

# 双馈风机-串补输电系统次同步谐振的 附加阻尼控制

胡应宏<sup>1</sup>, 邓春<sup>1</sup>, 谢小荣<sup>2</sup>, 李雨<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045;

2. 清华大学 电机系, 北京市 海淀区 100084)

## Additional Damping Control of DFIG Series Compensated Transmission System Under Sub-Synchronous Resonance

HU Yinghong<sup>1</sup>, DENG Chun<sup>1</sup>, XIE Xiaorong<sup>2</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China;

2. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Sub-synchronous resonance may occur in doubly-fed wind turbine series compensated transmission system. In order to better suppress sub-synchronous resonance from DFIG, transfer function of wind power transmission system is derived by modeling wind power series compensation system. Based on transfer function analysis, additional damping control method is proposed. Additional damping control signal tracking synchronous current changes corrects corresponding output voltage. This makes converter present positive resistance in sub-synchronous frequency, effectively inhibiting resonance occurrence. Additional damping control avoids synchronization based on multiple rotating coordinate systems. The strategy does not affect characteristics of original controller. Damping in the method can be adjusted to effectively suppress sub-synchronous resonance. With simulation and experiment, rationality and correctness of additional damping control are validated. The method has advantages of simple calculation and easy realization.

**KEY WORDS:** doubly-fed induction generator (DFIG); series compensation; sub-synchronous resonance; additional damping suppression

**摘要:** 双馈风机-串补输电系统存在次同步谐振的风险。为解决该问题,首先通过对风电串补输电系统建模,推导了风电串补输电系统的传递函数。然后通过对传递函数的分析,提出了附加阻尼控制方法。附加阻尼控制信号跟踪次同步电流的变化,修正相应输出电压,使得在次同步频率下变流器

呈现正电阻,从而有效抑制谐振发生。采用次同步电流附加阻尼控制避免了基于多重旋转坐标系分频同步方法。该策略不影响原有控制器特性,且同步频率下的阻尼可调,因此可以有效抑制次同步谐振。通过算例仿真分析证明了所提出附加阻尼控制的合理性和正确性,该方法具有计算简单、便于实现等优点。

**关键词:** 双馈风电机组; 风电串补输电系统; 次同步谐振; 附加阻尼抑制

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.04.028

## 0 引言

近年来,风电作为一种绿色能源得到了快速的发展,大规模汇集地区的风电装机容量已经与火电厂相当<sup>[1-2]</sup>。串联补偿电容作为一种成熟而经济的远距离输电技术,在大规模风电的外送中具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。串联补偿导致火电机组次同步振荡的风险,同样存在于风电-串补输电系统中。2009年10月美国德州就发生了串补电容引起的次同步谐振事故,得到了电力工程界的广泛关注<sup>[4]</sup>。风电串补输电系统次同步谐振的建模、原理分析与抑制成为亟待解决的问题<sup>[5-7]</sup>。在次同步谐振原理方面,文献[8-10]对双馈风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)串补输电系统次同步谐振的3种原理进行了分析,文献[11-12]对风电-串补输电系统次同步谐振特性及影响因素进行了分析。在建模方面,文献[13]建立阻抗模型来分析风电串补次同步谐振,确定了串联补偿度、风速及电流控制参数对次同步谐振的影响。在抑制措施方面,文献[14-15]提出了基于转子侧变流器的有功、无功调节方法,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51322701); 河北省重大科技成果转化专项课题“国家风光储输示范电站低频谐振分析及治理关键技术研究”(13214604D)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51322701).

