

DOI: 10.7667/PSPC171316

# 风剪切和塔影效应作用下直驱式风电并网系统虚拟惯量控制

武晓冬<sup>1,2</sup>, 田慕琴<sup>1</sup>, 朱燕芳<sup>3</sup>, 赵巧娥<sup>2</sup>, 刘芳<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 山西大学电力工程系, 山西 太原 030006; 3. 国网山西电力公司调控中心, 山西 太原 030001)

**摘要:** 风剪切和塔影效应使直驱式风电机组成为强迫功率振荡扰动源, 虚拟惯量控制可使风电机组同时具备向系统提供惯量支持和抑制扰动的能力。通过分析虚拟惯量控制中比例-微分环节对系统阻尼、风机轴系扭振和扰动源的影响, 提出了虚拟惯量控制的改进方案。在VIC补偿量中引入风机输出功率给定量和二阶带通滤波器, 实现了比例、微分系数的等效等比增大。算例分析和仿真结果表明, 改进方案在不减少系统阻尼和不降低轴系稳定性的前提下, 提高了虚拟惯量控制对强迫功率振荡抑制的能力。

**关键词:** 虚拟惯量控制; 强迫功率振荡; 系统阻尼; 轴系扭振; 带通滤波器

## Direct-drive wind power integrated system with virtual inertia control considering wind shear and tower shadow effect

WU Xiaodong<sup>1,2</sup>, TIAN Muqin<sup>1</sup>, ZHU Yanfang<sup>3</sup>, ZHAO Qiaoe<sup>2</sup>, LIU Fang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Electric Power Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** Wind shear and tower shadow effect make direct drive wind power become forced power oscillation disturbance sources, and virtual inertia control makes wind power have the capacities of both the inertia support for the grid and the disturbance suppression. This paper presents an improved virtual inertia control though analyzing the system damping, the torsional vibration and the disturbance source affected by the proportional differentiation coefficients. The proportional differentiation coefficients are enlarged equivalently and simultaneously through adding the reference value of the wind power output and a two-order band pass filter in compensation value of virtual inertia control. The results of analysis and simulation in the example show that the disturbance suppression capacity of virtual inertia control is enhanced on the premise of not decreasing the system damping and the torsional stability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1510112).

**Key words:** virtual inertia control; forced power oscillation; system damping; torsional vibration; band pass filter

## 0 引言

随着风电机组单机容量和渗透水平的不断提升, 由风剪切和塔影效应产生的强迫功率振荡已不能忽视。由于振荡频率在1 Hz左右, 更容易接近区域间振荡频率, 成为引发电力系统共振型低频振荡的潜在因素<sup>[1-6]</sup>。治理的最好办法是找到振荡源并抑

制它, 一般可通过转速前馈补偿的方法实现, 补偿量可通过发电机电磁转矩、发电机输出功率、变流器直流侧电压或系统频率等计算得到<sup>[7-9]</sup>。

为了建设“友好型”风机, 虚拟惯量控制(Virtual Inertia Control, VIC)成为人们的研究方向之一, 主要集中于风电机组向系统提供惯量支持的能力、风电机组与同步发电机组的协同控制、风机轴系的扭振分析以及VIC引入负阻尼的预防等<sup>[10-20]</sup>。VIC利用比例-微分(PD)环节建立起系统频率和风机转速之间的补偿通道, 为强迫功率振荡的抑制提供了可能。PD环节对强迫功率振荡有一定的影响, 其中微分

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(U1510112); 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室(太原理工大学)开放基金资助项目(MEI2015-5)

系数决定着抑制效果,但微分系数的选择又会受到系统阻尼和风机轴系扭振的限制。

本文以直驱式风电并网系统为研究对象,旨在实现满足系统阻尼和风机轴系扭振的限制下,使VIC在向系统提供惯性支持的同时,有效抑制风剪切和塔影效应产生的强迫功率振荡。文中详细分析了PD对限制条件的影响,针对微分系数引起的系统阻尼减小和轴系稳定性下降,提出了在VIC补偿量中引入风机输出功率给定量和二阶带通滤波器的改进控制方案,实现了PD系数的等效等比增大,在不减少系统阻尼和不降低轴系稳定性的前提下,有效抑制了强迫振荡功率。算例的时频域分析进一步证明了该改进方案的有效性。

