

Study on Hardware-in-the-Loop Simulation of Doubly Salient Electro-Magnetic Generator for Wind Power Generation

Tang Guofen, Zhou Bo, Guo Honghao, Zuo Guangjie

Key Laboratory of Aeronautical Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, Jiangsu Province, China

tangguofen_nuaa@yahoo.cn

Abstract: In this paper, a novel Doubly Salient Electro-Magnetic Generator (DSEG) model in the form of current source is built for real-time simulation, which avoids algebraic loops in conventional simulation models of DSEG. Based on the proposed DSEG model and combining with the nonlinear wind turbine model and the power converter model, a wind power generation model is presented. The physical controller part using a TMS320F2812 digital signal processor is connected to the simulation loop with I/O cards, while the model is running on the RT-LAB real-time simulation platform. Thus, the hardware-in-the-loop simulation platform of DSEG for wind power generation is constructed.

Keywords: Current Source; Doubly Salient Electro-Magnetic Generator; Hardware-in-the-Loop Simulation; RT-LAB; Wind Power Generation

电励磁双凸极风力发电机半实物仿真研究

唐国芬, 周波, 郭鸿浩, 左广杰

南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室, 江苏省南京市, 中国, 210016

tangguofen_nuaa@yahoo.cn

【摘要】在解决了传统的电励磁双凸极电机仿真模型中存在代数环问题的基础上, 构建了适用于实时仿真的电流源形式的电励磁双凸极电机本体模型, 并与风轮机的非线性模型、功率变换器模型结合后构成整体风力发电机的系统仿真模型。仿真模型在 RT-LAB 环境下实时运行, 同时将基于 TMS320F2812 的实物控制器通过 I/O 板卡接入仿真回路, 建立了电励磁双凸极风力发电机的硬件在环仿真平台。

【关键词】电流源; 电励磁双凸极电机; 半实物仿真; RT-LAB; 风力发电

1 引言

电励磁双凸极电机 (Doubly Salient Electro-Magnetic Generator, DSEG) 是在永磁双凸极电机的基础上发展起来的, 具有结构简单、控制灵活、动态响应快和效率较高等优点。DSEG 在电机定子上安装一套励磁线圈取代永磁双凸极电机的永久磁体。发电工作时, 调节励磁电流即可调节输出电压, 无需位置

传感器和可控功率变换器, 外接不控整流电路即可构成无刷直流发电系统, 将其成功应用于风力发电系统将降低发电成本, 提高系统可靠性^[1-4]。

半实物仿真是一种针对实际过程的实时仿真技术, 基于 RT-LAB 的半实物仿真是目前置信度最高的一种仿真方法。在国外, RT-LAB 软件已被广泛应用于汽车、电力等领域。譬如, 文献[5]中采用 RT-LAB 建立了双馈感应发电机和背靠背直直变换器连接的并网风力发电系统模型^[5]; 文献[6]中借助 RT-LAB 构建了基于模型的原型控制器, 采用摩擦补偿对机器人动作进行控制, 取得了较好的效果^[6]; 文献[7]中建立了永磁同步电机及其功率变换器与整车系统的实时仿真

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB210302), National Innovation Experiment Program for University Students (091028714)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2007CB210302), 国家大学生创新性实验计划项目 (091028714)

模型, 但为满足实时性的要求, 采用了计算速度更快的 FPGA 板卡, 开发成本大^[7]。国内对基于 RT-LAB 实时仿真的应用多集中在电力^[8]、导弹^[9]、飞机^[10]等领域, 且多为全数字仿真或作为控制器来控制实物对象。风力发电系统的半实物仿真由实时运行的风电系统数学模型和实物控制器组成。数学模型实时运行时, 通过数字和模拟 I/O 功能, 将实物控制器与实时运行的模型连接, 利用实物控制器控制虚拟系统。半实物仿真可用来验证控制器性能, 灵活改变控制算法而不会损坏系统, 尤其适合大功率系统控制器的验证。

本文首次采用电流源形式建立了适用于实时仿真的 DSEG 本体模型, 与风轮机模型和功率变换器模型结合后构成整个风力发电系统仿真模型, 并将实时仿真模型与基于 TMS320F2812 的实物控制器连接, 在半实物仿真平台上实现了最大风能跟踪控制。

