

· 电力电子技术 ·

五相双绕组感应发电机励磁控制系统硬件设计与实现

潘子昊, 王思齐, 蒋志鹏, 张喆轩, 卜飞飞

(南京航空航天大学, 江苏 南京 211106)

摘要: 本文研究了一种五相双绕组感应发电机励磁控制系统的硬件设计与实现方法。该发电机的转子为笼型, 其定子上有两套五相绕组: 一套是控制绕组, 接有励磁变换器; 另一套是功率绕组, 经整流输出直流电能。励磁变换器由以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块为基础的主电路、驱动电路、数学信号处理电路、采样调理电路、保护电路等部分组成。励磁控制器向发电机提供所需的可变励磁无功, 控制发电机励磁, 从而实现输出电压的控制。

关键词: 双绕组感应发电机; 五相; 励磁控制; 硬件设计

中图分类号: TM346.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)03-0017-05

0 引言

风能分布广泛, 是一种储量丰富、清洁的可再生能源, 开发风能对改善能源结构和保护生态环境具有十分重要的意义。为促进风力发电的发展, 世界各国政府都出台了相应的优惠政策^[1]。我国风能资源丰富, 大力发展风力发电是缓解我国电力资源紧张的有效途径之一^[2]。由于风所携带的能量与风速的三次方成正比, 风速的变化会引起风能的较大变化^[3,4], 故对风力发电系统的要求有: 转速变化范围大; 整流后输出直流电压; 无刷化, 带有开关功率元件的变换器的容量小, 以降低造价、减小体积及重量, 规避大功率变换器设计的难题^[5]。在现有的技术条件下, 双馈感应发电机^[6]和笼型感应电动机能适应这样的需求。

笼型感应电机因其简单坚固、可靠性高、制造技术成熟等优点, 在国民经济中占有重要的地位^[7]。在普通单绕组笼型感应发电机构成的直流发电系统中, 常采用笼型感应电机、电力电子变换器和负载三者并联的拓扑结构^[8]。在这样的拓扑结构中, 负载与电力电子变换器直接连接, 发电机输出的电能会受到电力电子变换器高频开关信号的影响导致供电品质下降, 从而限制了普通单绕组笼型感应电机在直流发电系统中的应用^[9]。

1998年美国田纳西理工大学的专家首次提出了双绕组感应发电机的结构, 该结构既继承普通单绕组笼型感应发电机的优点, 又克服了其不足, 引起广泛关注^[10,11]。2003年至2009年海军工程大学

的马伟明院士及其研究团队以舰船电源为应用背景对双绕组感应电机发电系统进行了卓有成效的研究^[12-14]。2004年以来南京航空航天大学的研究人员对采用双绕组感应电机的宽风速运行风力发电技术进行了一系列的研究^[15-18]。为进一步提高双绕组感应发电机系统的性能和功率密度, 南京航空航天大学的研究人员将双绕组感应发电机和多相感应电机相结合, 提出了一种双绕组五相感应电机发电系统, 并对其优化设计、高性能控制进行了初步的探索^[19]。众所周知, 多相电机具有高可靠性和高功率密度的优点, 尤其是与非正弦励磁技术相结合, 可以充分利用铁心。本文以风力发电为背景, 研究了一种五相双绕组感应电机励磁控制系统的硬件设计方法, 该发电机系统具有高动静态性能和良好的供电品质, 开发了一台5 kW实验样机, 并通过实验对该励磁控制系统的性能进行了检测。

1 五相双绕组感应发电机系统介绍

该感应发电机采用笼型转子, 定子上有两套五相绕组: 一套是五相整距集中控制绕组, 接有五相励磁变换器以调节励磁无功, 保证负载变化时输出电压稳定; 另一套为五相整距集中功率绕组, 接有五相不控整流桥, 输出直流电能。该发电系统的结构如图1所示。

双绕组感应发电机的优点在于控制绕组和功率绕组之间仅通过电机内的磁场耦合, 在电气上没有直接连接, 两套绕组将有功和无功分开, 工作相对独立, 克服了单绕组发电机输出电能受到开关信号影响而下降的缺点, 供电品质显著提高。另外, 感应发电机的相数由三相扩大到五相后, 可以通过非正弦励磁和容错控制进一步提高发电机的功率密度和可靠性。

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51507079); 中国博士后科学基金特别资助项目(2016T90454); 2016国家级大学生创新训练项目(2016CX00303)

