首先选择所关注的时间尺度, 建立一般性的非线性模型, 然后线性化得到系统的状态方程。在分析风机系统模式

的基础上, 研究不同的控制器参数、电气参数、机械参数、运行点和电网强度对系统模式的影响<sup>[20-24]</sup>。文献[25]通过定义灵敏度指标评估了风电系统的抗扰动能力。文献[26]从稳定域的角度, 引入霍普分叉理论, 研究指出存在风速和转速导致 DFIG 系统不稳定的临界点。

上述研究在建立了风机系统的小信号模型的基础上, 分析了不同类型风机的振荡模式, 为理解含风电的系统小扰动稳定问题有着重要的意义。

## 3 并网风电对系统小扰动稳定性的影响

风电发展初期主要存在于配网中, 其装机容量和规模较小, 不会威胁到大电网的安全稳定性。近年来, 由于风电场装机规模不断增大, 并网电压等级不断升高, 风电场对电力系统的稳定性产生的影响值得探讨。

### 3.1 基于确定性方法的研究

并网风电对系统小扰动稳定性的分析多采用基于某平衡点线性化模型的特征值分析法<sup>[27-31]</sup>, 研究不同的风机类型、控制策略、渗透容量和运行方式等因素对全系统状态矩阵的影响, 并通过分析状态矩阵的振荡模式、振荡频率、振荡阻尼、参与因子、灵敏度系数等要素来确定风电系统对电力系统阻尼的影响。

2003 年, Slootweg 首次关注了并网风电机组对电力系统小扰动稳定性的影响。此后, 研究者一致认为 SCIG 的并网会提高系统的阻尼, 且并网容量越大, 对区域间和近端区域内振荡的阻尼越明显, 而对远端区域内振荡影响效果不明显<sup>[31]</sup>。与之不同的是, DFIG 和 PMSG 对系统阻尼的影响会因并网地点、渗透容量和系统结构等各方面因素的不同而得到不同的结论<sup>[29, 31-32]</sup>。由于变速风机通过电力电子变换器非同步并网, 它们对系统机电模式阻尼的影响, 主要通过三个方面实现<sup>[30]</sup>: 一、风机的控制对其附近大型同步电机阻尼转矩的影响; 二、风力发电机会替代部分传统同步发电机; 三、由于风电的存在, 改变原来的系统潮流。

由于各国风电并网导则<sup>[33]</sup>对风电场并网点的频率和电压都提出了要求, 因此在风机或风电场中可以通过附加频率或电压控制器来提高风机的并网性能, 而这些附加控制可能对系统阻尼产生影响。风机在电压控制模式下, DFIG 随风电渗透容量的增加使得机电振荡频率升高, 系统的阻尼下降甚至不稳定<sup>[34]</sup>。在风电场控制层面, 文献[35]采用转矩系数法说明了 PMSG 风电场的电压控制对系统阻尼影响较小, 而频率控制器有提高系统区域间和区域内

机电振荡阻尼的作用<sup>[35-36]</sup>。

风力发电机取代同步发电机或改变系统潮流主要与电力系统接纳风电的方式相关。通常接纳方式有以下三种：一是关闭小型的火电厂，即为停机接纳；二是利用旋转备用，减少火电厂出力；三是用新增的风电来满足新增的负荷。从大量实际电网的研究案例来看，系统运行方式、常规机组的开机方式和系统结构等因素对系统阻尼的影响较大<sup>[29, 37-39]</sup>，但其本质是改变系统潮流或结构对阻尼产生的影响。因此，风电容量的增加是否降低系统阻尼，需要针对案例进行研究。

目前的研究大多依托商业软件的小扰动分析包来完成对测试系统或实际简化系统的分析，但由于案例和模型简化程度不同，变速风机控制的复杂性和影响系统阻尼的因素较多，故很难得到统一性结论。因此，有必要在考虑风机控制策略的条件下，对变速风机提供阻尼机理进行深入研究，从理论上揭示风电并网对系统阻尼的影响。