2 风力机和传动机构的数学模型

2.1 风力机基本原理

根据贝兹理论, 风力机单位时间内从风中捕获的风能为

$$P = 0.5\rho C_p(\lambda, \beta)R^2v^3 \quad (1)$$

其中: ρ 表示空气密度, R 表示风轮半径, v 表示风速, β 表示桨距角, λ 表示叶尖速比, C_p 表示风能利用系数。

桨距角固定时, 风能利用系数与叶尖速比之间的关系曲线如图 1(a)所示, λ_{opt} 为最佳叶尖速比, C_{pmax} 为最大风能利用系数。对于一台确定的风机, 在桨距角不变时, 总存在一个最佳的叶尖速比, 对应着一个最大的风能利用系数^[11]。图 1(b)是一组不同风速下的风力机输出功率特性曲线, P_{opt} 是最佳功率曲线。同一风速下, 不同转速使得风力机输出不同的功率, 风力机只有运行在特定的转速下, 才会获得最大的能量转换效率。

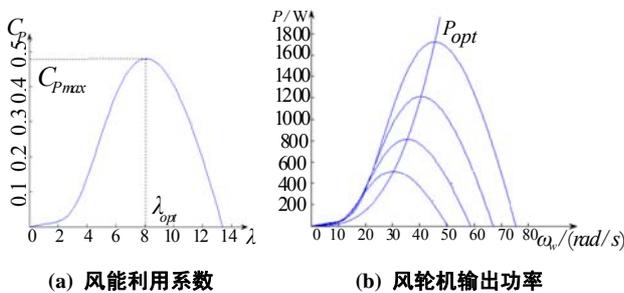


Figure1. Characteristic of Wind turbine

图 1. 风力机特性曲线

因此, 桨距角固定时, 在任何风速下, 只要调节风力机的转速, 使叶尖速比始终为最佳, 就可使风力机维持在最大风能利用系数下运行。

2.2 风力机传动机构数学模型

风力机传动机构模型为

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_g}{dt} + B\omega_g \quad (3)$$

其中: T_m 表示风力机气动转矩, T_e 表示发电机电磁转矩, J 表示机组转动惯量, B 表示转动粘滞系数, ω_g 表示发电机转速。在直驱式风电机组中, 不考虑传动轴的弹性形变时, $\omega_g = \omega_w$ 。

3 电励磁双凸极电机建模

DSEG 的磁链方程、转矩方程和电压方程。绕组磁链为

$$[\psi] = [L][I] \quad (4)$$

其中: $[\psi]$ 为包含三相绕组和励磁绕组匝链的磁链的列向量; $[L]$ 为相绕组自感、励磁绕组自感、相绕组与励磁绕组互感和相绕组与相绕组互感; $[I]$ 为包含三相电流和励磁电流的列向量。

相绕组端电压为

$$u_p = -i_p R_p - \frac{d(L_p i_p)}{dt} - \frac{d(L_{pf} i_f)}{dt} \quad (5)$$

其中: $p = a, b, c$, i_p 表示相电流, i_f 表示励磁电流, u_p 表示相绕组端电压, R_p 表示相绕组内阻, L_{pf} 表示相绕组与励磁绕组互感, L_p 表示相绕组自感。

励磁绕组端电压为

$$u_f = i_f R_f + \frac{d(L_f i_f)}{dt} + \frac{d(L_{af} i_a)}{dt} + \frac{d(L_{bf} i_b)}{dt} + \frac{d(L_{cf} i_c)}{dt} \quad (6)$$

其中: u_f 表示励磁绕组端电压, R_f 表示励磁绕组内阻, L_f 为励磁绕组自感。

现有的 DSEG 建模, 根据式(5)和式(6)建立电机本体模型。这种建模方式下, 绕组端电压直接取决于绕组电流, 而绕组电流又取决于绕组端电压, 由于数字计算的时序性, 出现了没有绕组端电压无法计算绕组电流, 没有绕组电流无法计算绕组端电压的死锁环, 即代数环^[12]。由于存在代数环, 这种方法搭建的模型无法进行半实物仿真。

为解决这个问题, 在励磁绕组励磁电流反馈通路中加入存储器模块, 切断了励磁绕组回路的代数环。然而在相绕组电流反馈通道中加入延时模块或存储器模块时, 虽然消除了相绕组回路的代数环, 但是仿真结果发散。