## 1 问题的提出

### 1.1 系统模型

直驱式风电并网系统虚拟惯量控制简化模型如图1所示,由同步发电机组、直驱式风力发电机组、负荷和控制系统组成<sup>[13]</sup>。

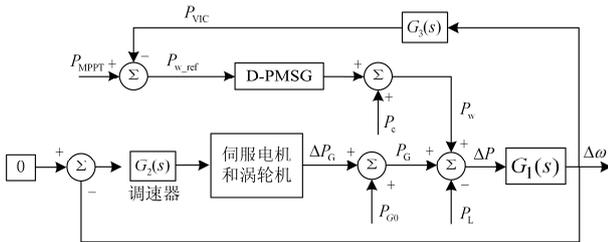


图1 直驱式风电并网系统虚拟惯量控制简化模型

Fig. 1 Simplified model of direct-drive wind power integrated system with virtual inertia control

系统频率的变化是由负荷和发电机的不平衡功率所导致,在无VIC时,系统频率变化的速度取决于同步发电机组转子的机械惯性,可用一阶惯性环节表示,不平衡功率和频率可由式(1)一式(3)表示。其中 $\Delta P$ 为不平衡功率, $P_G$ 和 $P_w$ 分别为同步发电机组和直驱式风力发电机组输出的有功功率, $P_L$ 为负荷吸收的有功功率, $\Delta\omega$ 为系统频率的变化量, $H$ 为系统惯性时间常数, $D$ 为负荷阻尼常数<sup>[15]</sup>。

$$\Delta\omega = G_1(s)\Delta P \quad (1)$$

$$\Delta P = P_G + P_w - P_L \quad (2)$$

$$G_1(s) = \frac{1}{2H + D} \quad (3)$$

同步发电机组主要由调速器、伺服电机和涡轮机组成。本文将调速器模型简化为一个同步调速器,如图中 $G_2(s)$ 所示<sup>[12]</sup>。由于伺服电机和涡轮机的惯性时间常数较小,忽略该惯性环节<sup>[13]</sup>。此时同步发

电机组的数学模型可由式(4)一式(6)表示。其中, $P_{G0}$ 和 $\Delta P_G$ 分别表示同步发电机组有功功率的计划值和补偿量, $k_{p1}$ 和 $k_i$ 分别为同步调速器的比例积分系数。

$$P_G = P_{G0} + \Delta P_G \quad (4)$$

$$\Delta P_G = -G_2(s)\Delta\omega \quad (5)$$

$$G_2(s) = k_{p1} + \frac{k_i}{s} \quad (6)$$

直驱式风力发电机组由风力机、轴系、永磁同步发电机、全功率变流器以及并网变压器组成。由于永磁同步发电机和全功率变流器的惯性时间常数较小,忽略该惯性环节<sup>[13]</sup>。文献[1-3]阐述了风剪切和塔影效应导致风力机械转矩强制振荡,并通过轴系传递至永磁同步发电机,最终形成强迫功率振荡的详细过程,本文不再赘述,仅将该振荡功率视为周期性扰动量。故有、无VIC时,直驱式风力发电机组的数学模型可分别由式(7)和式(8)一式(10)表示。其中: $P_{MPPT}$ 和 $P_{w\_ref}$ 分别为直驱式风电机组最大功率跟踪值及输出功率给定量, $P_c$ 为风剪切和塔影效应引起的强迫振荡功率, $P_{VIC}$ 为VIC的补偿量, $k_{p2}$ 和 $k_d$ 分别为PD比例微分系数。

$$P_w = P_{MPPT} + P_c \quad (7)$$

$$P_w = P_{MPPT} - P_{VIC} + P_c \quad (8)$$

$$P_{VIC} = G_3(s)\Delta\omega \quad (9)$$

$$G_3(s) = k_{p2} + k_d s \quad (10)$$

### 1.2 PD系数对限制条件的影响

联立式(1)一式(7),可得无VIC时系统不平衡功率和各输入量之间的关系,如式(11)和式(12)所示。

$$\Delta P = \Phi_1(s)(P_{G0} + P_{MPPT} + P_c - P_L) \quad (11)$$

$$\Phi_1(s) = \frac{2Hs^2 + Ds}{2Hs^2 + (D + k_{p1})s + k_i} \quad (12)$$

联立式(1)一式(6)和式(8)一式(10),可得有VIC时系统不平衡功率和各输入量之间的关系,如式(13)和式(14)所示。

$$\Delta P = \Phi_2(s)(P_{G0} + P_{MPPT} + P_c - P_L) \quad (13)$$

$$\Phi_2(s) = \frac{2Hs^2 + Ds}{(2H + k_d)s^2 + (D + k_{p1} + k_{p2})s + k_i} \quad (14)$$

