

基于转子电流的模型参考自适应模糊控制双馈风力发电机 转子位置观测器设计

康忠健¹, 吕学志¹, 陈天立², 訾淑伟¹

(1. 中国石油大学(华东)电气工程系, 山东 东营 257061; 2. 中国核电工程有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 空间矢量控制技术可以实现双馈风力发电机的功率解耦控制, 在控制过程中需要对转子位置进行检测。针对常规的基于转子电流的双馈风力发电机模型参考自适应转子位置观测器的不足, 提出了一种基于转子电流的模型参考自适应模糊控制双馈风力发电机位置观测器的设计方法。该方法将参数自整定模糊 PI 控制技术引入转子位置观测器的设计中, 以提高转子观测器的跟踪效果和动态品质。Matlab/Simlink 仿真结果表明所设计的模型参考自适应模糊控制转子位置观测器能够快速准确地估测转子速度和位置角度, 具有良好的动态品质。

关键词: DFIG; 无速度传感器; 矢量控制; 转子电流; 模糊 PI 控制

Design of the double-fed induction generator rotor position observer based on the model reference adaptive fuzzy control with the rotor currents

KANG Zhong-jian¹, Lü Xue-zhi¹, CHEN Tian-li², ZI Shu-wei¹

(1. Dept of the Electric Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Zhengzhou Branch of China Nuclear Power Engineering Co, Ltd, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The space vector control is used to control the active power and reactive power of the doubly-fed induction generator (DFIG) respectively. It is necessary to detect the rotor position during the control process. The model reference adaptive fuzzy control (MRAFC) rotor position observer with rotor current is proposed to overcome the shortcomings of the conventional model reference adaptive control (MRAC) rotor position observer in this paper. The parameter self-tuning fuzzy PI controller is used to design the rotor position observer with the proposed method to improve the tracing results and the dynamic performances of the rotor position. The simulation results in Matlab/Simlink suggest that the MRAFC rotor position observer has a nice dynamic performance and the observer can trace the rotor speed and rotor position angle quickly and accurately.

Key words: DFIG; speed-sensorless; vector control; rotor currents; fuzzy PI control

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0072-05

0 引言

双馈风力发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 在中、大功率变速发电机中应用非常广泛, 电机结构坚固而且很少需要维护。在电网电压恒定下, 对 DFIG 的控制无论是采用定子磁链定向矢量控制还是采用电网电压定向矢量控制, 控制系统中都需要对转子位置进行检测。由于使用光电编码器存在着增加设备成本、降低系统的鲁棒性等弊端^[1], 因此对无速度传感器的 DFIG 控制技术的研究和应用受到很大关注。

模型参考自适应控制 (Model Reference

Adaptive Control, MRAC) 在鼠笼式异步电机无速度传感器交流调速中的应用已有了很多研究成果^[2-3]。双馈风力发电机由于转子电流是可以测量得到的, 这为 DFIG 无速度传感器的设计提供了条件^[4-6]。转子位置的估计可以采用开环的方式直接由定子电压和定子电流计算得到转子速度, 然后通过积分运算得到转子位置角, 然而采用开环方式对电机参数对依赖性大而估测的准确性较差。文献[6]设计了基于 DFIG 转子电流的 MRAC 转子位置观测器, 具有较好的观测效果, 但该观测器对 DFIG 转子位置的跟踪动态品质和外扰响应的快速性还有待于进一步提高。

本文采用模型参考自适应模糊控制 (Model Reference Adaptive Fuzzy Control, MRAFC) 方法设计 DFIG 转子位置观测器, 以提高转子位置观测器的性能。该方法将通过定子电压和定子电流估算得到的转子电流与测得转子电流比较, 将其误差经过参数自整定模糊 PI 控制调节得到转子的转速, 使转子电流的测得值与估测值之间的偏差趋于零, 从而达到对转子位置进行观测的目的。最后在 Matlab/Simlink 环境下对所设计的基于转子电流的 MRAFC 转子位置观测器进行了仿真验证。

1 基于转子电流 MRAC 转子位置观测器^[6]

双馈发电机在同步旋转 dq 坐标系下的磁链方程^[7]为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} - L_m i_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

