

DOI: 10.7667/PSPC170748

引入比例谐振调节器的双馈电机转子电流无速度传感器控制

张文娟¹, 马浩淼², 高蕊¹

(1. 宝鸡文理学院电子电气工程学院, 陕西 宝鸡 721016; 2. 陕西师范大学计算机科学学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 双馈风力发电机转子电流模型参考自适应系统(MRAS)的转速估算方法中, 由于定、转子电压、电流采样信号的漂移及AD转换的偏差, 致使所估计的双馈电机转速幅值中呈现不同程度的交流脉动。针对此问题, 提出了在自适应实时调节机构中, 采用PI并联比例谐振(PR)控制器共同作用的控制策略。该方法可消除转速估计中角频率和转差频率的交流脉动, 实现转速精确估计, 提高双馈电机发电质量。基于10 kW的双馈风力发电模拟平台进行了实验研究, 通过与PI控制对比验证了PI并联比例谐振控制的优越性。

关键词: 比例谐振调节器; 双馈电机; 模型参考自适应算法; 无速度传感器; 转子电流

Rotor current speed sensorless control of doubly-fed induction generator based on proportional resonant regulator

ZHANG Wenjuan¹, MA Haomiao², GAO Rui¹

(1. School of Electron and Electricity Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China;

2. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In the Model Reference Adaptive System (MRAS) rotor estimation method based on Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) rotor current, the estimation speed amplitudes of DFIG show different degrees AC ripple because of stator, rotor voltage and current sample signal drift and AD transform deviation. On this basis, a control strategy based on PI and Proportional Resonant (PR) controller is proposed in the adaptive adjusting mechanism. AC ripple in the speed estimation caused by the angular frequency and slip frequency can be eliminated in the proposed method, accurate speed estimation is achieved and the power generation quality of doubly fed generator is improved. Experiments are carried out based on 10 kW doubly fed wind power generation simulation platform, the superiority is verified by comparing with PI control and PI parallel proportional resonant control.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207002), Industrial Science and Technology Research of Shaanxi Province (No. 2013K07-12 and 2016GY-130), and Natural Natural Scientific Research Program Funded by Shaanxi Province (No. 2014JM8347).

Key words: proportional resonant regulator; doubly-fed induction generator (DFIG); model reference adaptive system (MRAS); speed sensorless; rotor current

0 引言

高动、稳态性能的双馈电机调速控制系统需要安装速度传感器来获得准确的电机转速进行闭环控制^[1]。通常, 大功率机组的高精度速度传感器价位昂贵, 安装与后期的维护困难^[2], 并且速度传感器

在传输过程中容易出现故障或信号丢失现象, 影响双馈风力发电系统控制性能。目前, 具有良好应用价值的基于模型参考自适应(Model Reference Adaptive System, MRAS)算法的双馈电机无速度传感器定子电压为参考模型, 以定子电流为可调模型研究得到了高度关注^[3]。其以 $\alpha\beta$ 坐标系下的双型估算出双馈电机转速, 但该方法受电机运行状态影响较大^[4]。

针对此问题, 文献[5]提出一种基于两相旋转 d 、 q 坐标系的转子电流MRAS转速估算方法, 该算法的核心是将测试所得两相旋转坐标的转子电流作为可调模型输出, 将定子电压和电流计算得到的转子

基金项目: 国家自然科学基金(51207002); 陕西省科技厅工业攻关项目(2013K07-12, 2016GY-130); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JM8347); 陕西省教育厅专项研究计划项目(17JK0049); 陕西师范大学中央高校科研项目(GK201402039)

电流作为参考模型输出, 通过对自适应机构中误差信号的比例积分(PI)调节获得双馈电机转速信号。可有效解决转子励磁电流分量过低时, 观测动态响应较差的问题。深入研究发现, 上述算法中使用传统 PI 调节器虽实现简单, 稳定性好, 但难以对交流量达到零稳态误差控制^[6-7]。双馈电机实际运行时, 由于定、转子电流采样信号的漂移以及 AD 转换偏差等原因使得所控制的定、转子电压、电流中出现直流偏量^[8], 直流偏量的存在势必引起参考模型及可调模型 d 、 q 变换中产生交流分量, 而传统 PI 调节难以对交流量实现零误差控制, 从而导致估算转速中出现不同程度的交流脉动, 影响系统控制性能。基于此, 本文提出在文献[5]PI 控制基础上, 引入比例谐振控制共同作用的双馈电机转子电流无速度传感器观测方法, 用以消除参考模型及可调模型 d 、 q 分量中的交流脉动, 提高转速估算质量和精度, 设计的 10 kW 双馈风力发电模拟平台验证了所提算法的有效性。