由式(12)和式(14)可知, $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 幅频特性的转角频率分别为 $\frac{D}{2H}$ , $\sqrt{\frac{k_i}{2H}}$ 和 $\frac{D}{2H}$ , $\sqrt{\frac{k_i}{2H + k_d}}$ 。代

入典型参数: $H=6$ , $D=1$ , $k_i=10$ , $k_d=12$ ,可知转角频率为0.083 rad/s、0.912 8 rad/s和0.083 rad/s、0.645 4 rad/s,远小于强迫功率振荡的频率典型值0.25~1.25 Hz<sup>[2,10]</sup>。故在高频段有 $\Phi_1(s)|_{s \rightarrow \infty} = 1$ ,



暂态过程初始时刻和稳态时,  $K'(s)$  的单位阶跃响应与  $A(\omega_0)$  无关, 实现了暂态过程初始时刻和稳态时风电最大功率跟踪响应为  $P_{MPPT}$  的目的。此外,  $A(\omega_0)$  取值越大, 阶跃响应的超调量越大, 越有可能导致暂态过程风电输出功率的增加, 从而风机轴系稳定性越差。但是,  $A(\omega_0)$  取值越大, PD 微分系数等效增大越多, 对低频振荡抑制效果越好, 故  $A(\omega_0)$  取 0.6~0.8 为宜。

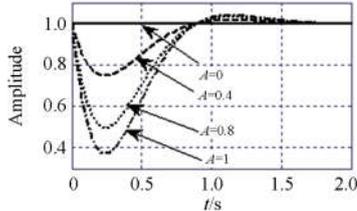


图 3 带通滤波器中心频率增益与风电最大功率跟踪超调量的关系

Fig. 3 Relation between the central frequency gain of the band pass filter and the overshoot of maximum power point tracking

### 3 算例分析

#### 3.1 算例介绍

利用 Matlab/Simulink, 根据图 4 搭建直驱式风电并网系统仿真平台, 所需重要参数如表 1 所示, 其余详细参数与文献[11]一致。实际风速为 8.5 m/s, 直驱式风电机组最大跟踪值为 1 MW, 同步发电机组有功功率计划值为 6 MW, 负荷为 7 MW。由风剪切和塔影效应产生的强迫功率振荡幅值为风机最大跟踪值的 14%, 频率为 1 Hz。

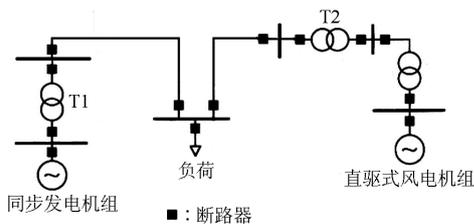


图 4 直驱式风电并网系统示意图

Fig. 4 Diagram of direct-drive wind power integrated system

表 1 直驱式风电并网系统重要参数

Table 1 Important parameter of direct-drive wind power integrated system

直驱式风电机组参数		同步发电机组参数	
容量	2 MW	容量	10 MW
VIC比例系数	10	PI比例系数	10
VIC微分系数	10.9	PI微分系数	10
负荷阻尼	1	惯性时常	6 s

#### 3.2 改进前分析

如图 5(a), 对比无 VIC 控制时, 引入 PD 比例系数, 极点左移, 阻尼增大, 而引入微分系数, 极点右移, 阻尼减小。此外, 由式(12)可知, VIC 控制前系统阻尼为 0.458 3, 故当 PD 比例系数取 10 时, 微分系数应取 10.9, 可保持系统阻尼不变。

如图 5(b), 在高频段(0.25~1.25 Hz), 当 PD 微分系数取值为零时, 幅频特性为 1, 对强制功率振荡无抑制。随着微分系数的增大, 幅频特性下移, 对强制功率振荡的抑制效果也越好。