文献[16]采用风电场串补输电系统中的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)来抑制次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)和阻尼电力系统振荡,并将非线性优化设计步骤用于STATCOM附加次同步阻尼控制环的设计。文献[17]利用机轴角速度作为输入信号,实现双馈风机的附加阻尼控制。文献[18]通过改进统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)的控制策略增加了桨距角附加控制,实现对次同步谐振的抑制。文献[19]根据转子角相位差来进行有功功率调制,实现双馈风机的阻尼控制。现有抑制方法不易实现,且有功功率的调制容易导致系统谐振,所以有必要对抑制措施进一步研究。

本文提出一种双馈风机附加阻尼控制的次同步抑制控制方法。首先通过建立双馈风机的数学模型,分析了双馈风机次同步等效电阻的影响因素。然后提出双馈风机附加阻尼控制,采用该策略可有效抑制次同步谐振。最后通过仿真分析,验证提出方法的有效性。

## 1 双馈风机串补输电系统数学模型

DFIG 风电机组的系统结构如图 1 所示,主要包括轴系、感应发电机、网侧变流器(grid side converter, GSC)、转子侧变流器(rotor side converter, RSC)、变流器直流环节、变流器控制器及其箱式变压器组成。图 1 中:  $v_s$  为定子电压;  $i_s$  为定子电流;  $i_n$  为网侧变流器电流;  $i_r$  为转子变流器电流;  $v_{dc}$  为直流电压。

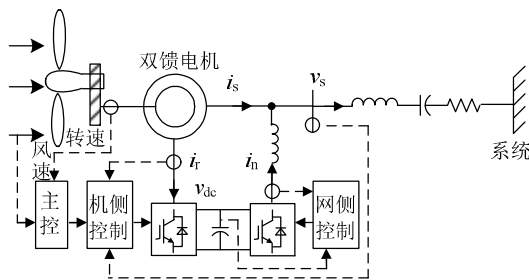


图 1 DFIG 风电机组系统结构图

Fig. 1 Schematic of DFIG series compensated transmission system

双馈风机的定子电压与转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  分别为定子电压 d、q 轴分量;  $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$  分别为定子电流 d、q 轴分量;  $\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$  为定子磁

链的 d、q 轴分量;  $R_s$  为定子电阻;  $\omega_s$  为定子转速;  $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  分别为转子电压 d、q 轴分量;  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  分别为转子电流 d、q 轴分量;  $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$  分别为转子磁链的 d、q 轴分量;  $R_r$  为转子电阻;  $\omega_r$  为转子转速;  $p$  为微分算子。

转子侧变流器的矢量控制结构见图 2,内环为电流跟踪环,外环分别对应转子转速控制环和定子无功控制环。转子侧变流器作用主要分为 2 个方面,一方面是通过控制 DFIG 的转速实现最大功率追踪,进而控制 DFIG 定子侧所发出的有功功率;另一方面是给 DFIG 转子提供励磁分量的电流,从而可调节 DFIG 定子侧无功功率。其中:  $\omega_{ref}$  为转子参考转速;  $Q_{sref}$ 、 $Q_s$  分别为定子参考无功功率与无功功率;  $s=1-\omega_r/\omega_s$  为滑差;  $X'$  为转子电抗; PI 为比例-积分控制。

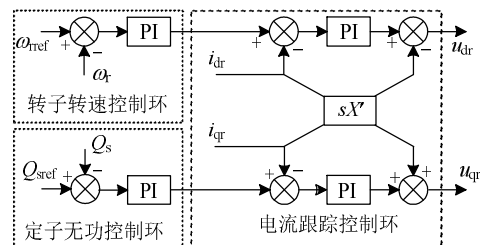


图 2 RSC 的控制原理框图

Fig. 2 Control schematic of rotor side converter

网侧变流器的级联控制结构如图 3 所示,内环为电流跟踪环,外环为直流电压控制环和机端电压控制环。其中:  $v_{dcref}$  为直流参考电压;  $v_{sref}$  为定子电压参考幅值;  $X_1$  为网侧变流器电抗。

通过前馈能够很好实现 d、q 轴电流之间的解耦,简化后的双馈风机电流闭环控制框图见图 4。其中:  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_t L_s$  为漏磁系数;  $L_m$  为定子转子