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

式中: ψ_{ds} , ψ_{qs} 为定转子磁链的 d、q 轴分量; ψ_{dr} , ψ_{qr} 为转子磁链的 d、q 轴分量; L_m 为 dq 坐标系下同轴定、转子绕组间的等效互感; L_s 为 dq 坐标系下两相定子绕组的自感; L_r 为 dq 坐标系下两相转子绕组的自感。

电压方程^[7]为:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - p\psi_{ds} + \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} - p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p 为微分算子; u_{ds} , u_{qs} 为定子电压的 d、q 轴分量; u_{dr} , u_{qr} 为转子电压的 d、q 轴分量; i_{ds} , i_{qs} 为定子电流的 d、q 轴分量; i_{dr} , i_{qr} 为转子电流的 d、q 轴分量; $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为 dq 坐标系相对于转子的角速度, ω_1 、 ω_r 分别为电角速度和转子角速度。

转矩方程^[7]为:

$$T_e = n_p L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \quad (5)$$

在定子磁场定向后有 $\psi_{qs} = 0$, 由式 (1) 得出方程式 (6):

$$i_{qr} = \frac{L_s}{L_m} i_{qs} \quad (6)$$

在 $\alpha - \beta$ 坐标系下定子磁通可以由定子电压、定子电流计算得到:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha s} = \int (u_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \psi_{\beta s} = \int (u_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \end{cases} \quad (7)$$

对于并网的 DFIG 矢量控制系统由定子磁通矢量来控制, 定子磁链的空间角可以由 $\alpha - \beta$ 坐标系下定子磁通得到:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{\beta s}}{\psi_{\alpha s}} \right) \quad (8)$$

由于转子电流 i_r 实际值可以直接测得, 而转子电流的估计值可以由定子电压、定子电流获得。

定子磁通为:

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r e^{j\theta_r} \quad (9)$$

由式 (9) 可以得到转子电流:

$$i_r = \frac{\psi_s - L_s i_s}{L_m} e^{-j\theta_r} \quad (10)$$

将式 (10) 中的 θ_r 用转子角度估测值 $\hat{\theta}_r$ 代替, 便可以得到转子电流的估测值:

$$\hat{i}_r = \frac{\psi_s - L_s i_s}{L_m} e^{-j\hat{\theta}_r} \quad (11)$$

转子电流实际值与估测值之间的偏差在 $\alpha - \beta$

坐标系下定义为 i_r 和 \hat{i}_r 的叉乘, 即:

$$\varepsilon = \hat{i}_{\alpha r} i_{\beta r} - i_{\alpha r} \hat{i}_{\beta r} = |i_r| |\hat{i}_r| \sin(\theta_r - \hat{\theta}_r) \quad (12)$$

令 $\theta_{\text{error}} = \theta_r - \hat{\theta}_r$, 即实际转子角与估测转子角的差值。则式 (12) 可写为:

$$\varepsilon = |i_r| |\hat{i}_r| \sin(\theta_{\text{error}}) \quad (13)$$

由式 (13) 可以看出当 $\theta_{\text{error}} = 0$ 时, 便可以准确地估测出转子角度和转子速度。

把速度推定归为参考辨识, 则可以用自适应理论构建速度辨识系统, 在这种情况下系统为非线性系统, 在利用波波夫超稳定定理设计模型参考自适应速度辨识的基本思想是^[8]选择合适的自适应律, 保证系统误差趋于零, 使受控对象参数趋于参考模型, 从而达到自适应控制的目的。所以自适应系统采用 PI 自适应控制规律, 则角速度的辨识公式可表述为:

$$\hat{\omega}_r = (K_p + \frac{K_i}{s})\varepsilon \quad (14)$$

其中, K_p 、 K_i 分别为 PI 调节器的比例、积分系数。

基于转子电流的 MRAC 无速度传感器速度观测器控制结构如图 1 所示。

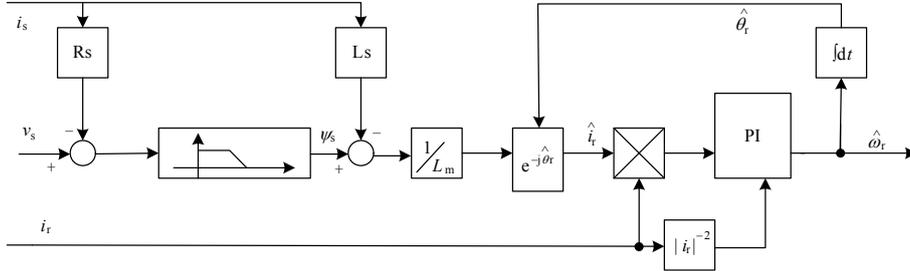


图 1 基于转子电流的 MRAC 无速度传感器速度观测器控制结构图

Fig.1 Block diagram of MRAC speed-sensorless rotor speed observer based on current