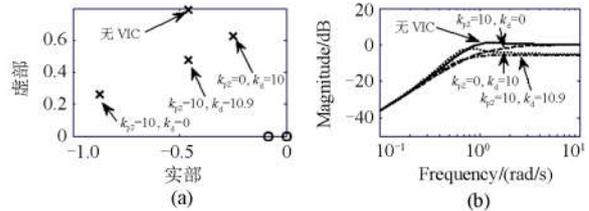


图 5 改进前 PD 比例微分系数对系统暂态性能和幅频特性的影响

Fig. 5 Transient performance and amplitude frequency characteristic affect by the coefficients of proportional differentiation before improvement

#### 3.3 改进后分析

如图 6(a)所示, 改进后新增了两个共轭极点和两个共轭零点。新增的两个极点相比原来的两个极点远离虚轴, 因此可知, 系统的暂态过程为大的阻尼振荡上再附加小的阻尼振荡, 大阻尼振荡暂态过程取决于原来的两个极点, 而小阻尼振荡取决于新增的两个极点。当带通滤波器增益取值变化时, 原来的两极点略有左移, 但不明显, 说明改进方案对原有系统阻尼的影响不大。此外, 增益取值越大, 新增的两个极点离虚轴越近, 引起的小振荡的幅值越大。而增益取值越小, 新增的零极点距离越小, 直至增益为零时, 零极点对消。

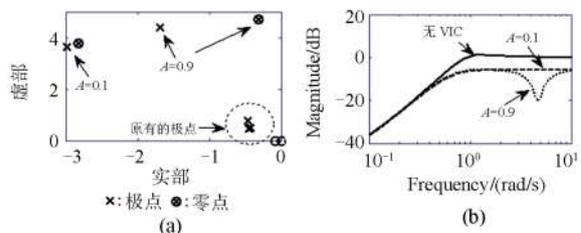


图 6 改进后带通滤波器增益对系统暂态性能和频率特性的影响

Fig. 6 Transient performance and amplitude frequency characteristic affect by the band pass filter gain after improvement

如图 6(b)所示, 改进后系统幅频特性相当于在原幅频特性的基础上新增了一个 0.25~1.25 Hz 的带阻, 实现了对强制性振荡的有效抑制, 而且增益取值越大, 抑制效果越好。

#### 4 时域仿真

为了进一步验证该改进控制方案对系统阻尼、风机轴系扭振以及强迫功率振荡的影响, 在图 4 所示的仿真系统中, 通过设置以下四种仿真案例进行对比分析。

案例 1 无 VIC。

案例 2 VIC:  $k_p=10$ ,  $k_d=10.9$ 。

案例 3 VIC:  $k_p=25$ ,  $k_d=27.25$ (实际 PD 比例微分系数为案例 2 的 2.5 倍)。

案例 4 改进 VIC:  $k_p=10$ ,  $k_d=10.9$ ,  $A=0.6$ (实际 PD 比例微分系数等于案例 2, 等效比例微分系数等于案例 3)。

由图 7—图 9 可知, 当无 VIC 时, 直驱式风电机组输出的强迫振荡功率幅值仍为 0.14 MW, 并且该振荡功率造成系统不平衡功率和系统频率的强制振荡, 进一步证实仅靠同步发电机组无法实现强迫振荡功率的抑制。案例 2 相比案例 3 的实际 PD 微分系数小, 故抑制效果欠佳。案例 4 的二阶带通滤波器增益为 0.6, 等效将 PD 比例微分系数增大 2.5 倍, 与案例 3 的实际比例微分系数相等, 故抑制效果相同。又因为案例 2 的等效微分系数和案例 4 的实际微分系数在四个案例中最大, 故抑制效果最好。

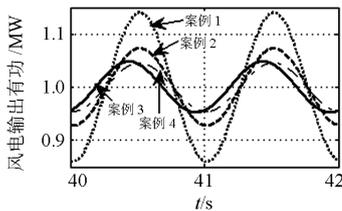


图 7 直驱式风电机组输出有功功率动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic response curves of the direct-drive wind power output

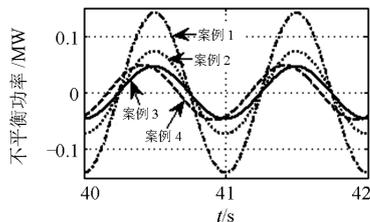


图 8 负荷和发电机组不平衡功率动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic response curves of the unbalanced power between the load and the generator