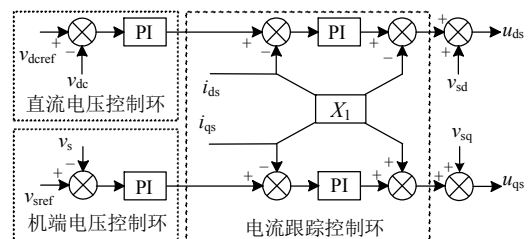


图 3 GSC 的控制原理框图

Fig. 3 Control schematic of grid side converter

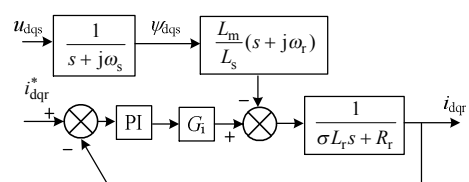


图 4 转子电流控制系统框图

Fig. 4 Simplify of RSC control schematic

互感;  $L_r$  为转子电感;  $L_s$  为定子电感;  $G_i$  为变流器传递函数, 近似为放大器  $k_{inv}$ 。

由此得双馈风机的转子电流计算公式:

$$i_{dqr} = -\frac{k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})}{R_r + \sigma L_r s + k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})} i_{dqr}^* - \frac{1}{R_r + \sigma L_r s + k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})} \cdot \frac{1}{s + j\omega_s} \frac{L_m}{L_s} (s + j\omega_r) u_{dqs} \quad (2)$$

式中:  $k_p$ 、 $T_i$  分别为 PI 控制器的比例系数与积分时间常数;  $i_{dqr}^*$  为外环生成的电流参考。由式(2)可知, 双馈风机的等效电阻与  $R_r$ 、 $L_r$ 、 $s$ 、 $k_p$  和  $T_i$  有关, 而  $L_r$  与线路及串补度有关。

## 2 双馈风机附加阻尼控制

### 2.1 附加阻尼控制的原理

风电串补输电系统次同步谐振主要是由于次同步电流分量引起, 若能控制变流器使之产生正的次同步电压, 便可增强双馈风机的次同步等效电阻。为此, 在生成参考电压时, 利用次同步电流注入附加阻尼, 可以消除扰动等对系统的影响。附加阻尼控制就是当发生谐振时, 控制信号跟踪次同步电流的变化, 迅速给出相应电压修正的控制命令, 通过附加阻尼对变流器输出次同步电压进行迅速调整, 使输出次同步电压跟随次同步电流的变化, 且在次同步频率下变流器呈现正电阻, 从而保证风机不发生次同步谐振, 其原理如图 5 所示。由于次同步分量变化为 dq 轴分量, 次同步频率变为了工频的互补频率, 如由 8 Hz 的次同步频率变为 42 Hz 的分量, 故控制器由截止频率设计为 40 Hz 的高通滤波器(high-pass filter, HPF)、比例-微分控制器(propotional derivative, PD)和限幅器构成。当系统

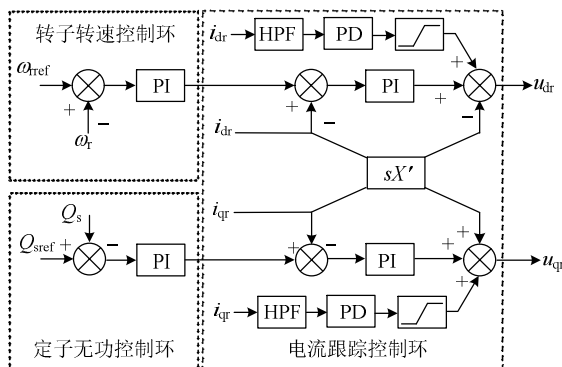


图 5 改进控制策略后的控制原理框图

Fig. 5 Modify of RSC control schematic

进入稳态, 前馈控制器输出几乎为零, 前馈信号分量作为参考电压的修正, 系统对负载扰动和电网电压的波动具有了很好的抗干扰能力。

滤波环节的表达式为  $sT_w / (1 + sT_w)$ , 其中:  $s$  为传递函数的复数形式自变量;  $T_w$  为滤波环节的时间常数。由于次同步频率分量的电流经过 dq 变换后频率变为  $f_r$  的互补频率,  $T_w$  应取较大的值才能使次同步频率的信号通过该滤波环节时不会改变。滤波环节作用是阻止稳态信号的输入, 仅当双馈风机中含有次同步频率的信号时, 该附加阻尼控制器才起作用, 给系统增加阻尼, 而稳态时附加阻尼控制器输出为 0, 对稳态运行无影响。

