

DOI: 10.7667/PSPC150675

# 基于阻尼器的双馈风力发电系统扭振抑制策略

赵祖熠, 刘李勃, 解大, 楚皓翔

(上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 由风速扰动或网侧的电气扰动所引发的风机传动轴扭振现象会导致轴系机械零件疲劳过载, 甚至损坏。提出一种对网侧电气小扰动引发机网扭振的抑制策略。该策略通过在转子侧逆变器功率控制环节引入阻尼器, 当轴系发生扭振时, 利用发电机转速波动信号产生阻尼功率, 再附加到逆变器有功功率参考值上, 使系统额外输出有功功率来增大系统阻尼, 从而抑制轴系扭振。建立系统小信号稳定模型, 分析扭振抑制原理, 观察引入阻尼器后, 系统主导扭振模态的特征根变化; 并利用 Bode 图分析阻尼器对轴系扭振模态的抑制效果。最后, 在 Matlab/Simulink 上进行仿真验证。结果表明, 所提出的阻尼策略可以显著增大双馈风力发电系统的阻尼, 增强对风力发电系统扭振尤其是低频振荡模态的抑制。

**关键词:** 阻尼器; 双馈风机; 三质量块; 扭振; 抑制策略

## A novel torsional vibration damping method for a DFIG-based system

ZHAO Zuyi, LIU Libo, XIE Da, CHU Haoxiang

(School of Electronics Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Torsional vibrations present in the drive train can produce large stresses on the components of the wind turbine. Those torsional vibrations can be excited by either turbulent winds or grid disturbances which are considered in this study. A damping system accomplished by the decoupled power control for rotor side converter equipped with a torsional damper is developed. During vibrations, the torsional damper extracts the ripple of the generator speed to produce an auxiliary active power reference, which enables the system to generate additional active power to damp the drive train vibrations. To illustrate the effectiveness of the torsional damper, eigenvalue analysis is conducted through small-signal stability model and Bode diagram of the closed loop system is plotted. Simulations are performed in Matlab/Simulink to evaluate the proposed damping method. Results confirm that the torsional damper can introduce an auxiliary damping to the wind turbine system and exhibit a good performance to damp both vibration frequencies of the drive train, particularly the low frequency mode.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277119).

**Key words:** torsional damper; doubly fed induction generator; three-mass model; torsional vibrations; damping algorithm

## 0 引言

变速风力发电机系统具有运行方式灵活, 风能利用率高等优势, 近年来在大规模风电并网中得到了广泛的应用。双馈风力发电系统由于其逆变器加装在转子侧, 无需使用全功率逆变器, 因此在变速风力发电系统中占有了大量的市场比重<sup>[1-5]</sup>。然而, 运行在恒转矩模式下的双馈风机表现出很小的阻尼特性, 风机轴系的固有振荡模态容易被风速扰动或

来自网侧的电气扰动所激发, 从而引起风机轴系扭振<sup>[6-7]</sup>。轴系扭振的频繁发生会给变速箱齿轮带来巨大的机械压力, 长期疲劳运行将严重影响变速箱的使用寿命<sup>[8-9]</sup>, 此外, 扭振还会以有功功率振荡的方式被传递到发电机出口, 甚至与电网发生谐振, 造成重大危害。因此, 风机轴系的扭振抑制具有极高的研究价值。

对于风速扰动引起的轴系扭振, 可以通过在转矩控制回路中引入一个设计合理的阻尼器, 起到有效的抑制作用。文献[10]提出了分别基于发电机转速反馈控制和基于风轮机转速反馈的恒功率控制的