### 3.2 基于概率分析方法的研究

电力系统中概率小扰动稳定分析的主要任务是根据随机不确定性源的概率分布，来确定系统的关键特征值的概率分布，从而反映随机因素对系统稳定性的影响<sup>[13, 40]</sup>。由于风能的随机性，并网后的大规模风电就变成了不确定性源。

对电力系统概率小扰动稳定性的研究方法主要有三种<sup>[41]</sup>：数值方法、分析方法和数值与分析综合方法。近年来，传统的概率分析方法被广泛应用于含风电的电力系统概率小扰动稳定的研究中。考虑风电的概率小扰动稳定分析的流程如图 1 所示。

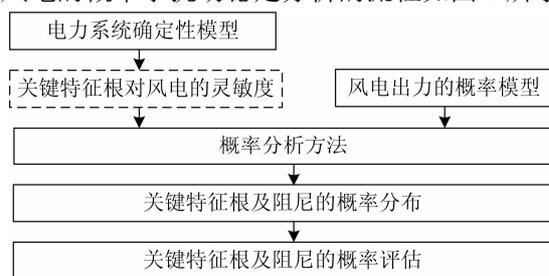


图 1 考虑风电的概率小扰动分析的流程

Fig. 1 Framework of probabilistic analysis of small-signal stability of power systems with wind power

数值方法主要是利用蒙特卡罗模拟等方法生成大量数据对电力系统小扰动稳定进行计算。蒙特卡罗模拟<sup>[42]</sup>、基于拉丁超立方采样的蒙特卡罗模拟<sup>[43]</sup>和准蒙特卡罗模拟<sup>[44]</sup>等方法被引入含风电的电力系统概率小扰动的研究中。文献[45]比较了上述三种方法，认为准蒙特卡罗法要优于前二者。

分析方法主要需结合风电出力的概率模型和关键特征根对风电的灵敏度，利用概率理论来计算电力系统小扰动稳定概率。卜思齐等人提出一种基于 Gram-Charlier 级数展开和系统特征根灵敏度的分析方法来研究风电波动对电力系统小扰动概率稳定性的影响，并用蒙特卡罗模拟方法对该方法的有效性进行了验证<sup>[46]</sup>。与传统分析中常假设随机变量服从正态分布不同，风电的随机波动常用威布尔分布描述。由于传统分析方法中的通用四项级数和一阶泰勒级数展开仅适用于分析近似正态分布的变量，而阶矩方法和 Gram-Charlier 级数展开适用于任意分布的变量<sup>[41]</sup>，因此后两种方法更适用于含风电的概率小扰动稳定的研究。

数值与分析综合方法结合上述两种方法在满足计算精度的同时减少了计算量。文献[47]利用概率配点法进行含风电的电力系统小干扰电压稳定研究，经蒙特卡罗模拟验证后认为该方法简单有效。文献[48]将两点估计法引入含风电的电力系统概率特征值分析，以较少的计算量获取稳定概率信息。

基于上述方法，可研究风速波动、负荷水平、风电渗透率和风电场并网点等因素对系统小扰动稳定的影响<sup>[43, 46]</sup>及风机的电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)的参数整定<sup>[49]</sup>。文献[49]提出含风电系统的小扰动概率评估指标，对比了基于概率分析方法和确定性分析方法得出的 PSS 安装判据，认为根据确定性分析给出的小扰动稳定判据偏保守。

随机概率小扰动分析方法为研究风电并网对系统稳定性的影响提供了新的途径。然而，目前采用的数值方法计算量很大；而分析方法及综合方法的算法较为繁琐，仍需要研究高效简单的解析方法。另外，分析方法结果的精确度主要依赖于对系统中不确定因素概率模型的描述，需针对实际风电场考虑概率模型的合理性。因此，如何在保证结果精确度的同时减少运算量是值得研究的问题。