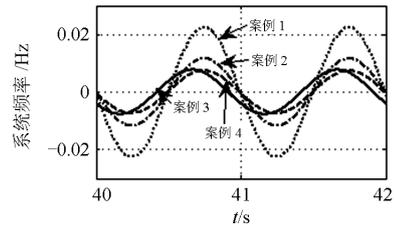


图 9 系统频率动态响应曲线

Fig. 9 Dynamic response curves of the system frequency

如图 10—图 12, 负荷在 10 s 时由 7 MW 增大到 8 MW, 可以看出, 无 VIC 时 (案例 1), 直驱式风电机组输出有功功率不变, 无法向系统提供惯量支持, 故系统不平衡功率和频率下降最大。

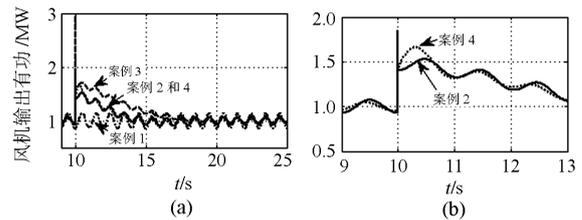


图 10 直驱式风电机组输出有功功率动态响应曲线

Fig. 10 Dynamic response curves of the direct-drive wind power output

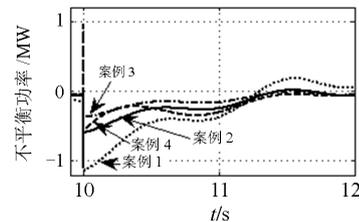


图 11 负荷和发电机组不平衡功率动态响应曲线

Fig. 11 Dynamic response curves of the unbalanced power between the load and the generator

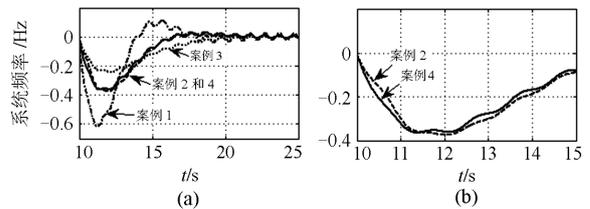


图 12 系统频率动态响应曲线

Fig. 12 Dynamic response curves of the system frequency

采用 VIC 后, 由于案例 3 的实际 PD 微分系数最大, 故直驱式风电机组在暂态过程输出有功最多, 因而系统不平衡功率和频率下降最少, 但此时风机轴系稳定性最差。

案例 2 和案例 4 具有相同的实际 PD 微分系数, 因此在 10 s 时刻直驱式风电机组输出有功相同。在 10 s 后, 案例 4 的暂态过程是在控制 2 的基础上增加了一个小的阻尼振荡, 该振荡由二阶带通滤波器引起。此外, 直驱式风电机组输出功率最大值发生在 10 s 时刻, 当  $Q=0.6$  时, 带通滤波器引起的阻尼振荡幅值仍小于 10 s 时刻, 并未造成风机输出功率的增加。

## 5 结束语

本文通过分析虚拟惯量控制中比例-微分系数对系统阻尼、风机轴系扭振和强迫振荡功率的影响, 提出了在 VIC 补偿量中引入风机输出功率给定量和二阶带通滤波器, 等效等比增大 PD 比例-微分系数的方法, 实现了在不减少系统阻尼和不降低风机轴系稳定性的前提下, 提高了虚拟惯量控制对风剪切和塔影效应引起的强迫功率振荡的抑制能力。