1 双馈电机数学模型

定子侧采用发电机惯例, 转子侧采用电动机惯例, 同步旋转 d 、 q 坐标系下, DFIG 数学模型可描述为^[9-10]

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}, u_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_{sr} \psi_{qr}, u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_{sr} \psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr}, \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds}, \psi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{ds} 、 u_{qs} , u_{dr} 、 u_{qr} 分别为定、转子 d 、 q 轴电压; i_{ds} 、 i_{qs} , i_{dr} 、 i_{qr} 分别为定、转子 d 、 q 轴电流; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} , ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别为定、转子 d 、 q 轴磁链; L_s 、 L_r 为定、转子自感; L_m 为互感; ω_s 、 ω_{sr} 分别为双馈电机同步角速度和转差角速度; R_s 、 R_r 为定、转子电阻。

2 引入比例谐振的双馈电机转子电流 MRAS 速度估计

2.1 基于转子电流的 MRAS 速度估计

MRAS 转速估计算法的主要思想为^[11-12]: 同一个给定输入条件下, 将不含转速信息的数学模型作为 MRAS 的参考模型, 将含有转速信息的数学模型作为 MRAS 的可调模型, 两者的输出偏差值经自适应机构来实时调节, 从而修正可调模型中待辨识的

转速信号, 直至两个模型输出量误差趋于零, 此时可调模型中待估计转速近似等于实际转速值。根据文献[5]所提算法, 将测试所得两相旋转坐标的转子电流作为可调模型输出, 将定子电压和电流计算得到的转子电流作为参考模型输出, 通过对误差信号的比例积分(PI)调节获得双馈电机转速估算值为

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{qr}^* i_{dr}^* - i_{dr} i_{qr}^*) \quad (3)$$

式中, 参考模型输出为

$$i_{dr}^* = (u_{qs} / \omega_1 + L_s i_{ds}) / L_m, i_{qr}^* = i_{qs} L_s / L_m \quad (4)$$

可调模型输出为 dq 坐标系下的测试转子电流。

$$i_{dqr} = i_{abcr} e^{-j(\omega_s - \omega_r)t} = i_{abcr} e^{-j\omega_{sr}t} \quad (5)$$

式中, i_{abcr} 为三相静止坐标系下利用传感器检测到的转子电流。根据式(4)和式(5), 转子电流矢量参考值与观测值之间的误差为

$$e = i_{qr}^* i_{dr}^* - i_{dr} i_{qr}^* \quad (6)$$

2.2 比例谐振的引入及设计

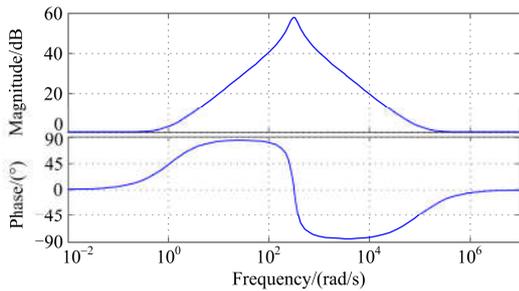
由 MRAS 的原理及式(3)可知, 双馈电机转速估计的准确性取决于参考模型输出量 i_{dr}^* 、 i_{qr}^* 及可调模型输出量 i_{dr} 、 i_{qr} 的准确性。在实际工业现场, 由于定、转子电压、电流采样信号的漂移及 AD 转换的偏差, 加之双馈电机在极端条件下的磁路饱和和互感发生变化, 致使定、转子电压、电流中产生直流偏量, 这些直流偏量对于定子电压、电流而言, 经过定子同步旋转 d 、 q 坐标变换后, 使参考模型计算式中的 u_{qs} 、 i_{ds} 、 i_{qs} 产生角频率为 ω_s 的交流量; 对于转子电流中的直流偏量, 经过转子同步旋转坐标变换后, 使可调模型计算式中的 i_{dr} 、 i_{qr} 出现转差频率为 ω_{sr} 的交流量。而在式(3)的自适应调节机构中, 采用传统 PI 调节, PI 控制对于直流量能完全消除稳态误差, 但是对于该算法中出现的角频率为 ω_s 和转差频率为 ω_{sr} 的交流量却难以实现零误差控制。因此导致所估计的双馈电机转速幅值中呈现不同程度的交流脉动, 反映到双馈电机定子侧, 使定子电压出现不同程度的交流脉动。