扭振抑制策略, 并通过基于两质量块的建模仿真验证了两种控制模式都能提供良好的电气阻尼。但是, 两质量块模型并不适合暂态过程的研究, 尤其是扭振现象<sup>[11]</sup>, 简化机械轴模型会丢失其中某一个振荡模态, 从而影响阻尼器的抑制效果。文献[12]对比了基于两质量块模型和三质量块模型设计的阻尼器对扭振抑制效果的影响, 表明三质量块模型可以更好地考虑全部振荡模态, 有助于实现更好的扭振抑制效果。文献[13]还具体讨论了阻尼器中的滤波器特性对扭振抑制效果的影响, 指出了传统带通滤波器在系统建模参数不精确时, 抑制效果并不理想。文献[14]进一步对在阻尼器设计中采用低通滤波环节和传统带通滤波环节所得到的阻尼效果进行了比较, 结果表明采用低通滤波环节设计的阻尼器可以获得更好的阻尼效果。然而, 这些抑制控制策略都是针对风速扰动引起的轴系扭振现象, 文献[15-17]指出, 来自网侧的电气扰动, 例如电压暂降, 不仅会引起风机的电气暂态行为, 同时也对风机的机械轴运动产生影响, 尤其是可能引发轴系扭振现象。

本文提出了基于阻尼器的, 由网侧电气小扰动引起的双馈风力发电系统扭振的抑制策略。该策略通过在转子侧逆变器功率控制环节引入阻尼器, 当轴系发生扭振时, 利用发电机转速波动信号产生阻尼功率, 使系统额外输出有功功率来增大系统阻尼, 从而抑制轴系扭振。传统的阻尼器需要针对每一种振荡模态设计对应的窄带通滤波器, 当轴系扭振频率复杂, 计算不精确时, 基于带通滤波器的阻尼器阻尼效果并不理想。本文采用基于低通滤波器且设计简单的阻尼器, 通过建立双馈风机小信号模型系统, 确定主导扭振模态的特征根, 讨论阻尼器的引入对特征根阻尼特性的影响, 即振荡模态对应特征根的实部大小; 并且利用 Bode 图分析闭环控制系统频率特性, 观察阻尼器对轴系振荡的阻尼作用, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台上进行仿真验证。

## 1 机械子系统模型

典型的 2 MW 双馈变速风力发电系统如图 1 所示, 机械子系统由风轮空气动力模型和连接风轮与发电机的机械轴传动模型组成。

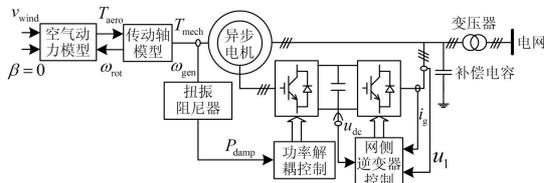


图 1 双馈风力发电机系统框图

Fig. 1 Block diagram of the DFIG based wind turbine model

### 1.1 空气动力模型

由于本文只研究电气扰动引起的扭振现象, 空气动力模型仅为与之相连的机械轴传动模型提供初始机械转矩  $T_{aero}$ <sup>[18]</sup>。

### 1.2 机械轴传动模型

风机的旋转系统中每一个旋转部分都可以用质量块来描述其实际物理特性, 并且建模的质量块越多, 仿真的精度越高。如图 2 所示的三质量块模型适合动态特性分析, 由叶片  $J_1$ , 低速轴  $J_2$  以及高速轴  $J_3$  (包括发电机转子) 构成<sup>[19]</sup>。折算至高速侧的数学模型由式(1)给出。

