

一种新型双馈风力发电机无速度传感器的控制方式

陶 艳

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 风力发电系统中的转速传感器常常会带来一些不利的影响。文中介绍了一种双馈风力发电机的无速度传感器的控制方法,利用风电机组转动惯量大,速度变化慢的特点,通过测量转子的感应电动势,控制转子侧变流器给转子注入相应频率与相位的电流,从而控制电机的转矩与无功。文中推导了电机的控制方程式,给出了控制框图。通过仿真与实验,验证了该方法可以用于双馈风力发电机的控制。

关键词: 风力发电; 双馈电机; 矢量控制; 无速度传感器控制

Senseless Control Method of DFIG Wind Power System

TAO Yan

(Hunan Railway Professional Technology College, Hunan Zhuzhou 412001, China)

Abstract: A control method of DFIG wind power system is discussed in this paper. Since the large rotational inertia of the wind turbine, and the low speed variation of it, the speed of wind turbine can be seen as constant in a short interval. By measuring the EMF of rotor, control the rotor side inverter injecting the current into rotor with proper phase and frequency, the power and the reactive power of the machine can be controlled. Control equation and block are given. Simulation and experimental result verify the rightness of the method.

Key words: wind power system; DFIG; vector control; senseless control

0 引言

随着社会与经济的不断发展,能源与环境问题越来越突出,风力发电作为一种清洁、可再生的电能来源,越来越受到人们的重视。在风力发电机组的实现方式中,双馈风力发电系统应用最多。由于双馈变流器连接在转子侧,只处理转差功率,大大减少了系统对变流器额定容量的要求;转子侧变流器根据外界风速变化,通过矢量控制实现发电机的有功、无功功率解耦控制,进而调节发电机的转速实现最大风能的捕获^[1-4]。

目前,双馈风力发电系统当中,一般都安装有位置传感器,以实现转速的测量和位置的测量。利用定子磁场定向或者定子电压定向,实现矢量控制,以及有功和无功的解耦^[1-7]。上述控制方法中,通常采用光电码盘位置传感器。但对于风力发电系统,机舱空间有限,给码盘的安装和维护带来不便;

同时风场环境恶劣,码盘工作精度容易受环境条件的影响;此外为了提高发电量,风机高度较高,而变流器一般安装在塔桶底部,发电机则安装在塔桶顶部,故转子位置信号传输电缆需要穿过几十米的距离,虽然可以使用光纤传输测量信号,但是增加了系统的成本及复杂性,降低了控制的可靠性。

目前双馈电机无速度传感器控制比较的方法大都采用动态转速估算和模型参考自适应方法^[8-15]。动态转速估算基于动态电机方程从电机的电磁关系及转速的定义推导转差或转速关系的表达式。此方法直观,但由于对参数的准确性依赖很难以保证系统的抗扰性。模型参考自适应在较大范围内有着很好的性能,但是在低速时受参数变化影响严重,同时该方法设计观测器需要调节复杂的参数。在实施上有一定难度^[15]。

文中提出了一种方便的双馈电机无速度传感器的控制方法,通过检测电机转子侧的电流和电压,进行电机的转子感应电动势进行定向,以及转速估计,在转子感应电动势的同步旋转坐标系下,

实现双馈电机的无速度传感器控制。

1 双馈电机的控制方法

双馈风力发电系统的结构见图 1, 利用定子磁场定向的矢量控制方法能够使转矩和励磁电流完全解耦, 具备比较好的动态响应性能。考虑双馈系统的特点, 电机定子直接连接电网, 其电压幅值和频率可以看作基本不变。而且风力发电系统中风轮的转动惯量大, 加减速非常缓慢, 同时为了保证齿轮箱、主轴等转动部件的寿命, 也不要求发电机有快速加减速这样的动态响应能力, 因此发电机的转速不会发生较快的变化, 所以电机转差率不会发生突变, 即发电机的转速相对于变流器的控制变量来说是相对稳定的, 因此双馈电机的控制方法也可以采用一些稳态的量作为基础^[16-18]。