针对于此, 速度估计的自适应调节机构中, 采用在传统 PI 调节基础上, 并联一比例谐振控制器(PR), 分别对角频率为 ω_s 和 ω_{sr} 的交流量进行补偿。鉴于实际应用中元器件参数的测量误差及数字控制器表达精度的限制, 改进型比例谐振控制器更有使用价值, 其表达式为^[13]

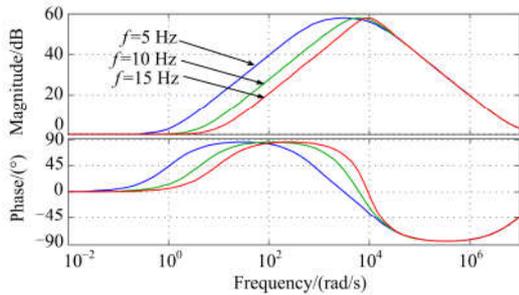
$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (7)$$

式中: K_p 、 K_r 分别为比例和积分系数; ω_0 为谐振频率; ω_c 是截止频率。

对参考模型计算式中 u_{qs} 、 i_{ds} 、 i_{qs} 产生的 ω_s 交流量进行设计补偿。取 $K_p=1$ ， $K_r=800$ ，将谐振频率 ω_0 的值设为角频率 $\omega_s=100\pi$ 时，改进型比例谐振控制器的波特图如图 1(a)所示。对可调模型计算式中 i_{dr} 、 i_{qr} 产生的 ω_{sr} 交流量进行设计补偿。 K_p 、 K_r 取值不变，双馈电机一般运行在转差率为 ± 0.3 的工况下^[14-15]，因此，将谐振频率 ω_0 分别设为 10π 、 20π 、 30π (对应转子电流频率分别为 5 Hz、10 Hz、15 Hz) 时，改进型比例谐振控制器的波特图如图 1(b)所示。可以看出，在角频率 ω_s 和 ω_{sr} 处，改进型比例谐振控制器的增益接近 60 dB，基本可实现零稳态误差控制。



(a) ω_0 为定子角频率 ω_s 时改进型 PR bode 图



(b) ω_0 为不同转差角频率 ω_{sr} 时改进型 PR bode 图

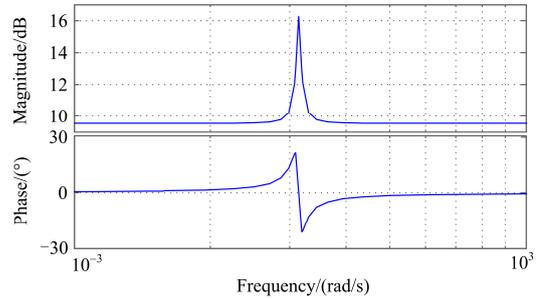
图 1 改进型比例谐振控制器波特图

Fig. 1 Bode graph of modified proportional resonant controller

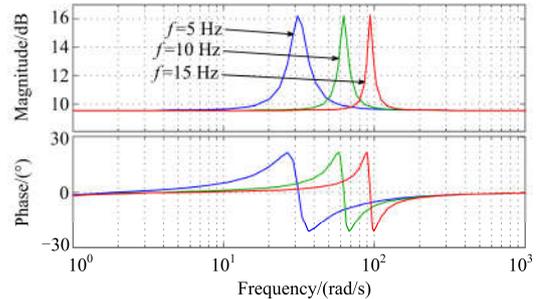
图 2(a)和图 2(b)分别给出了传统 PI 调节器并联比例谐振控制器的幅频特性(为了增加转速估计过程中的稳定裕量，PI 和 PR 中的比例系数均取为 0.1)。可以看出，采用并联结构后，控制器在角频率 $\omega_s=100\pi$ 处的增益突然变大，并且该处的相角裕度为无穷大，但对其他频率处的信号不受影响，因此能够消除转速自适应辨识机构中交流量的脉动，实现双馈电机转速精确估计。

综上所述，基于比例谐振调节器的双馈电机转子电流 MRAS 转速观测器结构如图 3 所示。在文献[5] PI 控制基础上，并联改进型控制器 PR1 和 PR2，这样既可对转速自适应辨识中的直流信号保持零稳态误差控制，又可对其中的定子角频率 ω_s 及转差角频