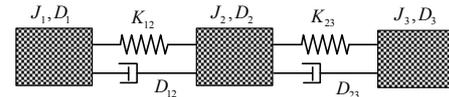


图 2 三质量块模型

Fig. 2 Three-mass model

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d}{dt} \omega_{rot} &= T_{aero} - K_1(\theta_1 - \theta_2) - D_1 \omega_{rot} - D_{12}(\omega_{rot} - \omega_2) \\ J_2 \frac{d}{dt} \omega_2 &= -K_1(\theta_2 - \theta_1) - K_2(\theta_2 - \theta_3) - D_2 \omega_2 - \\ &\quad D_{12}(\omega_2 - \omega_{rot}) - D_{23}(\omega_2 - \omega_{gen}) \\ J_3 \frac{d}{dt} \omega_{gen} &= -T_{em} - K_2(\theta_3 - \theta_2) - D_3 \omega_{gen} - \\ &\quad D_{23}(\omega_{gen} - \omega_2) \\ \frac{d}{dt} \theta_1 &= \omega_{rot} \\ \frac{d}{dt} \theta_2 &= \omega_2 \\ \frac{d}{dt} \theta_3 &= \omega_{gen} \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $T_{em}$  为发电机电磁转矩;  $\omega_{rot}$ ,  $\omega_2$  和  $\omega_{gen}$  分别表示风轮机叶片转速、低速轴转速以及高速轴(即发电机)转速;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$  分别表示各旋转部分的扭矩角;  $K_1$ ,  $K_2$  为各质量块之间刚度系数;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  表示各质量块的自阻尼系数;  $D_{12}$ ,  $D_{23}$  为互阻尼系数, 为了突出逆变器对扭振的电气阻尼作用, 这里忽略一切机械阻尼, 即各阻尼系数为零。

## 2 电气子系统模型

电气系统由异步电机和一组连接在转子上的电压型“背靠背(Back-to-Back)”逆变器构成。结构如图 1 所示。

### 2.1 双馈异步电机模型

为简化分析, 不考虑发电机的磁链饱和与励磁损耗, 且假设绕组三相对称, 气隙磁通按正弦分布。





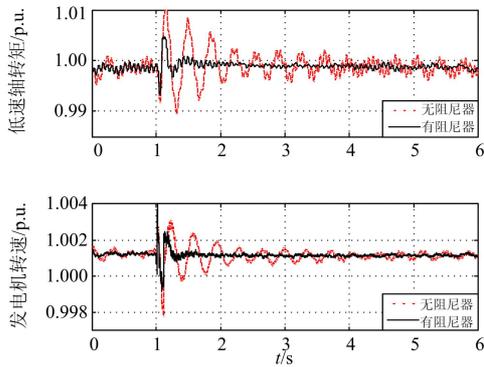


图 7 三相电压跌落 0.1 p.u. 持续 0.1 s 情况下阻尼效果  
 Fig. 7 Damping effects for the case of three-phase voltage sag by 0.1 p.u. lasting 0.1 s

低速轴转矩频谱见图 8，网侧的电气小扰动(电压暂降)激发了传动轴的固有振荡模态，引起机械转矩振荡，在未引入阻尼器时，可以明显地观察到两个振荡频率，即 2.81 Hz 和 14.56 Hz，而阻尼器有效地抑制了这两个振荡频率，尤其对低频模态有着明显的抑制效果。

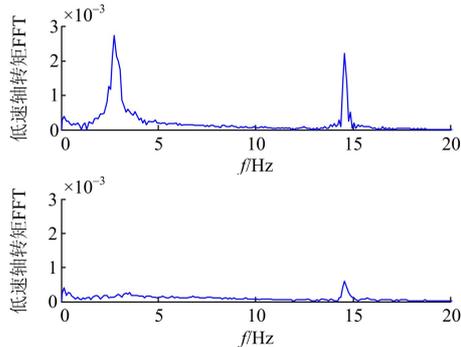


图 8 电压跌落时的低速轴转矩频谱  
 Fig. 8 Frequency spectrum of low speed shaft torque during voltage sag

将系统电压暂降时间延长至 0.2 s，低速轴转矩和发电机转速见图 9，电气扰动时间变长，转矩振

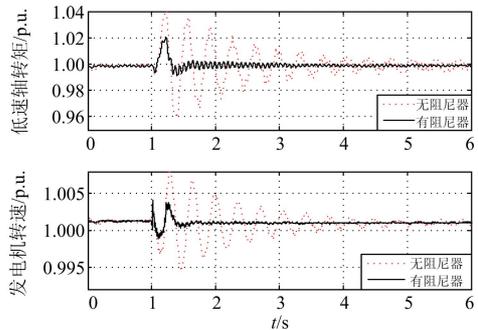


图 9 三相电压跌落 0.1 p.u. 持续 0.2 s 情况下阻尼效果  
 Fig. 9 Damping effects for the case of three-phase voltage sag by 0.1 p.u. lasting 0.2 s