图 1 中 PI 控制器通过调节 $\hat{\omega}_r$ 来使式 (13) 所表示偏差 ε 趋近于零, 定子磁通由定子电压和定子电流计算得到, 计算过程中用低通滤波器代替计算过程中的积分运算环节, 避免因初始值或一些干扰而造成直流偏置^[9]。框图中用“X”表示叉乘, PI 控制器的输出即为转子角速度的估测值, 将其进

行积分运算后得到转子的位置角。因为定子电流的大小 $|i_r|$ 随着 DFIG 输出功率的变化而变化, 所以在控制环节中引入可变增益 $|i_r|^{-2}$ 以消除转子电流变化带来的增益影响。

基于转子电流 MRAC 无速度传感器的 DFIG 空间矢量控制如图 2 所示。

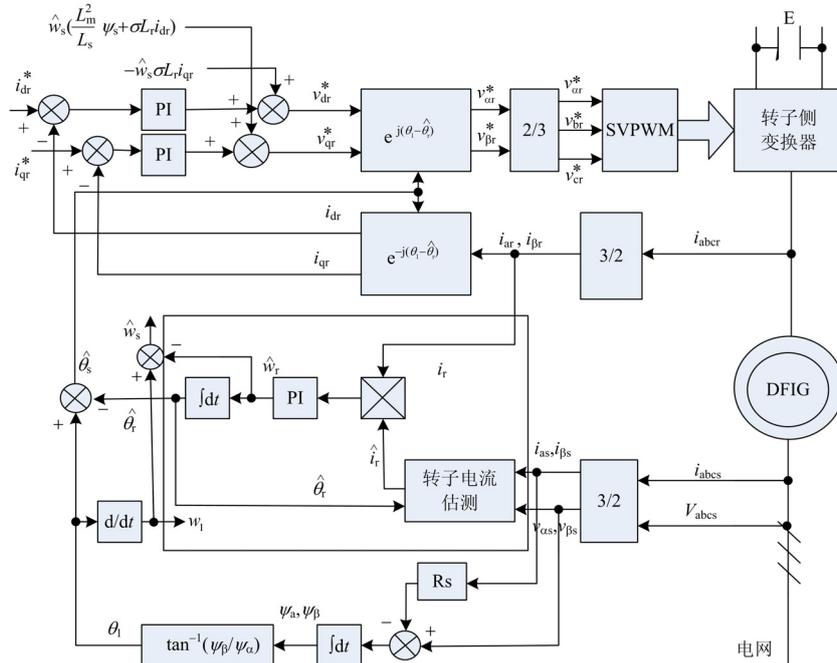


图 2 DFIG 基于转子电流 MRAC 无速度传感器空间矢量控制系统框图

Fig.2 Block diagram of speed-sensorless space vector control system of DFIG based on MRAC with rotor current

2 基于转子电流的 MRAC 转子位置观测器设计

基于转子电流的 MRAC 无速度传感器速度辨识观测器中的误差调节器采用传统 PI 控制器, 控制器参数固定不变, 当双馈风力发电机模型参数发生

改变时, 系统鲁棒性和动态品质有待于进一步提高。为了系统改变了传统 PI 控制器固定参数的不足, 采用模糊参数自调整技术对所得到的估计转子电流和测量转子电流误差进行调节, 根据误差信号的变化规律动态改变 PI 控制器的参数, 使转子观测位置可以快速准确地跟踪转子实际位置。基于转子电流的