## 4 附加阻尼控制提高系统的小扰动稳定性

针对系统出现的低频振荡问题可采取两方面对策。一次系统可采用增强网架结构、安装储能类装置或采用直流输电方案等提高系统阻尼的有效措施，但投资成本将大幅增加；二次系统可采用附加阻尼控制，如：在关键同步发电机组上安装 PSS，通过柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)或高压直流输电(High-voltage Direct-current, HVDC)的附加阻尼控制<sup>[16, 50]</sup>等方法，这些方法具有易于工程实现、经

经济效益显著的优势。

当大规模风电渗透到电网中时,运营期待风电机组具有传统同步电机相似的运行特性,从而减少对电网的影响。鉴于机电振荡是由同步发电机转子上的不平衡转矩造成的。因此,可采用附加电气转矩的方法来阻尼机电振荡。在风电系统中可以通过机械控制、有功控制或无功控制来提高系统阻尼。

#### 4.1 机械控制

风电机组可以通过控制桨距角来调节叶片所获取的机械功率。Jauch等人提出将系统频率偏差引入桨距角控制策略,即当系统出现功率缺额,导致频率上升时,调整桨距角来降低风电机组功率输出,从而提高系统阻尼<sup>[51]</sup>。在此基础上,文献[52]提出了一种多输入的模糊逻辑阻尼控制器。但由于风轮机叶片的惯性较大及变桨系统控制的时滞性,该方法在实际中的应用还有待进一步确认。

#### 4.2 有功控制

2006年, Hughes提出DFIG在基于磁链幅值角度的控制模式(Flux Magnitude and Angle Control-FMAC)下,通过附加控制来提高电力系统阻尼,其功能和结构与同步发电机的PSS类似,故称之为风机PSS<sup>[53-54]</sup>。风机PSS的基本结构框图如图2所示。

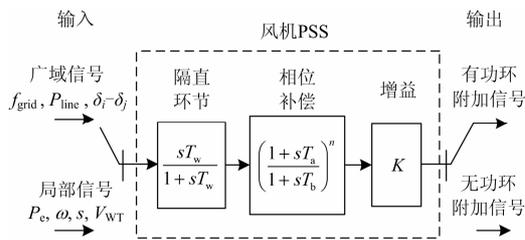


图2 通用风机PSS结构框图

Fig. 2 Scheme of the generic power system stabilizer of a wind turbine system

风机PSS内部结构由隔直环节、相位补偿环节和增益环节组成。输入信号是风电系统可获取的对系统振荡有响应的电气变量,可以是局部信号(如:定子电磁功率 $P_e$ 、转差率 $s$ 或转子转速 $\omega$ ),也可以是广域信号(如:电网频率 $f_{grid}$ 、联络线功率 $P_{line}$ 或同步电机间功角差 $\delta_i - \delta_j$ )。输出信号为风机的有功环或无功环附加控制信号。

基于FMAC的控制模式,文献[54]提出将定子侧电功率作为输入信号引入DFIG转子侧变流器进行控制,该方法可有效控制风电场侧有功振荡,但对抑制区域间振荡效果不明显。

文献[55]进一步考虑了由塔影效应引起的机械

功率波动对DFIG风机PSS性能的影响,比较了采用电网频率、定子功率和转子转速作为输入信号的三种风机PSS,并指出塔影效应使得基于转子转速的风机PSS阻尼性能变差,而对其他两种风机PSS影响较小。

文献[56]基于DFIG动态频率特性的概念,证明了风电场对其接入的电力系统产生阻尼作用的相位和幅值条件,并在此理论上提出一种易于在工程中推广的附加阻尼控制策略。

关于PMSG附加阻尼控制策略,由于其控制目标是保持输出状态不变,则局部变量对系统振荡的响应较小,故多采用广域变量作为输入信号。有学者提出通过电容的充放电或利用风力机转速变化来存储系统的不平衡能量,从而改善PMSG风电机组接入系统的稳定性<sup>[57-58]</sup>。