### 2.2 附加阻尼控制的分析

由于采用高通滤波器, dq 坐标工频输出为直流分量, 经高通滤波后, 工频分量输出为 0, 故次同步电流的前馈控制对工频传递函数没有影响。改进后的转子输出次同步电流表达式为

$$i_{dqr} = -\frac{k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})}{R_r + \sigma L_r s + k_{dp} + sk_{dd} + k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})} i_{dqr}^* - \frac{1}{R_r + \sigma L_r s + k_{dp} + sk_{dd} + k_p k_{inv} (1 + \frac{1}{sT_i})} \cdot \frac{1}{s + j\omega_s} \frac{L_m}{L_s} (s + j\omega_r) u_{dqs} \quad (3)$$

式中  $k_{dp}$ 、 $k_{dd}$  分别为 PD 控制器的比例系数与微分系数。从上式可以看出, 通过附加阻尼控制, 一方面使得转子对次同步电流呈现正电阻, 另一方面, 增大了次同步频率下的衰减, 避免谐振的发生。

## 3 附加阻尼控制的仿真分析

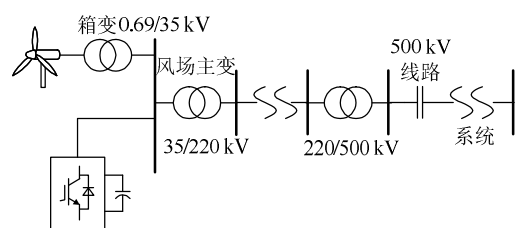
### 3.1 风电串补次同步谐振仿真

为了进一步验证所设计的阻尼控制器对次同步振荡抑制的有效性, 对所研究的系统进行暂态时域仿真。仿真采用 1.5 MVA 风机串补的等值进行仿真, 系统框图和仿真条件如图 6 所示, 仿真结果如图 7 所示。

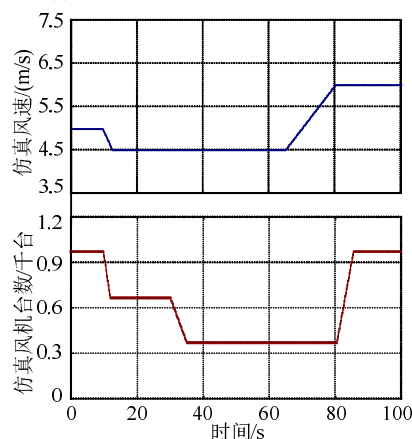
从仿真结果中可以看出, 风机串补输电系统在低风速、风机台数较少的情况下发生了次同步谐振, 与已有次同步谐振发生条件相吻合, 很好地再现了风电串补输电系统的次同步谐振现象。

### 3.2 风电附加阻尼控制的仿真

采用提出的附加阻尼控制方法后, 高通滤波环节的特征频率为 30 Hz, 其他仿真条件如图 6 所示, 得到的仿真波形如图 8 所示。



(a) 双馈风机-串补输电系统仿真框图



(b) 仿真时的风速及风机台数变化

图6 双馈风机串-补仿真条件框图  
Fig. 6 Simulation condition of DFIG series compensation system