模型参考自适应模糊控制 (MRAFC) 双馈风力发电 机位置观测器的结构图如图 3 所示。

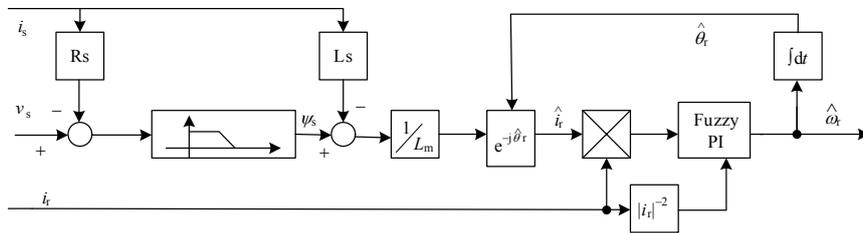


图 3 基于转子电流的 MRAFC 无速度传感器速度观测器控制结构图

Fig.3 Block diagram of MRAFC speed-sensorless rotor speed observer based on current

参数自整定的基本思想^[10]是当偏差或偏差变化率较大时, 进行“粗调”, 即放大比例系数 K_p 和 K_i ; 当偏差或偏差变化率较小时, 进行“细调”, 即缩小 K_p 和 K_i 。模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验, 建立合适的模糊控制表^[5], 表 1 和表 2 分别给出了 K_p 、 K_i 两个参数整定的模糊控制表, 从而设计出参数自整定模糊 PI 控制器的结构^[11]如图 4 所示。

表 1 K_p 的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rules table of K_p

EC	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z0	Z0
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z0	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z0	NS	NS
Z0	PM	PM	PS	Z0	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z0	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z0	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z0	Z0	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 的模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rules table of K_i

EC	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z0	Z0
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z0	Z0
NS	NB	NM	NS	NS	Z0	PS	PS
Z0	NM	NM	NS	Z0	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z0	PS	PS	PM	PB
PM	Z0	Z0	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z0	Z0	PS	PM	PM	PB	PB

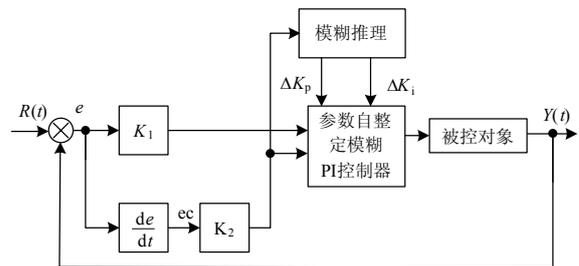


图 4 参数自整定模糊 PI 控制器控制框图

Fig.4 Diagram of parameters self-tuning fuzzy PI controller

基于转子电流 MRAFC 无速度传感器的 DFIG 空间矢量控制如图 5 所示。

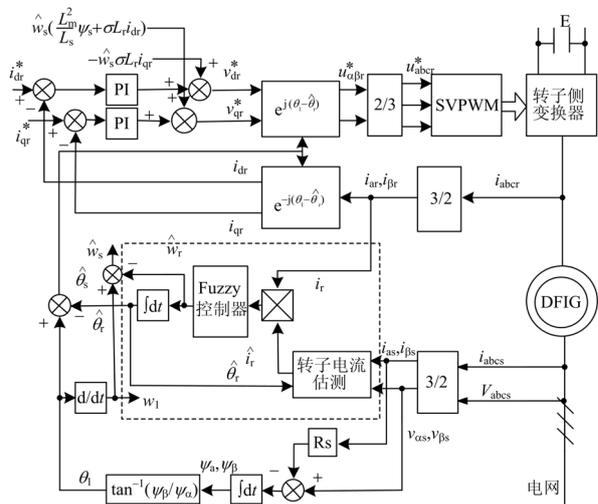


图 5 DFIG 基于转子电流 MRAFC 无速度传感器空间矢量控制系统框图

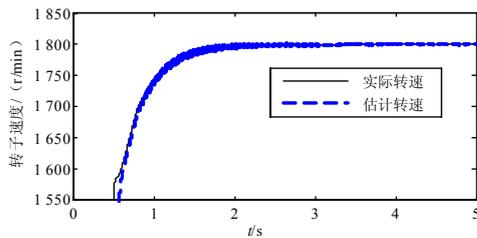
Fig.5 Block diagram of speed-sensorless space vector control system of DFIG based on MRAFC with rotor current