无论是机械功率控制,还是通过变流器实现对电磁功率的控制,两者本质上都是对有功功率进行直接控制来抑制系统中的功率波动。由于受电容量、风力机转速范围或风机控制策略的限制,风机提供有功来抑制系统振荡的能力还有待进一步研究。

#### 4.3 无功控制

传统电力系统中的无功调节装置在附加阻尼控制时可提高系统阻尼<sup>[59]</sup>。由于变速风电机组具备独立的无功调节能力,故将附加阻尼控制信号引入变速风机的无功控制环也可提高系统阻尼<sup>[60-62]</sup>。

文献[60]将电网频率信号作为风机PSS输入,引入PMSG网侧变流器无功控制环。文献[61]采用根轨迹法设计了一个具有多带通滤波器的PMSG风机PSS,输入信号采用广域功角信号,并将附加控制信号施加在无功功率环。文献[62]提出了以传输线功率作为输入信号的DFIG无功功率环附加阻尼控制策略,研究表明无功功率环附加阻尼控制与有功功率环附加阻尼控制相比,既能减少风机轴系扭矩的振荡幅值,又能较好地抑制区域间振荡。

由于变速风电系统具有快速有功无功控制能力,所以通过有功、无功控制提供系统阻尼均具有响应速度快的优点。然而,目前的风机PSS大多在固定风速下进行设计,未能考虑波动风速对风机PSS性能的影响。风机厂商为使变速风机具备同步发电机的运行特性,提出了通过附加控制使风机具备故障穿越、电压控制和频率控制等能力,而阻尼控制如何与这些附加控制协调配合是将风机PSS推广到工业应用的一个亟需解决的问题。

#### 4.4 风机控制器设计

在风机PSS设计方面,学者从控制技术<sup>[63-64]</sup>、

广域控制<sup>[65-66]</sup>、参数优化<sup>[61, 67-70]</sup>等各方面对其进行了研究,并在抑制多机系统的区域间振荡上取得了好的效果。

离线设计的固定参数阻尼控制器的性能会受电网结构和运行方式等变化因素的影响。随着控制技术的发展,非线性控制、模糊控制等技术被广泛应用于传统阻尼控制器的设计<sup>[71]</sup>。文献[63]提出一种基于多目标非线性优化的有功阻尼控制器来同时抑制轴系振荡和系统的机电振荡。文献[64]提出一种基于概率小信号的鲁棒 DFIG 阻尼控制器,使得阻尼控制器在风速波动范围内性能较好。文献[72]根据能量函数法提出一种非线性阻尼控制器。虽然上述控制技术在鲁棒型风机 PSS 的设计上取得了初步进展,鉴于工业界更倾向于采用结构简单且鲁棒性良好的控制器,故设计风机 PSS 时,需综合协调控制器的复杂度和控制性能。

近年来,广域测量系统(Wide-area Measurement system, WAMS)的出现为电力系统小扰动稳定的分析和控制提供了新的手段。文献[66]通过系统辨识方法建立了风电场有功功率和区域间同步发电机功角差之间的开环传递函数,利用极点配置方法,设计了 DFIG 广域阻尼控制器。若采用 WAMS 信号作为控制的输入信号时,信号的时滞性可能引起闭环系统的不稳定,然而目前基于广域信号的风机 PSS 都尚未考虑信号的传输延时,在下一步研究中可考虑消除广域反馈信号传输过程中积累的时滞对控制效果的影响。

正如传统同步电机的 PSS 设计一样,合理的控制器参数是保证控制器性能的重要因素。在风机 PSS 参数优化方面,除了常规的根轨迹法<sup>[61, 67]</sup>,基于李亚普罗夫理论的多目标非线性优化方法<sup>[68]</sup>、粒子群优化算法<sup>[69]</sup>以及细菌算法<sup>[70]</sup>等被陆续应用到风机 PSS 参数优化上。