因此, 本文从系统原理出发, 重构系统模型, 运

用积分打断了代数环，由式(5)可推得，相绕组电流为

$$i_p = \frac{\int (-u_p - i_p R_p - \frac{d(L_{pf} i_f)}{dt}) dt}{L_p} \quad (7)$$

电流源形式的绕组模型可消除代数环，其结构图如图 2 所示。通过端电压检测获得三相绕组端电压信号，根据式(7)，计算出三相电流，运用电气转换模块转换成电气信号。

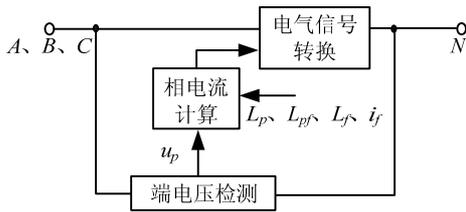


Figure 2. Winding structure of DSEG
图 2. DSEG 绕组结构

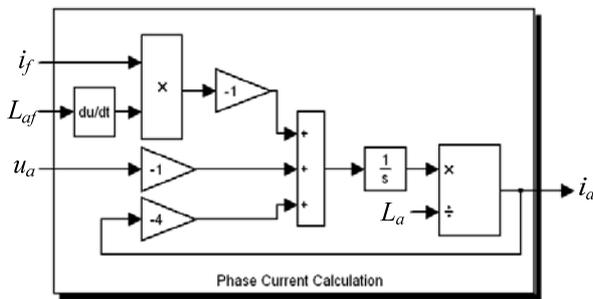


Figure 3. The simulation model of phase current calculation
图 3. 相电流计算仿真模型

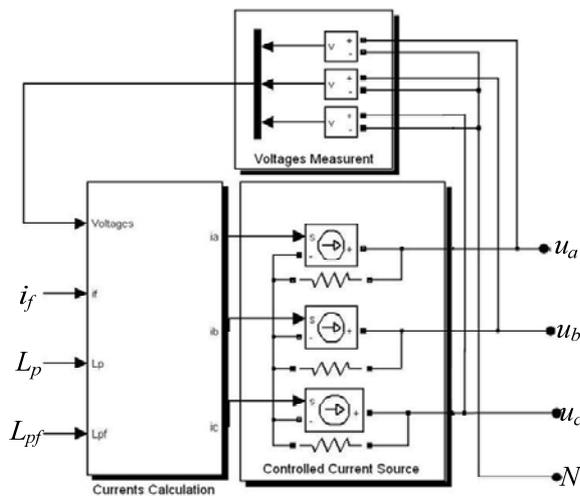


Figure 4. The simulation model of three-phase winding of DSEG
图 4. DSEG 三相绕组仿真模型

以 A 相绕组为例，相绕组电流计算仿真模型如图 3 所示。由于运用积分计算相绕组电流，相绕组电流只与上一步的绕组端电压和绕组电流有直接关系，消除了代数环。图 4 给出了电流源形式的 DSEG 三相绕组仿真模型。通过电压测量模块得到三相绕组端电压，与计算 A 相绕组电流一样，计算其他两相电流，通过可控电流源模块将三相绕组电流信号转换成电气信号。

4 电励磁双凸极风力发电最大风能跟踪控制半实物仿真

4.1 功率信号反馈算法

采用功率信号反馈(Power Signal Feedback Control, PSF)算法实现最大风能跟踪，该算法控制简单，能有效避免风力机输出功率的波动，其控制框图如图 5 所示。在不同风速下，根据风力机转速计算对应的风电系统最大输出功率，并将它作为风电系统输出功率的给定，通过控制功率和励磁电流，调节风力机转速，实现最大风能跟踪。