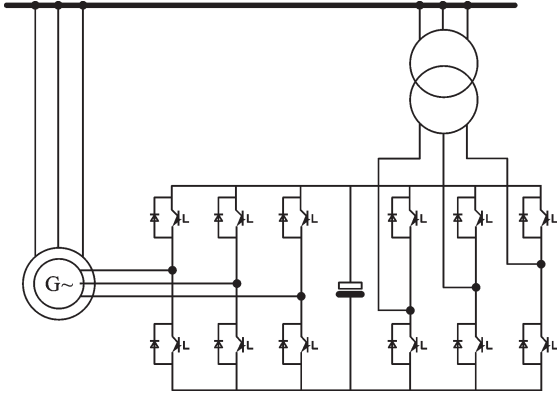


图 1 双馈风力发电系统结构

Fig. 1 DFIG wind power system

由于风力发电系统中风轮的转动惯量非常大, 且在运行过程中, 风轮的转速一般情况下不会发生突变。而转子绕组中的感应电动势可以看作是一个频率、幅值不断变化的电压源。以该电源作为定向的参考坐标系, 也可以很好地实现对发电机的控制。

根据以上分析, 如果结合双馈电机的稳态分析和瞬态控制, 在控制中只需要检测电机转子侧的电流和电压来对电机的转子感应电动势进行定向和转速估计, 便可以构成结构简单的双馈电机无速度传感器矢量控制系统。

2 无速度传感器的控制方式的原理

在转子静止坐标系下, 坐标轴相对于定子以转子的角速度 ω 旋转。而转子感应电动势相对于转子静止坐标系是以转差频率 $\omega_0 - \omega$ 的速率旋转, 因此以转子感应电动势定向的参考坐标系是以同步旋转速度 ω_0 旋转的坐标系。

根据 PARK 方程, 双馈发电机在同步旋转坐标

系下, 有下面的关系表达式^[19]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_0 (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_0 (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + L_m \frac{di_{sd}}{dt} - (\omega_0 - \omega) (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + L_m \frac{di_{sq}}{dt} + (\omega_0 - \omega) (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{cases}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \\ \psi_{md} = L_m i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{mq} = L_m i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} e_{rd} = L_m \frac{d(i_{rd} + i_{sd})}{dt} - (\omega_0 - \omega) L_m (i_{rq} + i_{sq}) \\ e_{rq} = L_m \frac{d(i_{rq} + i_{sq})}{dt} + (\omega_0 - \omega) L_m (i_{rd} + i_{sd}) \\ e_{sd} = L_m \frac{d(i_{sd} + i_{rd})}{dt} - \omega_0 L_m (i_{sq} + i_{rq}) \\ e_{sq} = L_m \frac{d(i_{sq} + i_{rq})}{dt} + \omega_0 L_m (i_{sd} + i_{rd}) \end{cases} \quad (3)$$

式(1)-(3)中: u_{sd} 为定子 d 轴电压; u_{sq} 为定子 q 轴电压; u_{rd} 为转子 d 轴电压; u_{rq} 为转子 q 轴电压; R_s 为定子电阻; L_s 为定子漏感; R_r 为转子电阻; L_r 为转子漏感; L_m 为定转子互感; i_{sd} 为定子 d 轴电流; i_{sq} 为定子 q 轴电流; i_{rd} 为转子 d 轴电流; i_{rq} 为转子 q 轴电流; ψ_{sd} 为定子 d 轴磁链; ψ_{sq} 为定子 q 轴磁链; ψ_{rd} 为转子 d 轴磁链; ψ_{rq} 为转子 q 轴磁链; e_{sd} 为定子 d 轴感应电动势; e_{sq} 为定子 q 轴感应电动势; e_{rd} 为转子 d 轴感应电动势; e_{rq} 为转子 q 轴感应电动势。

在转子感应电动势定向的坐标系中, $e_{rq}=0$, 可以推出

$$\begin{cases} i_{rd} = -i_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

同步旋转坐标系下有电机力矩表达式

$$T_{em} = L_m (i_{sd} i_{rq} - i_{rd} i_{sq}) \quad (5)$$

由式(4)可推导出

$$T_{em} = -i_{rd} L_m (i_{rq} + i_{sq}) = i_{rd} \frac{e_{rd}}{\omega_0 - \omega} \quad (6)$$

根据式(6), 通过控制转子的瞬时电流 i_{rd} 来控制电机的电磁力矩。

而定子侧无功功率为

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \quad (7)$$

忽略定子漏感消耗的无功功率, 在转子感应电

外部的负载转矩为 $2\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, 电机初始转速指令为 100 rad/s , 在 40 s 时, 阶跃增大转速指令到 140 rad/s 。电机的转速及电磁转矩的变化见图 3。