目前虽然风机 PSS 的研究进展较快,但由于风机的类型不同以及风机系统控制的复杂性,通过附加控制环节为系统提高阻尼的课题仍有一定的研究空间。例如:变速风机提供阻尼能力的评估、基于广域信号的风机 PSS 的设计,特别是关于风机 PSS 间或风机 PSS 与传统电机 PSS 间的相互影响, PSS 参数的协调整定等问题都仍需进一步研究。

## 5 结论

现代大型电力系统区域互联的趋势使得区域内和区域间的弱阻尼问题愈加突出。随着大规模风电基地在我国的建设,研究风电并网后对系统小扰动稳定影响成为一个重要课题。

从分析的角度来看,传统的特征值分析方法相对完善,但由于变速风电系统的控制复杂,目前研究多基于案例研究,尚无变速风电对系统阻尼影响的确定性结论,所以如何从机理上阐述这一问题仍需深入研究。此外,基于概率分析的方法有望被进一步应用于鲁棒性风机 PSS 的参数选择、风电场选址、含风电的传统 PSS 选址及含风电的系统稳定性评估等领域。

从阻尼控制的角度来看,储能技术、FACTS 和 HVDC 直流调制被广泛应用于系统阻尼控制,阻尼协调控制已是研究的热点问题。而风机 PSS 的加入增加了系统阻尼协调控制的复杂性,以下方面值得开展研究。

1) 若发展风电作为主力能源使用,需采用相当容量的发电能源或储能与风电协调运行。考虑风电场与储能的协调控制来为大型互联电网低频振荡提供阻尼是一个值得探讨的问题。

2) 结合 WAMS 的测量信号,对系统中多种阻尼控制器的安装地点和参数配置进行优化,如:传统同步电机 PSS、风机 PSS、FACTS 阻尼控制和 HVDC 附加控制之间的协调。

3) 由于风电的随机性,因此设计具有自适应性和鲁棒性的风机 PSS 的需求凸显。

随着大规模风电的并网,如何保证系统的小扰动稳定性成为亟待研究的课题。因此,对风电系统进行合理建模、分析和采取有效措施防止低频振荡是十分必要的。同时,随着风机控制技术的发展,风机附加阻尼控制也为抑制低频振荡提供了新途径。

## 参考文献

- [1] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [2] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.  
SHI Hui, ZHANG Yong-jun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [3] 郭权利. 电力系统低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 114-116.  
GUO Quan-li. Low frequency oscillation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 114-116.

- [4] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [5] 陈中, 王海风. 基于“区域阻尼”的互联电网阻尼分析与控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 12-16.  
CHEN Zhong, WANG Hai-feng. Study of analysis and control of damping based on “area-damping” in large-scale interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 12-16.
- [6] 徐乾耀, 康重庆, 江长明, 等. 多时空尺度风电消纳体系初探[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 28-32.  
XU Qian-yao, KANG Chong-qing, JIANG Chang-ming, et al. Preliminary analysis on wind power accommodation system from multiple temporal and spatial scale perspective[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 28-32.
- [7] 李辉, 赵斌, 史旭阳, 等. 含不同风电机组的风电场暂态运行特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 1-7.  
LI Hui, ZHAO Bin, SHI Xu-yang, et al. Simulation study on the transient operational performances of a wind farm including different wind turbine generator systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 1-7.
- [8] Yin M, Ge X, Zhang Y. Major problems concerning China's large-scale wind power integration[C] // Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [9] Sun Y, Wang L, Li G, et al. A review on analysis and control of small signal stability of power systems with large scale integration of wind power[C] // International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010: 1-6.
- [10] Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, et al. Definition and classification of power system stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [11] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [12] Demello F P, Concordia C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(4): 316-329.
- [13] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.  
XUE Yu-sheng, HAO Si-peng, LIU Jun-yong, et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power systems, 2009, 33(3): 1-8.
- [14] 邓集祥, 刘洪波. 多机电力系统非线性振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 68-71.  
DENG Ji-xiang, LIU Hong-bo. Study on nonlinear oscillation in multimachine power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 68-71.
- [15] 贾勇, 何正友. 基于受扰轨迹的低频振荡分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 140-148.  
JIA Yong, HE Zheng-you. Review on analysis methods for low frequency oscillations based on disturbed trajectories[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 140-148.
- [16] 陈刚, 何潜, 段晓, 等. 电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 17-22.  
CHEN Gang, HE Qian, DUAN Xiao, et al. Overview on analysis and control of low frequency oscillation in power systems[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 17-22.
- [17] FAN Ling-ling, ZHU Chan-xia, MIAO Zhi-xin, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [18] Hansen A D, Iov F, Sorensen P, et al. Dynamic wind turbine models in power system simulation tool digsilent[R]. Roskilde: Information Service Department Risø National Laboratory, 2007.
- [19] GENG Hua, XU De-wei. Stability analysis and improvements for variable-speed multipole permanent magnet synchronous generator-based wind energy conversion system[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 459-467.
- [20] Mei F, Pal B. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(3): 728-736.
- [21] 李建军, 吴政球. 考虑感应电机机械暂态过程的风电系统的小扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 14-19.  
LI Jun-jun, WU Zheng-qiu. Small signal analysis of wind power system considering induction motor mechanical transient process[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 14-19.
- [22] 谭谨, 王晓茹, 陈哲. 并网永磁直驱式风电系统的模态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 49-55.