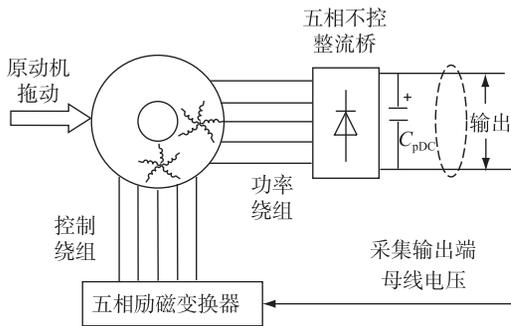


图1 五相双绕组感应电机结构

Fig.1 Schematic diagram of five phase double winding induction motor

2 励磁控制系统硬件设计

励磁控制器为发电机提供不同工作状态下所需的励磁无功。而要实现励磁控制,就需要知道发电系统中的状态信息,比如相电流、母线电压等。为此,设计一套完成励磁控制器软件和硬件,包括以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为基础的五相桥主电路、采样调理电路、驱动电路、故障保护电路、控制电路等部分。该励磁控制系统的结构如图2所示。

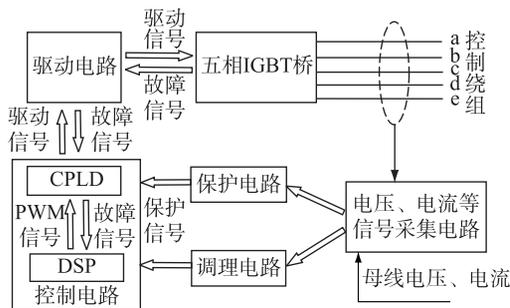


图2 励磁控制系统结构

Fig.2 Schematic diagram of excitation control system

2.1 五相 IGBT 桥

五相 IGBT 桥中的每个桥臂都可以工作在导通与截止状态。在合适的控制策略下,通过控制这两种工作状态的快速切换可以改变控制绕组中的励磁电流实现发电机的励磁控制。该系统包含 2 个型号为 PM100PLA060 的三相 IGBT 智能功率模块(IPM),另有辅助励磁电容,辅助电源等。该部分结构如图3所示。

由于电机采用五相绕组,故在硬件设计中采用了 2 个三相模块相结合的方式,利用其中的五相连接控制侧绕组,剩余一相作为备用,一方面是为了故障运行做准备,提高系统容错能力,另一方面也是因为三相 IGBT 模块应用较为广泛,技术也比较成熟。

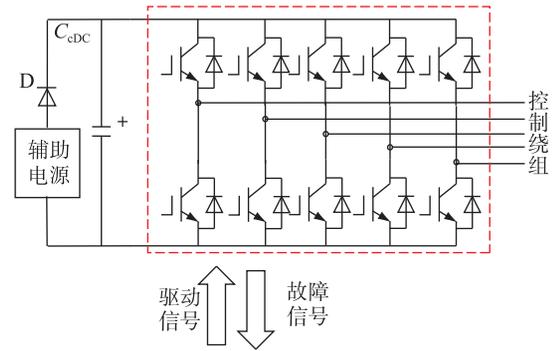


图3 IGBT 模块结构

Fig.3 Schematic diagram of IGBT modular structure

2.2 采样调理电路

该控制系统采用反馈控制的方式,故需要检测母线电压、母线电流、四相电流(五相电流对称,检测四相即可),通过这些物理量的变化来实现反馈控制。其中采样调理电路如图4所示。

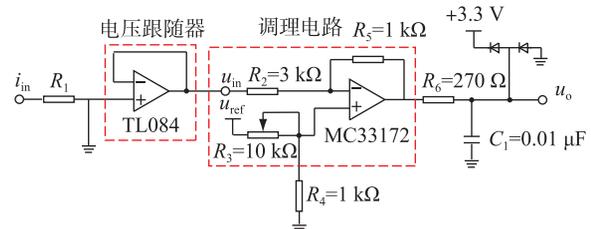


图4 采样调理电路

Fig.4 Sampling conditioning circuit

为了提高采样的精确度,该系统采用霍尔元件进行采样。调理电路将霍尔元件的副边电压转化到数字信号处理器所能处理的电压信号。

母线电压采样使用 VSM025A 的电压霍尔,该型号原边输入电流约 10 mA,母线电压为 270 V,故采用 30 kΩ 标称电阻。相电流采用 CSM100LT 电流霍尔采样,其最大副边电流为 50 mA,相电流采样电路中 R_1 取标称值 82 Ω,通过 R_1 将副边电流信号变成 5 V 以下的电压信号。VSM025A 的最大副边电流为 25 mA,则母线电压采样电路中 R_1 取 200 Ω。