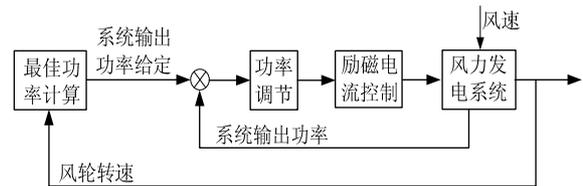


Figure 5. Control diagram of PSF
图 5. PSF 控制框图

4.2 最大风能跟踪控制的实现

半实物仿真系统如图 6 所示。风、风轮机、电励磁双凸极电机、整流桥等由 RT-LAB 实时仿真软件完成，最大风能跟踪控制算法由基于 TMS320F2812 的实物控制器实现。其中： i_f 为励磁电流， θ 为转子位置信号， P_o 为风电系统输出功率， P_o^* 为风电系统输出功率给定， i_f^* 为励磁电流给定，drive 为励磁电流控制信号。

实物控制器根据转子位置信号计算转速和风电系统输出功率的最大值，并将此功率作为输出功率的给定，对输出功率误差进行 PI 调节得到励磁电流给定值。采用单门限比较对励磁电流进行控制，以提高励磁电流环的响应速度。最后得到励磁电流控制信号，输出给实时仿真软件。实时仿真软件根据此控制信号调节励磁电流，完成系统其它部分计算。这样，通过

实物控制器控制实时仿真模型，使风电系统在最大功率点运行。

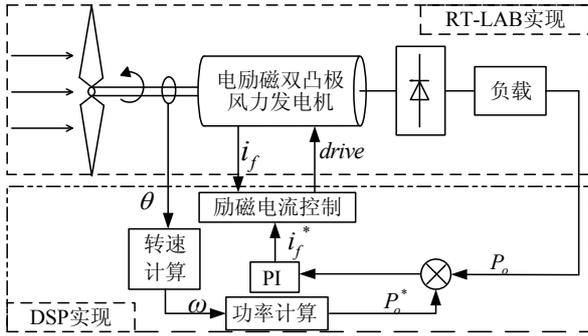


Figure 6. System diagram of hardware-in-the-loop simulation
图 6. 半实物仿真系统框图

控制部分充分利用 TMS320F2812 数字信号处理器强大的中断处理能力实现位置捕获、功率和电流采样及 PWM 波形产生等功能。控制程序算法流程图如图 7 所示。主程序主要负责系统初始化、等待中断，捕获中断负责检测转子位置、计算风力机实时机械角速度；ADC 中断负责采样、最大风能跟踪控制及 PWM 波形产生。ADC 中断对输出功率和励磁电流采样后，进行功率 PI 控制和励磁电流单门限比较控制，计算控制信号占空比。根据占空比和定时器周期寄存器值计算出比较寄存器值，运用事件管理器的比较单元产生 PWM 波形，即励磁电流控制信号。

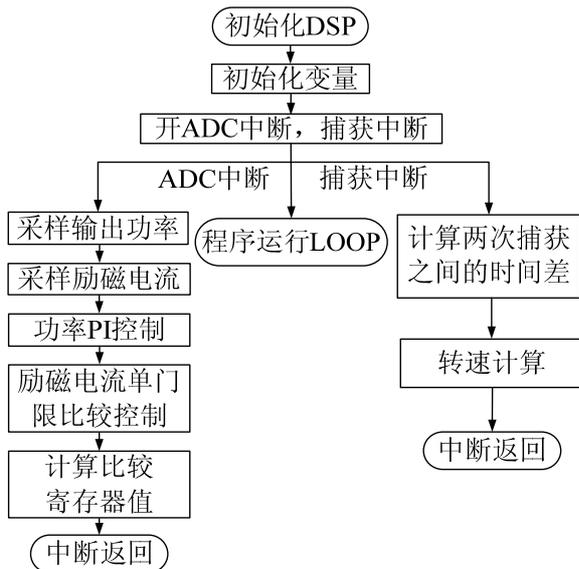


Figure 7. control flow diagram of main program
图 7. 主程序控制流程图

4.2 半实物仿真结果

利用 RT-LAB 仿真软件对系统进行建模，联入 DSP 实物进行硬件在回路仿真，实现最大风能跟踪。选取仿真参数如表 1 所示。

采用共阴极不控整流桥，风速从 6m/s 阶跃上升到 9m/s。图 8~9 给出了风轮机机械功率、励磁双凸极电机相电压和相电流的半实物仿真波形。

可见，风速增加后，实物控制器迅速进行功率调节和励磁电流调节，使风轮机输出机械功率增加，发电机输出功率增大，相电流和相电压经过短暂的动态过程后达到稳态。其动态过程小于 100ms，功率波动范围可限制在 50W 内，控制效果较好，且实时仿真部分的励磁双凸极电机的暂态过程与变化规律符合实际情况。