- TAN Jin, WANG Xiao-ru, CHEN Zhe. Modal analysis of a grid-connected direct-drive permanent magnet synchronous generator wind turbine system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 49-55.
- [23] Wu F, Zhang X P, Ju P. Small signal stability analysis and control of the wind turbine with the direct-drive permanent magnet generator integrated to the grid[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(12): 1661-1667.
- [24] 李生虎, 刘正楷, 杨振林. 风电系统中异步电机机电模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 6-11.  
LI Sheng-hu, LIU Zheng-kai, YANG Zhen-lin. Electromechanical modes of induction generators in wind power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 6-11.
- [25] Tabesh A, Iravani R. Small-signal dynamic model and analysis of a fixed-speed wind farm—a frequency response approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 778-787.
- [26] Yang L, Xu Z, Østergaard J, et al. Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2011, 26(1): 328-339.
- [27] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 63-70.  
WANG Chen, SHI Li-bao, YAO Liang-zhong, et al. Small signal stability analysis of the large-scale wind farm with DFIGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 63-70.
- [28] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小扰动稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.  
TANG Hong, WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 38-41.
- [29] Hagstrom E, Norheim I, Uhlen K. Large scale wind power integration in Norway and impact on damping in the Nordic Grid[J]. Wind Energy, 2005, 8(3): 375-384.
- [30] Vowles D J, Samarasinghe C, Gibbard M J, et al. Effect of wind generation on small-signal stability——a New Zealand example[C] // Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [31] Sloopweg J G, Kling W L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67: 9-20.
- [32] 贾宏杰, 王磊. 含大规模风电场的电力系统小扰动稳定性研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 61-69.  
JIA Hong-jie, WANG Lei. Small signal stability analysis of power grid integrated with large-scale wind farm composed of doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 61-69.
- [33] Altin M, Goksu Ö, Teodorescu R, et al. Overview of recent grid codes for wind power integration[C] // International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasso, Romania, 2010: 1152-1160.
- [34] Tsurakis G, Nomikos B M, Vournas C D. Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 190-200.
- [35] Knuppel T, Nieisen J N, Jensen K H, et al. Induced torques on synchronous generators from operation of wind power plant based on full-load converter interfaced wind turbines[C] // European Wind Energy Conference & Exhibition, Brussels, Belgium, 2011: 1-11.
- [36] Fernandez R D, Mantz R J, Battaiotto P E. Potential contribution of wind farms to damp oscillations in weak grids with high wind penetration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(6): 1692-1711.
- [37] Sanchez-gasca J J, Miller N W, Price W W. A modal analysis of a two-area system with significant wind power penetration[C] // Power Systems Conference and Exposition, New York, NY, USA: IEEE, 2004: 1148-1152.
- [38] 张红光, 张粒子, 陈树勇, 等. 大容量风电场对电力系统小干扰稳定和阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 75-80.  
ZHANG Hong-guang, ZHANG Li-zi, CHEN Shu-yong, et al. Influence of large scale wind farms on power system small signal stability and damping characteristic[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 75-80.
- [39] 杨涛, 郑涛, 迟永宁, 等. 大规模风电外送对电力系统小干扰稳定性影响[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 20-25.  
YANG Tao, ZHENG Tao, CHI Yong-ning, et al. Impact of large scale wind power transmission on system small signal stability[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 20-25.
- [40] Burchett R C, Heydt G T. Probabilistic methods for power system dynamic stability studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 695-702.
- [41] Bu S Q, Du W, Wang H F. Probabilistic analysis of