霍尔传感器的副边电流信号 i_{in} 通过采样电阻 R_1 转换成电压信号 u_{in} ,通过由 TL084 构成的电压跟随器输送至 A/D 调理电路。由于数字信号处理器(DSP)的 A/D 输入端只能接受 0 到 3 V 的电压信号,因此传感器输出的交流信号需经过电平抬升。通过 MC33172 构成的运放电路,取参考电压 $u_{ref} = 5$ V,则送入 DSP 的 A/D 输入端的电压信号 u_o 为:

$$u_o = \frac{R_2 + R_5}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times u_{ref} - \frac{R_4}{R_5} \times u_{in} \quad (1)$$

R_6 与 C_1 组成低通滤波电路用于消除高于采样频率的高频噪声,提高采样系统的稳定性和精确

度。其他电阻的阻值根据式(1)计算得到。

2.3 驱动电路

控制信号经过驱动电路的放大才能实现控制 IGBT 模块工作状态的功能。该电路由 HCPL4504 光电耦合器、2N3904 三极管和相关电阻电容等组成,实现了脉宽调制技术(PWM)弱信号与 IGBT 功率电路的电气隔离,以保证 DSP 控制系统的安全性。该驱动电路如图 5 所示。

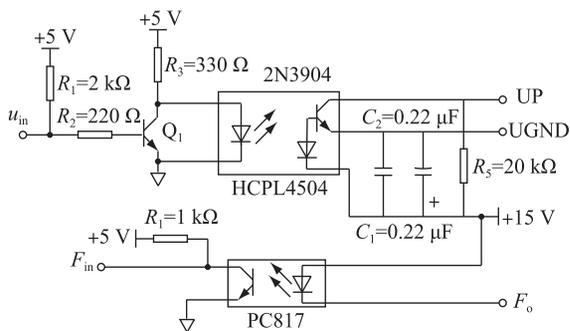


图 5 IPM 驱动电路
Fig.5 IPM drive circuit

当输入 PWM 端为高电平时,三极管 Q1 导通,光电耦合器初级截止,次级输出 15 V 加到 IGBT 门极,IGBT 导通;当 PWM 端为低电平时,三极管 Q1 关断,光电耦合器初级导通,次级输出 0 V,IGBT 截止。其中 F_{in} 是 IPM 故障保护信号。

2.4 故障保护电路

为保证励磁变换器及整个发电系统可靠工作,励磁控制系统中需要设计故障保护电路,以免过大的电流或电压损坏试验平台。该系统的故障保护电路如图 6 所示。

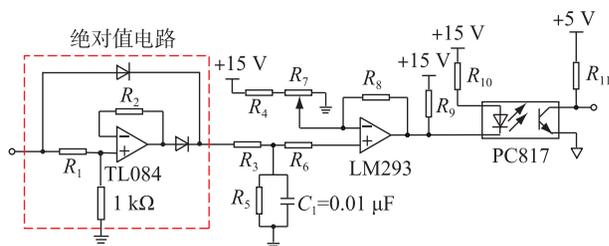


图 6 故障保护电路
Fig.6 Protection circuit

保护电路由绝对值电路和比较电路构成,电压跟随器输出的电压信号经过由 TL084 运算放大器和 2 个 1N4148 二极管构成的绝对值电路进行整流,整流后的电压信号送入 LM293 构成的比较器,通过比较采样电压或者电流转化得到的信号电平与阈值电压比较来实现过压和过流信号检测。检测后得到的故障保护信号经过光电耦合器 PC817 产生作用。光电耦合器使得信号电流和功率电

流之间没有直接的电气连接,提高了系统的稳定性。 R_5 与 C_1 构成低通滤波器,用于消除高频信号干扰。

2.5 突加/突卸负载控制电路

为探究该励磁控制系统的动态特性,实验中有突加/突卸负载的动态特性测试。由于实验所用发电系统输出电压较高(270 V),若采用机械开关进行负载的硬切换,在开关闭合或导通瞬间可能产生较大电流甚至电火花,存在安全隐患,故设计了突加/突卸负载的软开关,结构如图 7 所示。该部分电路也用到了 IGBT 模块,工作方式与五相 IGBT 桥类似。