## 参考文献

- [1] DOLAN D S L, LEHN P W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 717-724.
- [2] 谭谨, 胡维昊, 王晓茹, 等. 变速风电系统形成强迫功率振荡扰动源分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1088-1096.  
TAN Jin, HU Weihao, WANG Xiaoru, et al. Analysis of disturbance source inducing by the variable speed wind turbine system forced power oscillations[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1088-1096.
- [3] 孟鹏, 邱晓燕, 林伟, 等. 直驱式永磁同步风力发电动态特性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 38-43.  
MENG Peng, QIU Xiaoyan, LIN Wei, et al. Study of the dynamic characteristics of directly driven permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 38-43.
- [4] 谭谨. 大规模风电并网系统的低频振荡研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
TAN Jin. Study of low frequency oscillation in power systems with large-scale integration of wind power[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [5] 唐西盛, 孙玉树, 齐智平. 基于 HHT 的风电功率波动及其对电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2115-2121.  
TANG Xisheng, SUN Yushu, QI Zhiping. Analysis of wind power fluctuation characteristics and its impact on power system low frequency oscillation based on HHT[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2115-2121.
- [6] 刘军, 周飞航, 刘飞, 等. 考虑塔影与风切变的永磁同步风电系统最大风能跟踪控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 107-114.  
LIU Jun, ZHOU Feihang, LIU Fei, et al. Research of maximum wind power tracking control strategy of permanent magnet synchronous wind power system based on the tower shadow and wind shear[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 107-114.
- [7] HU Weihao, ZHANG Yunqian, CHEN Zhe, et al. Flicker mitigation by speed control of permanent magnet synchronous generator variable-speed wind turbines[J]. Energies, 2013, 6: 3807-3821.
- [8] HU Weihao, CHEN Zhe, WANG Yue, et al. Flicker mitigation by active power control of variable-speed wind turbines with full-scale back-to-back power converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 640-649.
- [9] 窦真兰, 施刚, 曹云峰, 等. 减少风力机转矩波动的异步变桨控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 236-245.  
DOU Zhenlan, SHI Gang, CAO Yunfeng, et al. Individual pitch control for reducing wind turbine torque fluctuation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 236-245.
- [10] 张祥宇. 变速风电机组的虚拟惯性与系统阻尼控制研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.  
ZHANG Xiangyu. Virtual inertia and system damping control for variable speed wind turbines[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [11] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 20-26.  
TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 20-26.
- [12] 王刚, 侍乔明, 付立军, 等. 虚拟惯量控制方式下永磁风力发电机组轴系扭振机理分析[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 8-16.  
WANG Gang, SHI Qiaoming, FU Lijun, et al. Mechanism analysis of torsional vibration for directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator shaft system with virtual inertia control[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 8-16.

- [13] 王刚, 侍乔明, 崔志勇, 等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2794-2801.  
WANG Gang, SHI Qiaoming, CUI Zhiyong, et al. A coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2794-2801.
- [14] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.  
CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [15] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2033-2042.  
SHI Qiaoming, WANG Gang, MA Weiming, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2033-2042.
- [16] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33-40.  
JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 33-40.
- [17] 朱晓荣, 陈玉伟, 张祥宇, 等. 含风电的区域电网功率振荡特性分析与综合控制[J]. 电测与仪表, 2017, 54(1): 33-38.  
ZHU Xiaorong, CHEN Yuwei, ZHANG Xiangyu, et al. Impact of wind turbine on power oscillation characteristic in region network and integrated control strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(1): 33-38.
- [18] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.  
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [19] 杨伟, 邓程城, 徐乐. 基于模糊 Smith 预估的直驱风电机组变桨距控制器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 65-70.  
YANG Wei, DENG Chengcheng, XU Le. Pitch control of direct drive wind turbine based on the fuzzy Smith predictor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 65-70.
- [20] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [21] 肖湘宁, 杨琳, 张丹, 等. 基于特征值法的次同步阻尼守恒特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 80-84.  
XIAO Xiangning, YANG Lin, ZHANG Dan, et al. Analysis on subsynchronous damping conservation character based on eigenvalue method[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 80-84.
- [22] 郝正航, 邱国跃, 陈卓, 等. 电力系统阻尼特性分析与研究[J]. 继电器, 2005, 33(23): 19-24.  
HAO Zhenghang, QIU Guoyue, CHEN Zhuo, et al. Analysis and research of damping character of power systems[J]. Relay, 2005, 33(23): 19-24.
- [23] 王宏伟. 风电机组传动链扭振建模与寿命损耗分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
WANG Hongwei. Modeling and life loss on torsional vibration of wind turbine drive train[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2017-11-10

作者简介:

武晓冬(1978—), 男, 博士研究生, 从事风电场电能质量分析与控制研究; Email: wuxiaodong9874@163.com

田慕琴(1962—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 从事大型电机运行与控制研究; Email: muqintian@yahoo.com

朱燕芳(1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统运行与控制研究. Email: zyf\_0358@126.com

(编辑 张爱琴)