- small-signal stability of power systems—a survey[C] // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), Hangzhou, China, 2012: 1-7.
- [42] Shi L B, Wang C, Yao L Z, et al. Analysis of impact of grid-connected wind power on small signal stability[J]. *Wind Energy*, 2011, 14(4): 518-537.
- [43] Ayodele T R, Jimoh A A, Munda J L, et al. The impacts of intermittent wind generation on network small signal stability considering load variation[C] // Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica), Johannesburg, South Africa: IEEE, 2012: 1-8.
- [44] Huang H Z, Chung C Y, Chan K W, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(3): 3335-3343.
- [45] Singhee A, Rutenbar R A. Why Quasi-Monte Carlo is better than Monte Carlo or Latin Hypercube Sampling for statistical circuit analysis[J]. *IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2010, 29(11): 1763-1776.
- [46] Bu S Q, Du W, Wang H F, et al. Probabilistic analysis of small-signal stability of large-scale power systems as affected by penetration of wind generation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2011, 27(22): 1-9.
- [47] Zheng C, Kezunovic M. Impact of wind generation uncertainty on power system small disturbance voltage stability: a PCM based approach[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 84(1): 10-19.
- [48] Soleimanpour N, Mohammadi M. Probabilistic small signal stability analysis considering wind energy[C] // 2nd Iranian Conference on Smart Grids (ICSG), Tehran, Iran, 2012: 1-6.
- [49] Rueda J L, Colome D G. Probabilistic performance indexes for small signal stability enhancement in weak wind-hydro-thermal power systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2009, 3(8): 733-747.
- [50] 王彤, 马静, 杨奇逊. 交直流互联系统区间振荡广域阻尼控制系统设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(8): 30-37.  
WANG Tong, MA Jing, YANG Qi-xun. Design of wide-area damping control system for inter-area oscillations in AC/DC hybrid power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(8): 30-37.
- [51] Jauch C, Islam S, Sørensen P. Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilization[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(14): 2334-2349.
- [52] Jauch C, Cronin T, Sørensen P. A fuzzy logic pitch angle controller for power system stabilization[J]. *Wind Energy*, 2007, 10(1): 19-30.
- [53] Huhhes F M, Anaya-lara O, 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.
- [54] Huhhes F M, Anaya-lara O, Jenkins N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2006, 21(2): 763-772.
- [55] Huhhes F M, Anaya-lara O, Ramtharan G, et al. Influence of tower shadow and wind turbulence on the performance of power system stabilizers for DFIG-based wind farms[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 519-528.
- [56] 郝正航, 余贻鑫, 曾沅. 改善电力系统阻尼特性的双馈风电机组控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(15): 25-29.  
HAO Zheng-hang, YU Yi-xin, ZENG Yuan. A control strategy for increasing power system damping with wind turbine-driven doubly-fed induction generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(15): 25-29.
- [57] Knuppel T, Nielsen J N, Jensen K H, et al. Power oscillation damping controller for wind power plant utilizing wind turbine inertia as energy storage[C] // Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [58] 王毅, 张祥宇, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组对系统功率振荡的阻尼控制[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(12): 162-171.  
WANG Yi, ZHANG Xiang-yu, LI He-ming, et al. Damping control of PMSG-based wind turbines for power system oscillations[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(12): 162-171.
- [59] 王海风, 李乃湖, 陈珩, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡(上)-理论分析[J]. *中国电机工程学报*, 1996, 16(3): 190-195.  
WANG Hai-feng, LI Nai-hu, CHEN Heng, et al. Static var compensator in damping power system oscillations part I: theoretical analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1996, 16(3): 190-195.
- [60] 张祥宇, 王毅, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组改善系统阻尼的控制技术[J]. *电测与仪表*, 2013, 50(566): 26-31.