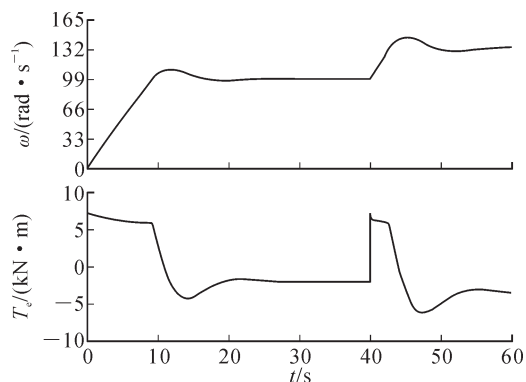


图 3 转速与电磁转矩仿真结果

Fig. 3 Simulation result of rotational speed and electromagnetic torque

图 3 中电机转速能够跟踪转速指令的变化, 电磁转矩在发电机加速阶段, 为正值, 说明控制为使电机尽快达到给定的转速, 在从电网吸取功率, 当电机转速稳定后, 电机重新进入发电状态。当然, 实际的风电系统应当对转速给定环节进行处理, 避免给定值的大幅阶跃, 避免系统输出功率及转矩出现大幅度波动。转子感应电动势的估算仿真结果见图 4, 从图 4 可以看出, 通过第 3 章中的方法, 可以得到转子感应电动势的大小, 并对其进行定向。仿真结果表明, 该控制方式可以很好地实现对双馈风力发电机的控制。

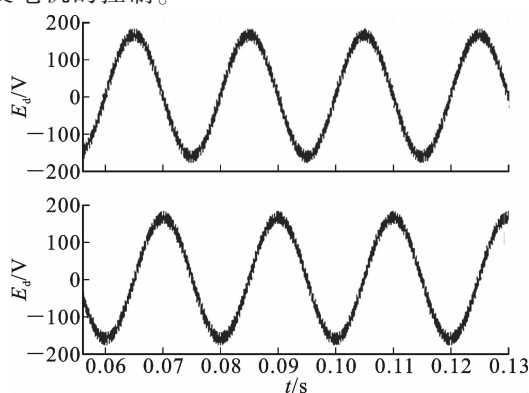


图 4 转子感应电动势的估算结果

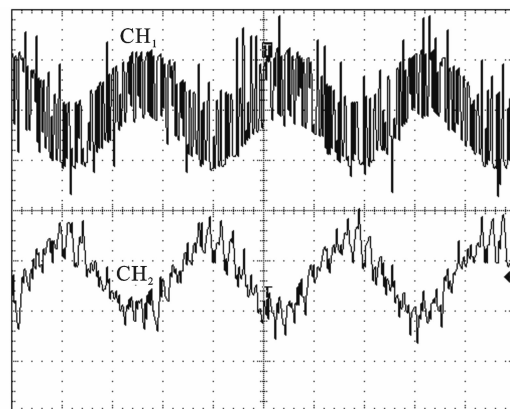
Fig. 4 Calculation result of rotor EMF

4 实验

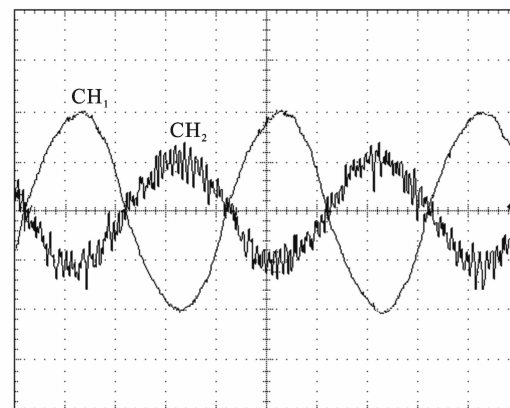
实验采用了 3 kW 的双馈电机, 进行了实验, 双馈发电机为 JR2 51-40 型绕线式异步电机, 电机转子接一台 10 kVA 逆变器, 使用上文中的控制策略, 转速调节器比例系数为 0.6 , 转速调节器积分系数为 15 。PWM 调制方式采用了电流跟踪控制方式^[20]。

图 5(a)给出了同步转速以下运行时, 双馈发电

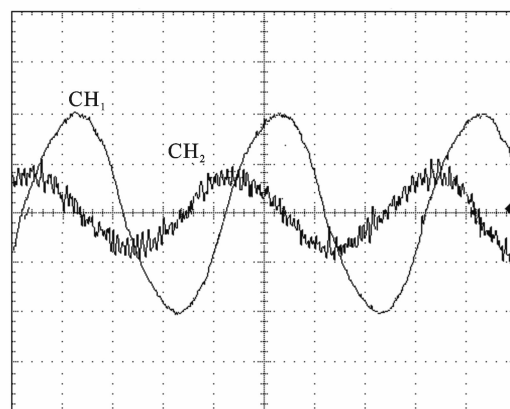
机转子侧变流器输出的端电压和电流波形图, 可以看出, 电机转子从电网吸收能量。图 5(b)显示了系统仅给定有功电流时, 发电机定子侧相电压和电流的波形, 可以看出, 定子侧在向电网输送能量, 且功率因数为 1 。图 5(c)显示了系统仅给定无功电流时, 发电机定子侧的相电压电流波形图, 可以看出, 控制转子侧的励磁电流可以调节发电机定子侧的无功功率, 使得发电机的无功功率呈现容性。图 6 是控制系统中估算出的转子感应电动