率 ω_{sr} 起到补偿作用，消除转速辨识中交流脉动，提高双馈发电机发电质量。



(a) ω_0 为定子角频率 ω_s 时 PI 并联改进型 PR bode 图



(b) ω_0 为不同转差角频率 ω_{sr} 时 PI 并联改进型 PR bode 图

图 2 PI 并联改进型 PR 控制器波特图

Fig. 2 Bode graph of modified PR controller in parallel with PI

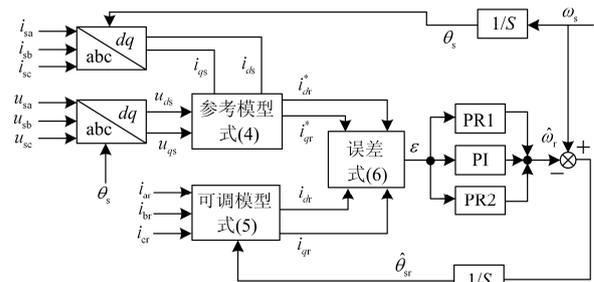


图 3 PI 并联改进型 PR 转速观测器结构

Fig. 3 Speed observer structure of modified PR controller in parallel with PI

3 实验研究

为了验证所述方法的可行性，搭建了基于 DSP28335 控制器的双馈风力发电模拟实验平台。图 4 为模拟平台中的直流机与双馈电机机组，图 5 为双馈变流器及其控制系统。实验中所采用的双馈电机参数为： $R_s=0.7\ \Omega$ ， $R_r=0.59\ \Omega$ ， $X_s=0.66\ \Omega$ ， $X_r=1.29\ \Omega$ ， $X_m=22.8\ \Omega$ ，极对数为 3。图 6 为系统启动时观测与实测转速对比。可以看出，转速辨识自适应机构中仅采用 PI 控制时，所估计的转速有较大过冲，经过一段时间稳定后有明显的交流脉动；采用本文所提的 PI 并联 PR 控制器后，转速辨识基

本能准确跟踪光电编码器所测量实际转速。图 7 为两种控制策略下, 双馈电机转速从超同步速 1 130 r/min 变化到亚同步速 900 r/min 时的估计转速和转子电流波形, 进一步验证了本文所提控制策略的优越性。图 8(a)所示的 PI 控制时, 因转速辨识波动而使定子电压呈现不同程度的脉动, 脉动量最大可达 4%; 图 8(b)采用 PI 并联 PR 控制, 定子电压幅值几乎无脉动。



图 4 双馈电机

Fig. 4 Doubly fed generator



图 5 双馈变流器及其控制系统

Fig. 5 Doubly-fed converter and its control system

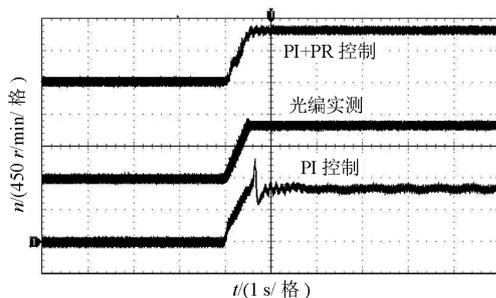
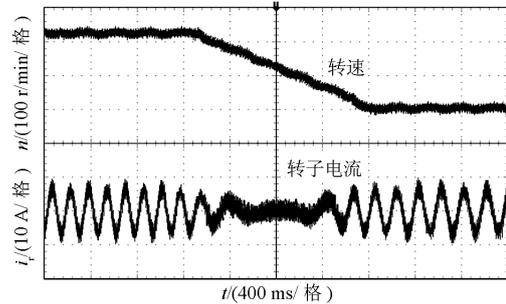
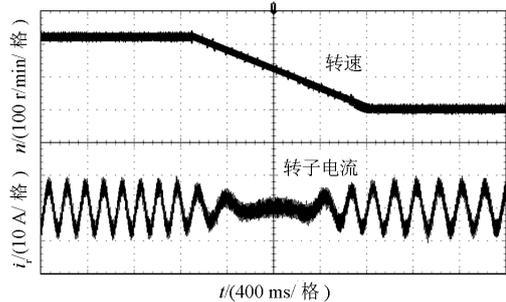