3 仿真分析

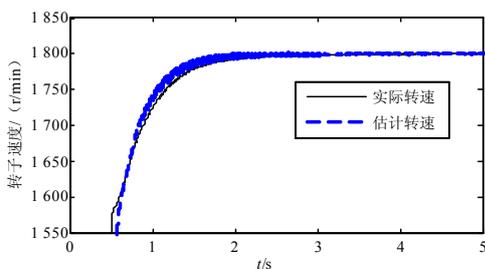
利用 Matlab/Simulink 搭建转子电流 MRAFC 无速度传感器的 DFIG 空间矢量控制系统的仿真模型

并进行仿真。电机参数为：额定视在功率 $S=1.5 / 0.9$ MVA，额定功率 1.5 MW，额定电压 690 V，定子电阻 $R_s=0.0014 \Omega$ ，定子漏感 $L_{ls}=8.998 \times 10^{-5}$ H，转子电阻 $R_r=9.9187 \times 10^{-4} \Omega$ ；转子漏感 $L_{lr}=8.2088 \times 10^{-5}$ H，定转子互感 $L_m=1.526 \times 10^{-5}$ H，极对数 $p=2$ ，转动惯量 $J=18.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，直流母线电压是 1500 V。

图 6 给出了转子速度跟踪的仿真波形，其中(a)和 (b) 分别为基于转子电流 MRAFC 和 MRAC 转子位置观测器的速度跟踪效果。



(a) MRAFC 转子位置观测器转速输出



(b) MRAC 转子位置观测器转速输出

图 6 转子位置观测器转速跟踪输出

Fig.6 Speed tracking of the rotor position observer

由图 6 可以看出，采用普通 PI 控制的观测器使速度估计有一些超调，且转速的波动较大需要经过较长时间才能够准确地估测，转速才能跟踪准确；而采用模糊技术控制的速度观测器，速度跟踪没有超调，且估计转速波动小，很快便能够准确地使跟踪转速达到稳定状态。充分体现了模糊控制的快速响应和抑制超调的特点。

转子位置角估测偏差如图 7 所示。

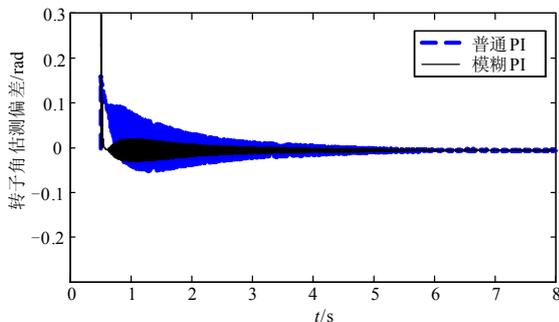


图 7 转子位置角估测偏差

Fig.7 Rotor position estimation error

由图 7 仿真结果可以看出：在起始阶段，采用模糊控制可以更快地准确地估测到转子的位置，加快了系统的响应速度，使系统更快地进入稳定状态。

在风速发生突变时转子位置角估测偏差如图 8 所示。

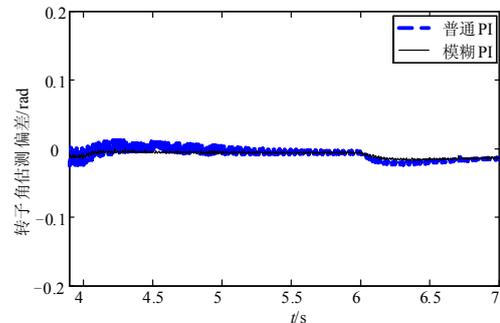


图 8 转子位置角估测偏差

Fig.8 Rotor position estimation error

由图 8 可以看出当风速发生变化时采用模糊控制可以快速地跟踪转子位置角，使系统更快地稳定；而采用普通 PI 控制系统不仅响应速度慢，而且当风速发生变化时，对转子位置角的估测偏差较大，系统稳定时间长，动态性能较差。说明了参数自整定模糊 PI 控制系统有较强的鲁棒性。

4 结论

本文设计了基于转子电流的模型参考自适应模糊控制 (MRAFC) 的 DFIG 转子位置观测器，与传统的 PI 控制的无速度传感器不同之处在于，本文采用了参数自整定 PI 控制技术，通过控制器的快速响应使系统获得最佳的动态 PI 参数，从而达到提高系统性能的目的，该方法不仅有模糊控制快速性的特点，还有传统 PI 控制稳态无静差的特性。仿真结果表明所设计的基于模糊技术的 DFIG 转子位置观测器与普通无速度传感器相比，依靠模糊控制器的自调整能力能够实时地按照系统的偏差对控制器参数进行调整，缩短了调节时间，可以更快更准确地实现转子速度和位置角的估测，在确保其稳态精度的同时提高了系统的动态性能。

参考文献

[1] 李永东. 交流电机数字控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
 [2] Schauder C. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1992, 28 (5) : 1054-1061.