CH₁: 转子端电压 50 V/格 CH₂: 转子电流 2 A/格 时间: 10 ms/格
(a) 同步转速以下运行



CH₁: 定子端电压 50 V/格 CH₂: 定子电流 2 A/格 时间: 5 ms/格
(b) 给定有功电流时



CH₁: 定子端电压 50 V/格 CH₂: 定子电流 2 A/格 时间: 5 ms/格
(c) 给定无功电流时

图 5 实验结果

Fig. 5 Experiment result

势定向角度,可以看到,转子感应电动势以同步速度在进行旋转。

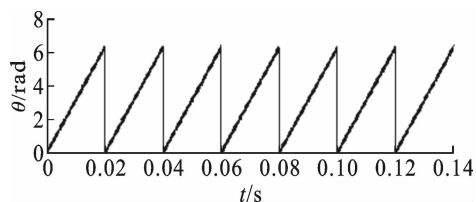


图6 估算到的转子感应电动势定向角

Fig. 6 Measured EMF of rotor

图7是双馈电机转速指令由0,阶跃变化至1200 r/min时,不同控制方式下的转速响应,可以看出,文中介绍的转子感应电动势定向的方法性能好于恒压频比控制,比传统矢量控制稍有不足,但实现方案比传统矢量控制大大简化。

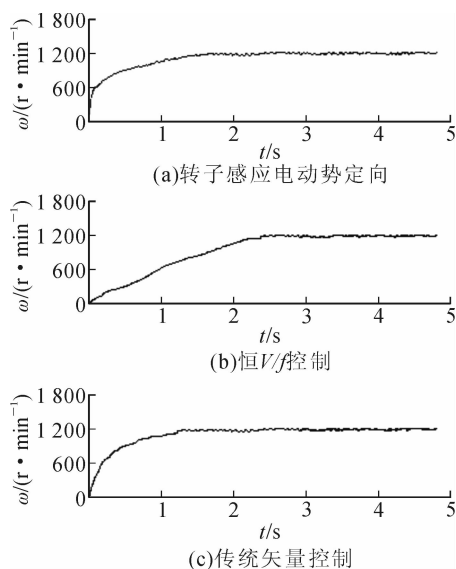


图7 电机转速响应实验

Fig. 7 Experiment of speed response

5 结语

文中分析了以转子感应电动势定向的旋转坐标系下,双馈发电机的动态模型,以及转矩和定子侧无功的表达式。通过转子感应电动势定向,双馈电机的转矩和无功可以实现解耦,并且能够实现无速度传感器控制。

通过推导转子感应电动势坐标系下的感应电动势与端电压的关系,得到了双馈电机的控制方程及控制框图。通过仿真与实验,验证了这种控制方法的有效性,该方法简便快捷,同时又具备较好的动态响应能力。

参考文献:

[1] 李永亮,赵飞,王殿俊. 双馈电机矢量控制系统及仿

真[J]. 机电元件,2011,31(3):47-50.

LI Yongliang,ZHAO Fei,WANG Dianjun. The simulation and vector control system of double-fed machine[J]. Electromechanical Components,2011,31(3):47-50.

[2] 张帆,李国庆,张宇阳,等. 双馈感应风电机组建模控制仿真[J]. 东北电力大学学报,2011,31(4):80-85.

ZHANG Fan,LI Guoqing,ZHANG Yuyang,et al. Modeling control and simulate of DFIG wind generator[J]. Journal of Northeast Dianli University,2011,31(4):80-85.

[3] 袁晓冬,邱志鹏,李群,等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):16-19.

YUAN Xiaodong,QIU Zhipeng,LI Qun,et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):16-19.

[4] 徐世周,刘毅. 基于定子磁链定向的变速恒频双馈风力发电系统仿真研究[J]. 变频器世界,2011(3):49-53.

XU Shizhou,LIU Yi. Research and simulation on VSCF doubly-fed wind power generation system based on stator flux orientation[J]. The World of Inverters,2011(3):49-53.

[5] PENA R,CLARE J C,ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications,1996,143(3):231-241.