- ZHANG Xiang-yu, WANG Yi, LI He-ming, et al. Damping improvement of power system using PMSG-based wind turbine[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013, 50(566): 26-31.
- [61] Adamcayk A, Teodorescu R, Rodriguez P. Control of full scale converter based wind power plants for damping of low frequency system oscillations[C] // *IEEE Power Tech, Trondheim, Norway*, 2011: 1-7.
- [62] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等. 含传输线功率信号的双馈风电场附加阻尼控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(24): 28-33.
- LI Hui, CHEN Hong-wen, YANG Chao, et al. Ancillary damping control strategy for wind farms with doubly-fed induction generators using power signals in transmission lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(24): 28-33.
- [63] Kshatriya N, Annakkage U D, Hughes F M, et al. Optimized partial eigenstructure assignment-based design of a combined PSS and active damping controller for a DFIG[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2010, 25(2): 866-876.
- [64] Huang H Z, Chung C Y. Coordinated damping control design for DFIG-based wind generation considering power output variation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2012, 27(4): 1916-1925.
- [65] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇. 并网型双馈式风力发电系统广域阻尼控制器设计[J]. *高电压技术*, 2011, 37(1): 157-163.
- ZHANG Zi-yong, HU Zhi-jian, LI Yong-hui. Design of wide-area damping controller of grid-tied wind generation system based DFIG[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(1): 157-163.
- [66] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇, 等. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(18): 127-133.
- ZHANG Zi-yong, HU Zhi-jian, LI Yong-hui, et al. Small signal dynamic modelling and additional damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(18): 127-133.
- [67] Miao Z, Fan L, Osborn D, et al. Control of DFIG based wind generation to improve inter area oscillation damping[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2009, 24(2): 415-422.
- [68] Fernandez R D, Battaio P E, Mantz R J. Wind farm non-linear control for damping electromechanical oscillations of power systems[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(10): 2258-2265.
- [69] Mendonca A, Lopes J A P. Robust tuning of power system stabilizers to install in wind energy conversion systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2009, 3(4): 465-475.
- [70] Mishra Y, Mishra S, Fabgxing L, et al. Small-signal stability analysis of a DFIG-based wind power system under different modes of operation[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2009, 24(4): 972-982.
- [71] 汪娟娟, 李鹏, 傅闯. 电力系统广域阻尼控制与工程应用[J]. *电网技术*, 2011, 35(10): 29-35.
- WANG Juan-juan, LI Peng, FU Chuang. Review of research on wide-area damping control and its engineering application[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(10): 29-35.
- [72] Fernandez R D, Mantz R J, Bbttaiotto P E. Linear and non-linear control of wind farms contribution to the grid stability[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11): 6019-6024.

收稿日期: 2013-06-06

作者简介:

谭 谨(1985-), 女, 博士研究生, 研究方向为风电系统及含新能源的电力系统稳定与控制; E-mail: tanjin570111@163.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护和安全稳定控制;

李龙源(1993-), 男, 博士研究生, 研究方向为风电并网技术及含新能源的电力系统稳定与控制。