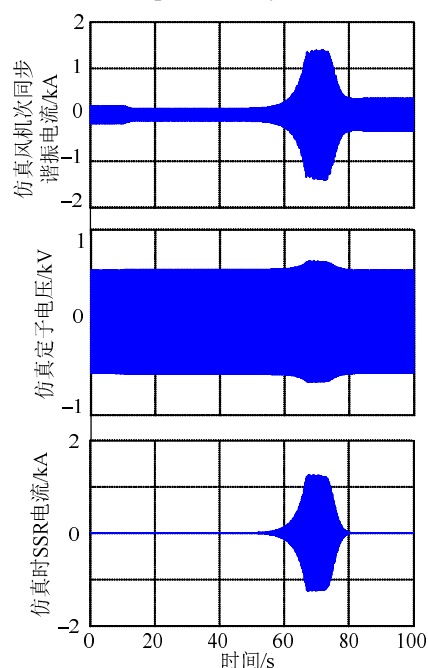


图7 风电串补输电系统的次同步谐振

Fig. 7 SSR of wind power series compensation system

对比图7和图8可以看出,通过转子侧附加阻尼控制,很好地抑制了风电串补输电系统的次同步谐振,表明提出的方法的正确性。

#### 4 结论

本文针对由双馈风机控制造成的双馈风机-串补输电系统的次同步谐振问题,通过建立双馈风机的数学模型,推导双馈风机的传递函数,提出了基

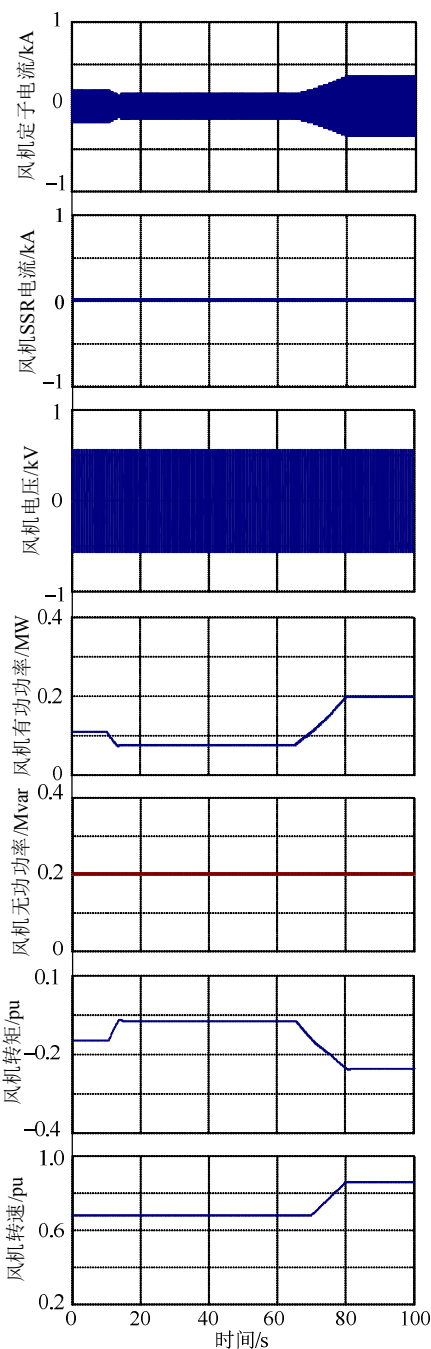


图8 次同步电流附加阻尼控制仿真波形  
Fig. 8 Result of modify RSC control

于次同步电流附加阻尼抑制方法,并对该方法进行了分析,最后通过仿真对提出的抑制措施进行了验证,主要结论如下:

1) 双馈风机控制导致的负阻尼是引起双馈风机-串补输电系统次同步谐振的主要原因,双馈风机的等效电阻与  $R_r$ 、 $L_r$ 、 $s$ 、 $k_p$  和  $T_i$  有关,而  $L_r$  与线路及串补度有关。