- Taiwan power company[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5 (2): 460-465.
- [9] Shayesteh E, Moghaddam M, Taherynejhad S, et al. Congestion management using demand response programs in power market[C]. //2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy Power and Energy in the 21st Century. Pittsburgh (USA): 1-8.
- [10] Lawrence D J. 2001 performance of New York ISO demand response programs[C]. //IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2002: 995-998.
- [11] Tuan L A, Bhattacharya K. Interruptible load management within secondary reserve ancillary service market[C]. //IEEE Porto Power Tech Conference. Porto (Portugal): 2001: 1-6.
- [12] 罗运虎, 邢丽冬, 王勤, 等. 可靠性需求市场中用户的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (22): 113-117.
LUO Yun-hu, XING Li-dong, WANG Qin, et al. Risk decision-making for customer in reliability demand market[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (22): 113-117.
- [13] 都亮, 刘俊勇, 田立峰, 等. 电力市场环境下的秒级可中断负荷研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 26 (16): 92-97.
DU Liang, LIU Jun-yong, TIAN Li-feng, et al. Seconds level interruptible loads and application in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 26 (16): 92-97.
- [14] 赖业宁, 薛禹胜, 汪德星, 等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (16): 1-5.
LAI Ye-ning, XUE Yu-sheng, WANG De-xing, et al. Risk decision-making for reserve capacity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (16): 1-5.
- [15] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 62-66.
- [16] 张强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (2): 84-89.
ZHANG Qiang, HAN Xue-shan, XU Jian-zheng. Analysis of security economic dispatch and homogeneous dispatch[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17 (2): 84-89.
- [17] 查浩, 韩学山, 杨朋朋. 电网运行状态下的概率优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (28): 54-60.
ZHA Hao, HAN Xue-shan, YANG Peng-peng. Probabilistic optimal dispatching under operating condition of power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (28): 54-60.
- [18] 高亚静, 周明, 李庚银, 等. 基于马尔科夫链和故障枚举法的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (19): 41-46.
GAO Ya-jing, ZHOU Ming, LI Geng-yin, et al. Available transfer capability calculation based on markov chain and enumeration method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (19): 41-46.

收稿日期: 2010-06-05

作者简介:

于娜(1977-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力市场需求侧的研究; E-mail: yuna0616@163.com

于继来(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(上接第 76 页 continued from page 76)

- [3] Luis Romeral, Antoni Arias, Emilian Aldabas. Novel fuzzy adaptive sensorless induction motor drive[J]. IEEE Trans Ind Elctron, 2006, 53 (4) .
- [4] Roberto Cardenas, Ruben Pena, Greg Asher, et al. Sensorless control of induction machines for wind energy applications[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002.
- [5] CAO Jian-bo, CAO Bing-gang. Fuzzy-logic-based sliding-model controller design for position-sensorless electric vehicle[J]. IEEE Trans Ind Elctron, 2009, 24 (10) .
- [6] Ruben Pena, Roberto Cardenas, Jose Proboste, et al. Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer[J]. IEEE Trans Ind Elctron, 2008, 55 (1): 330-339.
- [7] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] 陈新海, 李言俊, 周军. 自适应控制及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
- [9] 胡虎. 新型直接转矩控制策略及无速度传感器运行的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [10] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [11] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

收稿日期: 2010-04-15; 修回日期: 2010-09-01

作者简介:

康忠健(1971-), 男, 副教授, 目前研究方向为电力系统分析与控制、电力系统故障检测与诊断和油田自动化设备开发; E-mail: kangzjzh@163.com

吕学志(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

陈天立(1983-), 男, 硕士, 从事电力系统分析与控制研究工作。