图 6 系统启动时观测与实测转速比较

Fig. 6 Comparison of system starting with observed and measured speed



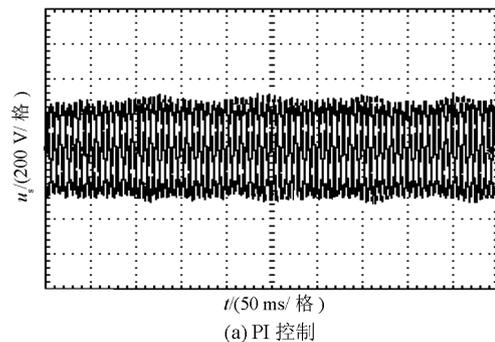
(a) PI 控制



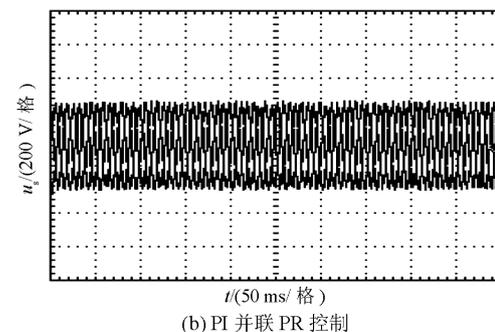
(b) PI 并联 PR 控制

图 7 转速下降对比

Fig. 7 Comparison of speed down comparison



(a) PI 控制



(b) PI 并联 PR 控制

图 8 定子电压对比

Fig. 8 Comparison of stator voltage

4 结论

针对基于双馈电机转子电流的 MRAS 转速估计方法, 提出了在转速自适应机构中采用 PI 并联比

例谐振控制器共同作用的控制方法。该方法可有效减小小转速估计的交流脉动, 进而提高双馈发电机的发电质量, 控制算法简单, 易于实现, 具有一定的工程实用化价值。

参考文献

- [1] 张越雷, 黄科元, 蒋智, 等. 基于估算电流模型的永磁同步电机无速度传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 68-74.
ZHANG Yuelei, HUANG Keyuan, JIANG Zhi, et al. Speed sensorless control of PMSM based on estimated current model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 68-74.
- [2] CARROLL J, MCDONALD A, MCMILLAN D. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 63-70.
- [3] ABDEDDAIM S, BETKA A, DRID S, et al. Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine[J]. Energy Conversion Management, 2014, 79(2): 81-89.
- [4] DATTA R, RANGANATHAN V T. A simple position sensorless algorithm for rotor side field oriented control of wound rotor induction machine[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2001, 48(4): 86-93.
- [5] 柴秀慧, 张纯江, 藏洵. 一种新型双馈发电机转子位置估算方法研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(1): 42-44.
CHAI Xiuhui, ZHANG Chunjiang, ZANG Xun. Research on a novel doubly fed generator rotor position estimation method[J]. Power Electronics, 2017, 51(1): 42-44.
- [6] YUAN X, MERK W, STEMMLER H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [7] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [8] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 变速恒频双馈风力发电机投切控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 103-108.
YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Cut-in/out control strategies for doubly fed induction generator driven by variable-speed wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 103-108.
- [9] ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Junli, et al. Multi-objective fuzzy-optimization of crowbar resistances for the low-voltage ride-through of doubly fed induction wind turbine generation systems[J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(4): 1119-1130.
- [10] 念丽波, 张文斌, 苏适, 等. 全开放可实时监控式双馈风力发电实验平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 104-111.
NIAN Libo, ZHANG Wenbin, SU Shi, et al. Study on full-open and monitoring-able experiment platform for DFIG wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 104-111.
- [11] PENG F Z, FUKAO T. Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(5): 1234-1240.
- [12] 胡维昊, 王跃, 李明烜, 等. 基于 MRAS 的多相永磁直驱型风力发电系统无速度传感器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 118-124.
HU Weihao, WANG Yue, LI Mingxuan, et al. Research on sensorless control strategy of direct drive multi-phase PMSG wind power generation system based on MRAS[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 118-124.
- [13] 孙强, 魏克新, 王莎莎, 等. PWM 变换器在矢量旋转坐标系下比例谐振控制策略及其鲁棒性设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1344-1355.
SUN Qiang, WEI Kexin, WANG Shasha, et al. A novel proportional resonant control strategy and robust design in rotary vector frames for PWM converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1344-1355.
- [14] ADEMI S, JOVANOVIĆ M. Control of doubly-fed reluctance generators for wind power applications[J]. Renew Energy, 2016, 85: 171-80.
- [15] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2017-08-19

作者简介:

张文娟(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电技术; E-mail: zhangwj19811130@163.com

马浩淼(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电技术。E-mail: mahaomiao@snnu.edu.cn

(编辑 周金梅)