2) 采用本文提出的次同步电流附加阻尼控制,避免了基于多重旋转坐标系分频同步方法,该策略不影响原有控制器特性,其次同步频率下的阻尼可调,可以有效抑制次同步谐振。



## 参考文献

- [1] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.  
Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646(in Chinese).
- [2] 刘昌金. 适应电网环境的双馈风电机组变流器谐振抑制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] 黄杰, 陈武晖, 董德勇, 等. 面向风电场 SSO 抑制的 TCSC 参数电磁暂态智能优化方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2411-2417.  
Huang Jie, Chen Wuhui, Dong Deyong, et al. EMTP-based smart optimization of TCSC parameters oriented for mitigating wind farm SSO[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2411-2417(in Chinese).
- [4] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012(1): 10-14.  
Bi Tianshu, Kong Yongle, Xiao Shiwu, et al. Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012(1): 10-14(in Chinese).
- [5] 娄素华, 李志恒, 高苏杰, 等. 风电场模型及其对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 330-334.  
Lou Suhua, Li Zhiheng, Gao Sujie, et al. Wind farms models and its impacts on wind farms integration into power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 330-334(in Chinese).
- [6] 晏小彬, 刘天琪, 李兴源, 等. 大型风电场次同步谐振分析[J]. 华东电力, 2012(8): 1328-1333.  
Yan Xiaobin, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Sub-synchronous resonance of large-scale wind farm[J]. East China Electric, 2012(8): 1328-1333(in Chinese).
- [7] 田旭, 姜齐荣, 谢小荣. 电力系统次同步谐振抑制措施综述[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 74-79.  
Tian Xu, Jiang Qirong, Xie Xiaorong. Review of measures to mitigate subsynchronous resonance in power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 74-79(in Chinese).
- [8] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079.  
Li Ran, Lu Yun, Liu Huilan, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079(in Chinese).
- [9] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149.  
Zhang Jian, Xiao Xiangning, Gao Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on sub-synchronous control interaction of a DFIG-based wind-power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149(in Chinese).
- [10] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场抑制系统次同步振荡分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1613-1620.  
Li Hui, Chenyaojun, Zhao Bin, et al. Analysis and control strategies for depressing system sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1613-1620(in Chinese).
- [11] 董晓亮, 谢小荣, 刘辉, 等. 双馈风力发电机串补输电系统全运行区域的次同步特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2429-2433.  
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Liu Hui, et al. SSR characteristics of a wind farm connected to series-compensated transmission system under all operation region of DFIG[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2429-2433(in Chinese).
- [12] 董晓亮, 谢小荣, 杨煜, 等. 双馈风机串补输电系统次同步谐振影响因素及稳定区域分析[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 189-193.  
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Yang Yu, et al. Impacting factors and stable area analysis of subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 189-193(in Chinese).
- [13] Miao Z. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [14] Fan Lingling, Yin Haiping, Miao Zhixin. On active/reactive power modulation of DFIG-based wind generation for interarea oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 513-521.
- [15] 王立新, 程林, 孙元章, 等. 双馈风电机组有功-无功混合调制阻尼控制[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 406-413.  
Wang Lixin, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. A hybrid power modulation damping controller for doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 406-413(in Chinese).
- [16] El-Moursi M S, Bak-Jensen B, Abdel-Rahman M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 429-441.
- [17] 王波, 卢继平, 龚建原, 等. 含双馈机组转子侧附加控制的风电场次同步振荡抑制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2580-2584.  
Wang Bo, Lu Jiping, Gong Jianyuan, et al. A method to suppress sub-synchronous oscillation of wind farm composed of doubly fed induction generators with additional rotor side control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2580-2584(in Chinese).
- [18] 顾威, 李兴源, 王渝红, 等. UPFC 对风电场次同步谐振的抑制作用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 101-105.  
Gu Wei, Li Xingyuan, Wang Yuhong, et al. Mitigation effects of UPFC on subsynchronous oscillation in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 101-105(in Chinese).
- [19] Miao Zhixin, Fan Lingling, Osborn D, et al. Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 415-422.



收稿日期: 2015-07-27。

作者简介:

胡应宏(1981), 男, 博士后, 高级工程师, 研究方向为新能源并网稳定与控制, Email: factshu@163.com;

邓春(1971), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压设备诊断与测试、管理工作;

谢小荣(1975), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事柔性输电系统、WAMS 和次同步谐振等方面的研究。

(责任编辑 王金芝)