荡幅度明显增加，但阻尼器仍然能够快速阻尼振荡，阻尼过程不超过 1 s。

以上两种情况均为三相对称电压跌落，图 10 所示为单相电压跌落情况下的阻尼器抑制效果，尽管电气扰动不对称，阻尼器仍然可以快速有效地阻尼轴系振荡。这是因为阻尼器的输入信号为发电机转速波动信号，属于机械信号，能够直观地反应传动轴的机械振荡模态。无论机网扭振是由对称扰动还是不对称扰动激发的，阻尼器均可以对该扭振振荡起到快速有效的阻尼作用。

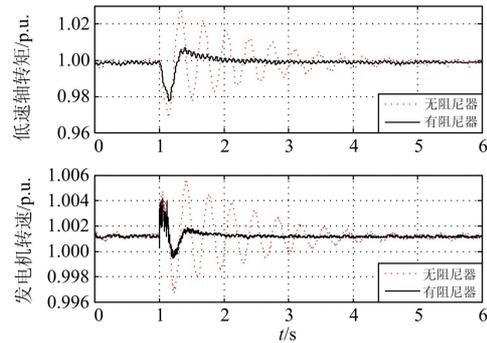


图 10 单相电压跌落 0.1 p.u. 持续 0.1 s 情况下阻尼效果  
 Fig. 10 Damping effects for the case of single-phase voltage sag by 0.1 p.u. lasting 0.1 s

为了进一步说明阻尼器抑制扭振的原理，图 11 为三相对称电压暂降持续时间 0.1 s 情况下的转子电流波形，当系统电压降至 0.9 p.u.时，转子侧电流增加，这是因为电压暂降持续时间相对于双馈风机转子侧逆变器时间常数可以忽略不计，可以认为转子侧逆变器系统输出有功功率参考值并没有变化，由式(5)、式(6)可知，转子电流必然会增加从而保证定子输出功率恒定；当电压恢复基准值后，转子电流开始下降，阻尼器利用发电机转速波动信号产生阻尼功率参考值，通过功率 PI 调节器产生附加阻尼电流，即黑色曲线超调部分，这部分额外电流使发电机定子扭振开始发生时就输出额外有功功率，从而使系统快速恢复至稳态。

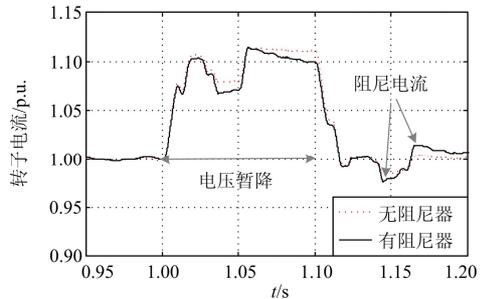


图 11 转子电流变化  
 Fig. 11 Transient response of rotor current

定子侧有功功率波形如图 12 所示, 正如上述分析, 阻尼功率的输出及时抑制了有功功率波动, 从而有效抑制了轴系扭振, 提高了系统阻尼特性。

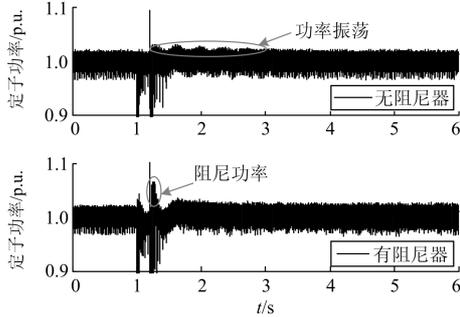


图 12 振荡功率的抑制效果

Fig. 12 Damping of power oscillations

## 5 结论

本文提出了基于双馈风力发电机针对电气扰动引起的扭振的抑制方法, 通过在转子侧逆变器功率控制中引入功率反馈, 增强系统阻尼特性, 并且设计了计算简单、基于低通滤波器的阻尼器。