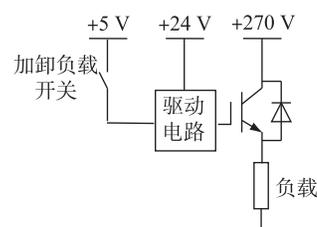


图 7 加卸负载控制电路
Fig.7 Load/offload control circuit

3 实验

为验证该励磁控制器硬件系统的可行性与可靠性,在搭建的实验平台上进行了验证。实际电路如图 8 所示。

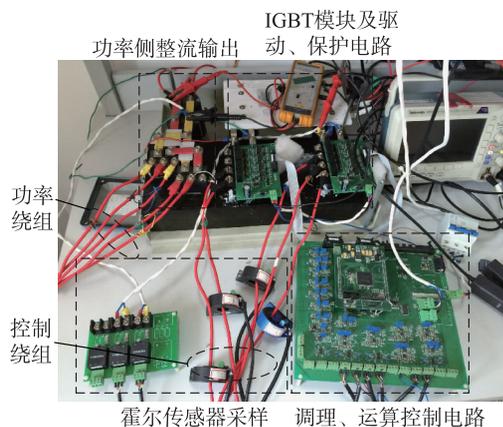


图 8 励磁变换器实物

Fig.8 Physical map of excitation converter

双五相绕组感应发电机的参数如下:额定转速 1500 r/min,额定功率为 5 kW,极对数为 2,功率绕组与控制绕组的匝数比为 2:1,控制绕组电阻为 0.19 Ω,功率绕组电阻为 0.45 Ω,激磁电感为 10.05 mH,直流母线电压为 270 V。该发电系统采用控制绕组磁链定向的控制策略:功率侧整流输出电压和控制侧直流母线电压分别与各自参考电压进行比较,其误差信号经调节后得到控制绕组的等效 d 轴

与 q 轴给定电流,再经坐标变换后得到控制绕组的各相给定电流。通过给定电流与实际电流的比较得到开关控制信号来改变控制绕组的励磁无功。

实验过程中先打开原动机拖动发电机,转速稳定后触发 DSP,使系统进入闭环控制的工作状态完成建压过程。建压过程中的系统各参数波形如图 9 所示。

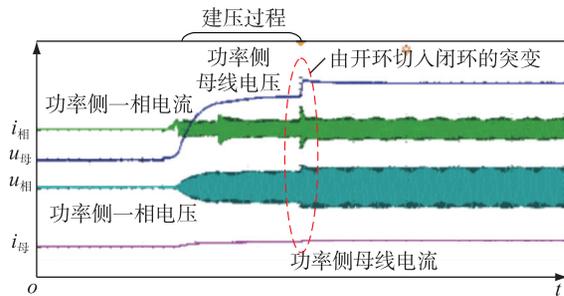


图 9 建压过程

Fig.9 Establishing voltage process

实验数据表明在该励磁系统的控制下,发电机建压平稳迅速,超调量小。稳态实验结果如图 10 所示。

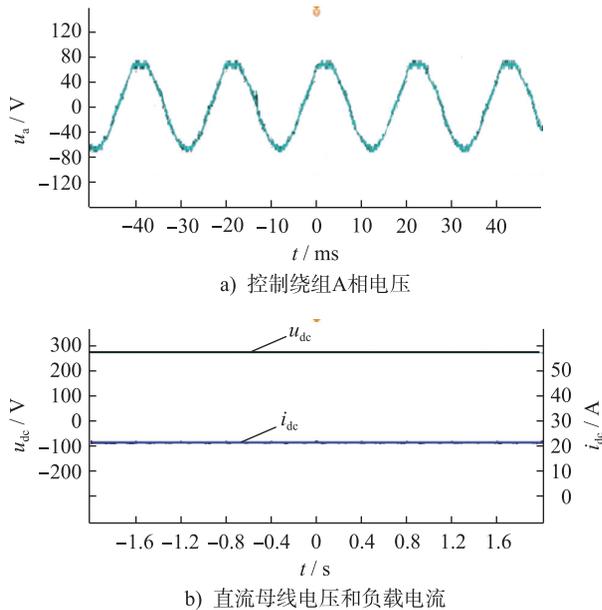


图 10 稳态运行

Fig.10 Stable condition

当电机带额定 5 kW 负载时,电机控制绕组相电压波形为正弦波,输出电流约为 21 A,直流母线电压稳定在 270 V 左右。实验结果表明该系统稳定性好。

4 结语

本文对应用于五相双绕组感应发电机的励磁控制系统的硬件设计与实现进行了研究,包括主电

路、驱动电路、数学信号处理电路、采样调理电路、保护电路等。该励磁控制系统基于母线电压、相电流等状态参数,按照控制绕组磁链定向的控制策略来调节控制绕组中的励磁电流,实现发电机的励磁调节。通过样机实验结果证明了该励磁控制系统能够使感应发电机平稳起动,并具有良好的稳态运行特性,能够满足五相双绕组感应发电机励磁控制的需要。