Table 1. Data of Simulink
表 1. 仿真参数表

额定功率	2kW
风轮机半径	1.6m
发电机定子极数	24/16
系统惯量	0.2kg·m ²
最佳叶尖速比	8.1
最大风能利用系数	0.48
负载电阻	100Ω

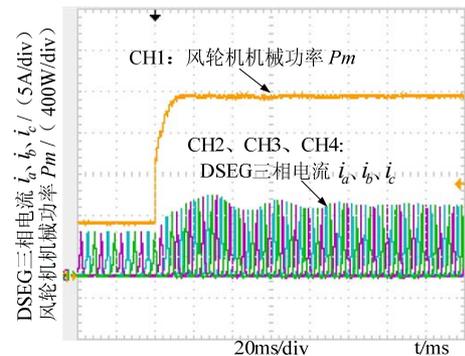


Figure 8. mechanical power of wind turbine and three-phase current of DSEG
图 8. 风轮机机械功率、DSEG 三相电流

图 10~12 给出了相同风速条件下的风能利用系数、励磁电流、风轮机机械功率、电机输出功率和电机转速的半实物仿真波形。风速增加时，由于系统惯性，风力机捕获的风能不能立即传输给发电机，所以风能利用系数突然减小至 0.39。控制系统调节励磁电流，使风力机转速和风电系统输出功率很快升高，风能利用系数迅速上升并稳定在最大值 C_{pmax} 。由于存在

电机内阻等因素，发电机输出功率略小于风轮机机械功率，稳态时发电机输出功率约为风轮机机械功率的93.75%。

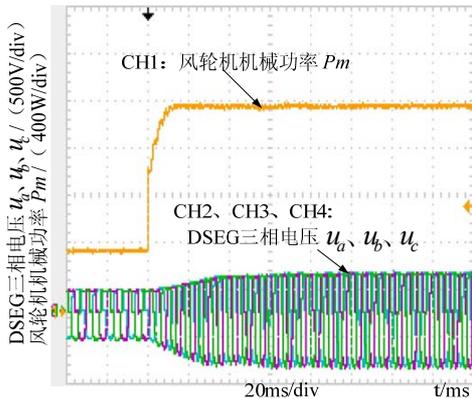


Figure 9. mechanical power of wind turbine and three-phase voltage of DSEG
图 9. 风轮机机械功率、DSEG 三相电压

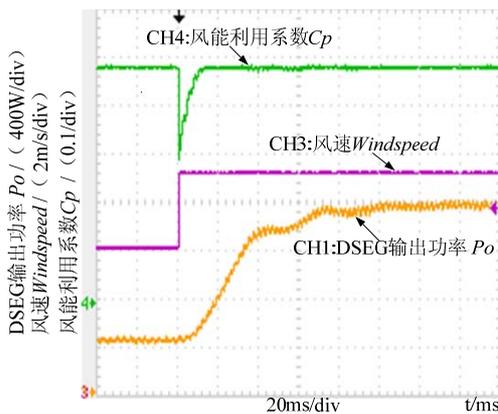


Figure 10. Power coefficient, wind speed and output power of DSEG
图 10. 风能利用系数、风速、DSEG 输出功率

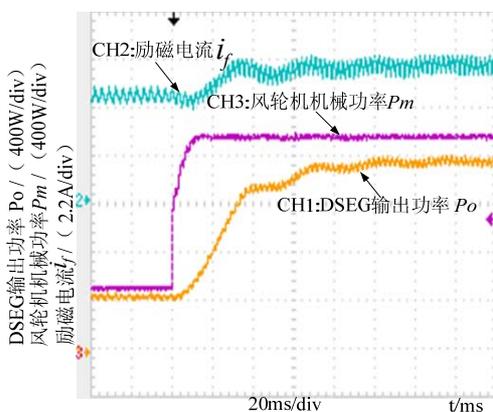


Figure 11. Excitation current, mechanical power of wind turbine and output power of DSEG