本文采用更适合暂态分析的三质量块模型, 并且建立系统小信号稳定模型, 通过特征根分析, 证明了引入阻尼器能够使主导轴系振荡模态的特征根实部变小(绝对值变大), 即增强了系统的阻尼特性。另外, 利用 Bode 图分析闭环系统的频率特性, 表明阻尼反馈有效削弱了在轴系振荡模态上的两个幅值尖峰。基于 Simulink 的仿真验证了理论分析, 并且分别讨论了对称和不对称电压暂降情况下的抑制效果, 仿真结果表明, 阻尼器能够快速有效地抑制由电气小扰动引起的轴系扭振。

### 附录 A 双馈风机参数

风轮机: 额定风速=12 m/s, 额定风轮转速=18.1 r/s, 叶片长度=40.25 m, 叶片数=3。

异步电机: 额定功率=2 MW, 极对数=4, 频率=50 Hz, 定子电阻  $R_1=0.0234\ \Omega$ , 转子电阻  $R_2=0.0013\ \Omega$ , 定子 dq 轴自感  $L_{d1}=L_{q1}=L_1=4.595\ \text{mH}$ , 转子 dq 轴自感  $L_{d2}=L_{q2}=L_2=4.575\ \text{mH}$ , 互感  $L_m=4.5\ \text{mH}$ 。

出口并联补偿电容: 电容值= $120 \times 10^3\ \text{F}$ 。

三质量块模型(折算至高速侧):  $J_1=2901.8\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $J_2=20\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $J_3=121\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $K_1=6.59 \times 10^4\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ,  $K_2=9.22 \times 10^4\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ , 齿轮箱变比  $N=47:1$ 。

### 附录 B 图 5 各环节传递函数

功率 PI 调节器:  $G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$

电流 PI 调节器:  $G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$

异步电机:  $G_{ASM}(s) = \frac{1}{R_2 + \sigma L_2 s}$

等效电流内环:

$G_{in}(s) = \frac{i_{q2}(s)}{i_{q2}^*(s)} = \frac{1}{T_m s + 1}$ ,  $T_m = 8.787 \times 10^{-3}\ \text{s}$

转子 q 分量电流至发电机电磁转矩:

$T_{em} = -p \frac{L_m}{L_1} \psi_1 i_{q2} \rightarrow K_{em} = \frac{T_{em}(s)}{i_{q2}(s)} = -p \frac{L_m}{L_1} \psi_1$

基于低通滤波器的阻尼器:

$G_{LPF}(s) = K \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{s}{Q\omega_c} + \frac{s^2}{\omega_c^2}} \right)$

$K=1.68 \times 10^5\ \text{N}\cdot\text{m}$ ,  $\omega_c = 2\pi\ \text{rad/s}$

### 附录 C 逆变器参数

逆变器参数: 定子侧电压=690 V, 电容电压=1200 V, 电容值=20000  $\mu\text{F}$ , 网侧逆变器耦合电抗  $L_g=1\ \text{mH}$ 。

转子侧逆变器 PI 参数: 功率 PI 调节器:  $K_p=0.02$ ,  $K_I=0.01$ 。电流 PI 调节器:  $K_p=0.02$ ,  $K_I=0.01$ 。

网侧逆变器 PI 参数: 电压 PI 调节器:  $K_p=18$ ,  $K_I=1$ 。电流 PI 调节器:  $K_p=50$ ,  $K_I=2$ 。

### 参考文献

- [1] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.  
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [2] 秦超, 刘艳丽, 余贻鑫, 等. 含双馈风机电力系统的动态安全域[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 157-163.  
QIN Chao, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Dynamic security region of power systems with double fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 157-163.
- [3] 周镇, 孙近文, 曾凡涛, 等. 考虑风机接入的电力系统小信号稳定优化控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 424-431.  
ZHOU Zhen, SUN Jinwen, ZENG Fantao, et al. Optimal supplementary control for small signal stability of power system with DFIG integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 424-431.
- [4] ZHANG Yan, GU Chenghong, LI Furong. Evaluation of investment deferral resulting from micro generation for EHV distribution networks[J]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2010: 1-5.