[6] LI Shuhui,HASKEW T A. Analysis of decoupled $d-q$ vector control in DFIG Back-to-back PWM converter[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.],IEEE,2007:427-434.

[7] MULLER S,DEICKE M,De DONCKER R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Application,2002,8(3):26-33.

[8] 孙爱东,王娟平. 双馈型变速恒频风力发电机PI自适应控制的研究[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(35):102-104.

SUN Aidong,WANG Juanping. Research on PI adaptive control of VSCF(variable speed constant frequency)doubly-fed wind-driven generator[J]. Sci. Tech. Information Development & Economy,2009,19(35):102-104.

[9] PENA R,CARDENAS R,PROBOSTE J,et al. Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(1):330-339.

[10] CARDENAS R,PENA R,CLARE J,et al. MRAS observers for sensorless control of doubly-fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1075-1084.

[11] 杨淑英,张兴,张崇巍,等. 基于转子电流偏差角的双馈感应电机速度观测[J]. 电力系统自动化,2009,33(4):

- 92-95.
YANG Shuying,ZHANG Xing,ZHANG Chongwei,et al. Speed and position observer of DFIG based on rotor current vector angle deviation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(4):92-95.
- [12] 卫志农,俞小勇,吴佳佳. 基于自抗扰控制的双馈发电机无速度传感器控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):15-18.
WEI Zhinong,YU Xiaoyong,WU Jiajia.Speed sensorless control of DFIG based on ADRC[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):15-18.
- [13] 秦 涛,吕跃刚,肖运启,等. 基于模型参考自适应的无速度传感器双馈风力发电机组控制技术研究[J]. 现代电力,2008,25(4):64-70.
QIN Tao,LYU Yuegang,XIAO Yunqi,et al. Speed-senseless control strategy of induction motor for doubly-fed wind power generation system based on MRAS observer [J]. Modern Electric Power,2008,25(4):64-70.
- [14] 马成禄,胡继胜,阳同光. 无速度传感器感应电机控制速度辨识的研究现状与展望[J]. 防爆电机,2008(1):46-50.
MA Chenglu,HU Jisheng,YANG Tongguang. The development and prospect of speed identification of speed sensorless induction motor control[J]. Explosion-Proof Electric Machine,2008(1):46-50.
- [15] 路 强,沈传文,季晓隆,等. 一种用于感应电机控制的新型滑模速度观测器研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(18):164-168.
LU Qiang,SHEN Chuanwen,JI Xiaolong,et al. A novel sliding-mode observer for speed-sensorless induction motors[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(18):164-168.
- [16] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学报,2008,23(1):129-136.
LIU Qihui,HE Yikang,ZHAO Rende.Operation and control of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(1):129-136.
- [17] 张学广,徐殿国,李伟伟. 双馈风力发电机无速度传感器控制[J]. 太阳能学报,2009,30(10):1414-1419.
ZHANG Xueguang,XU Dianguo,LI Weiwei. Research on speed sensorless control of doubly fed wind power generator[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2009,30(10):1414-1419.
- [18] 赵荣祥,尹 强,朱振东,等. 自控式交流励磁变速电机的稳定性分析[J]. 电工技术学报,1998,13(4):6-10.
ZHAO Rongxiang,YIN Qiang,ZHU Zhendong,et al.Stability analysis of the self controlled AC excited synchronous machine at adjustable speeds[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1998,13(4):6-10.
- [19] 陈显彪,吕树清,李 瑾. 双馈电机在两相同步旋转坐标系上的仿真模型[J]. 大电机技术,2011(6):39-42.
CHEN Xianbiao,LYU Shuqing,LI Jin. Simulation model of doubly-fed machine in two-phase synchronous rotating reference frame[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2011(6):39-42.
- [20] 张 洋,别朝红. 一种无速度传感器的双馈风力发电机滞环矢量控制策略[J]. 西安交通大学学报,2010,44(6):109-113.
ZHANG Yang,BIE Chaohong.Sensor-less hysteretic vector control of donbly-fed machine for wind power generators[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2010,44(6):109-113.

陶 艳(1980—),女,副教授,主要研究方向为电气工程、自动控制。

(上接第 165 页)

杨秋玉(1986—),男,硕士,主要研究方向为电器智能化技术及应用、高压开关电器设计、断路器在线监测与故障诊断等。

彭彦卿(1966—),女,教授,博士,主要研究方向为智能控制、过程控制和复杂工业生产系统的建模、控制与优化等。

庄志坚(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为智能真空断路器在线监测与诊断、新一代同步选相开关。

熊 磊(1992—),男,硕士,主要研究方向为高电压绝缘技术、断路器在线监测与故障诊断。