图 11. 励磁电流、风轮机机械功率、DSEG 输出功率

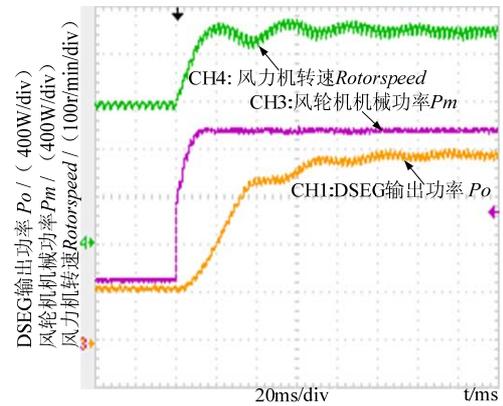


Figure 12. Rotor speed of wind generation, mechanical power of wind turbine and output power of DSEG
图 12. 风力机转速、风轮机机械功率、DSEG 输出功率

5 结论

传统电励磁双凸极电机模型存在代数环，不适用于实时仿真，而电流源形式的电励磁双凸极电机模型消除了代数环。在搭建的半实物仿真平台上，采用功率信号反馈控制算法，半实物仿真结果与理论相符，系统具有较快的响应速度，实现了最大风能跟踪。

References (参考文献)

- [1] Zhou Bo, Xiang Rong, Wang Chuanyun. Theoretical analysis on the electro-magnetic characteristics for doubly salient electro-magnetic machines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 355-359.
周波, 相蓉, 王川云. 电磁式双凸极电机电磁特性的理论分析[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 355-359.
- [2] Meng Xiaoli, Wang Li, Yan Yangguang. Novel field-winding doubly salient brushless DC generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 10-15.
孟小利, 王莉, 严仰光. 一种新型电励磁双凸极无刷直流发电机[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 10-15.
- [3] Jiadan Wei, Bo Zhou, Fangshun Cheng. A new three-phase Doubly Salient Electrical Magnet Generator for direct-driven wind power generation[C]. Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 4250-4252.
- [4] Fan Y, Chau K T, Cheng Ming. A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(1): 53-60.
- [5] C. Dufour, J. Belanger. A real-time simulator for doubly fed induction generator based wind turbine applications. Power Electronics Specialists Conference, 2004, 5(5):3579-3603.
- [6] C. Dufour, T. Ishikawa, S. Abouridal et al. Modern Hardware-In-the-Loop Simulation Technology for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles[C]. IEEE Conference of VPPC, 2007, pp.432-439.
- [7] B. Bona, M. Indri, N. Smaldone. Rapid Prototyping of a Model-Based Control With Friction Compensation for a Direct-Drive Robot[J]. IEEE transactions on Mechatronics. 2006, 11(5):576-584.
- [8] Honghao Guo, Bo Zhou, Jichen Li, Fangshun Cheng, Le Zhang. Real-Time Simulation of BLDC-based Wind Turbine Emulator Using RT-LAB. International Conference on Electrical Ma-

- chines and Systems, 2009.
- [9] Liu Xiaoming, Zhou Hao, Chen Wanchun et al. Simulink/RT-LAB based Hil missile guidance system simulation platform reearch. *Infrared and Lasser Engineering*. 2007, 36(36). 刘小明, 周浩, 陈万春, 等. 基于 SIMULINK/RT-LAB 的导弹制导系统 HIL 仿真平台设计[J]. *红外与激光工程*. 2007, 36(36).
- [10] Qi Jie, Xie Li-li, Wang jian. Hardware-in-the-loop Simulation of Aircraft Braking System Based on Concurrent Computer. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(13):3101-3104. 齐洁, 谢利理, 王健. 基于并行计算机的飞机刹车系统半实物仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(13): 3101-3104.
- [11] Xia An-jun, Shen Jin-fei. Research on Maxium Power Point Tracking Control System of Wind Turbine [D]. Jiangsu: Jiangnan University, 2008. 夏安俊, 沈锦飞. 风力发电机组最大功率点跟踪控制系统[D]. 江苏: 江南大学, 2008.
- [12] Geng Hua, Yang Geng. Algebraic loop problems in simulation of control systems and the methods to avoid it. *Electric Machines and Control*. 2006, 10(6): 632-635. 耿华, 杨耕. 控制系统仿真的代数环问题及其消除方法[J]. *电机与控制学报*, 2006, 10(6):632-635.