- [5] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnički Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [6] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.  
GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 146-153.
- [7] 苏柏松, 解大, 娄宇成, 等. 随机载荷激励下的风力发电机组首次穿越模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 40-47.  
SU Baisong, XIE Da, LOU Yucheng, et al. First-passage model under the excitation of stochastic load of the wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 40-47.
- [8] 张琛, 李征, 蔡旭, 等. 双馈风电机组轴系扭振的稳定与控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 301-310.  
ZHANG Chen, LI Zheng, CAI Xu, et al. Stability and control of shaft torsional oscillation for doubly-fed wind power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 301-310.
- [9] 李啸骢, 鹿建成, 韦善革, 等. 汽轮发电机组轴系扭振多指标非线性协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 1-7.  
LI Xiacong, LU Jiancheng, WEI Shange, et al. Multi-index nonlinear coordination control design for steam-turbine generator shafting torsional vibration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 1-7.
- [10] 姚兴佳, 王晓东, 单光坤, 等. 双馈风电机组传动系统扭振抑制自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 136-141.  
YAO Xingjia, WANG Xiaodong, SHAN Guangkun, et al. Torque vibration active disturbance rejection control of doubly-fed wind turbine drive train[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 136-141.
- [11] RAMTHARAN G, JENKINS N, ANAYA-LARA O, et al. Influence of rotor structural dynamics representations on the electrical transient performance of FSIG and DFIG wind turbines[J]. Wind Energy, 2007, 10(4): 293-301.
- [12] LICARI J, UGALDE-LOO C E, LIANG J, et al. Torsional damping considering both shaft and blade flexibilities[J]. Wind Engineering, 2012, 36(2): 181-196.
- [13] LICARI J, UGALDE-LOO C, EKANAYAKE J, et al. Damping of torsional vibrations in a variable-speed wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 172-180.
- [14] LIU Libo, XIE Da. Performance comparison of two different filter design approaches for torsional vibration damping in a doubly fed induction generator-based wind turbine[J]. The Journal of Engineering, 2015, 1(1): 8pp.
- [15] FADAEINEDJAD R, MOSCHOPOULOS G, MOALLEM M. Voltage sag impact on wind turbine tower vibration[C] // Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007: 1-8.
- [16] FADAEINEDJAD R, MOSCHOPOULOS G, MOALLEM M. Investigation of voltage sag impact on wind turbine tower vibrations[J]. Wind Energy, 2008, 11(4): 351-375.
- [17] 罗远翔, 杨仁刚, 蔡国伟, 等. 大容量风电接入系统对网络暂态能量的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 28(1): 76-80.  
LUO Yuanxiang, YANG Rengang, CAI Guowei, et al. Impact on network transient energy of power system integrated with large scale wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 28(1): 76-80.
- [18] 章伟, 邓院昌. 基于组合模型的短期风速预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 83-87.  
ZHANG Wei, DENG Yuanchang. Short-term wind speed prediction based on combination model[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7): 83-87.
- [19] ZHANG Yanchi, XIE Da, FENG Junqi, et al. Small-signal modeling and modal analysis of wind turbine based on three-mass shaft model[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(7): 693-702.
- [20] MULLER S, DEICKE M, DE DONCKER R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(3): 26-33.
- [21] YAMAMOTO M, MOTOYOSHI O. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(4): 624-629.
- [22] BOSSANYI E A. The design of closed loop controllers for wind turbines[J]. Wind Energy, 2000, 3(3): 149-163.
- [23] LI S, HASKEW T. Analysis of decoupled d-q vector control in DFIG back-to-back PWM converter[C] // Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007: 1-7.
- [24] 解大, 冯俊淇, 娄宇成, 等. 基于三质量块模型的双馈风机小信号建模和模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊 1): 21-29.  
XIE Da, FENG Junqi, LOU Yucheng, et al. Small-signal modelling and modal analysis of DFIG-based wind turbine based on three-mass shaft model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 21-29.

收稿日期: 2015-04-22; 修回日期: 2015-10-10

作者简介:

赵祖熠(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

刘李勃(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

解大(1969-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析、灵活交流输电设备、新能源。E-mail: xieda@sytu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)