参考文献:

- [1] 孙浩然. 风力发电技术综述[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(4): 80-84.
SUN Haoran. A review of wind power generation technology[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(4): 80-84.
- [2] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
WANG Chengxu, ZHANG Yuan. Wind power generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
YE Hangzhi. Control technology of wind turbine[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
SU Shaoyu. Design, operation and maintenance of wind turbine[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [5] 刘陵顺. 定子双绕组感应发电机的设计及控制系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
LIU Lingshun. Research on design of dual stator-winding induction generator and control of system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [6] 范立新, 向张飏. 双馈变速恒频风力发电机并网控制仿真研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 39-42.
FAN Lixin, XIANG Zhangyang. Simulation research on doubly-fed variable speed constant frequency wind generator paralleling in the grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(6): 39-42.
- [7] 李发海, 王岩. 电机与拖动基础[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
LI Fahai, WANG Yan. Motor and drag foundation[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [8] 陈伯时, 阮毅. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
CHEN Boshi, RUAN Yi. Automatic control system of electric drive—motion control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [9] 刘陵顺, 胡育文, 黄文新. 电力电子变换器控制的异步电机发电技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 1-7.
LIU Lingshun, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Summary of technology of induction generators with power electronic converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 1-7.

- [10] OJO O, DAVIDSON I E. A dual stator winding induction generator with a four switch inverter-battery scheme for control [C]//Thirty-first IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC), 2000:230-234.
- [11] OJO O, DAVIDSON I E. PWM-VSI inverter-assisted stand-alone dual stator winding induction generator [J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2000, 36 (6): 1604-1611.
- [12] 傅玉,马伟明,王东,等. 新型定子双绕组自激异步发电机的电压调节[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 121-125.
FU Yu, MA Weiming, WANG Dong, et al. Voltage regulation of a novel stand-alone dual stator winding induction generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 121-125.
- [13] 傅玉,马伟明,李玉梅,等. 带有电流控制电压型逆变器的新型双绕组异步发电机的电压控制[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 55-58.
FU Yu, MA Weiming, LI Yumei, et al. Analysis of voltage control for a dual stator winding induction generator with CC-VSI[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 55-58.
- [14] 王东,马伟明,李玉梅,等. 带有静止励磁调节器的双绕组感应发电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 145-150.
WANG Dong, MA Weiming, LI Yumei, et al. Research on dual stator-winding induction generator with static excitation regulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 145-150.
- [15] 卜飞飞,黄文新,胡育文,等. 定子双绕组异步电机风力发电系统励磁电容的优化选取[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 152-160.
BU Feifei, HUANG Wenxin, HU Yuwen, et al. Optimal selection of excitation capacitor for dual stator-winding induction generator wind power system[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 152-160.
- [16] 卜飞飞. 变速运行的定子双绕组异步发电机系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
BU Feifei. Research on the variable-speed-operation dual stator-winding induction generator system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [17] 施凯. 定子双绕组感应风力发电系统的关键技术研究, [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
SHI Kai. Research on key technologies for the dual stator-winding induction generator wind power system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [18] BU F, HU Y, HUANG W, et al. Wide-speed-range-operation dual stator-winding induction generator DC generating system for wind power applications [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2015, 30(2): 561-573.
- [19] LIU Haozhe, BU Feifei, HUNAG Wenxi, et al. Modeling of five-phase dual stator-winding induction generator with third harmonic injection [C]//Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on, Sydney, 2015: 231-234.

作者简介:



潘子昊

潘子昊(1996—),男,江苏苏州人,本科,电气工程及其自动化专业;

王思齐(1996—),男,山东青岛人,本科,电气工程及其自动化专业;

蒋志鹏(1996—),男,江苏苏州人,本科,电气工程及其自动化专业;

张喆轩(1997—),男,江苏苏州人,本科,电气工程及其自动化专业;

卜飞飞(1984—),男,博士,副教授,研究方向为航空电源、风力发电、电力电子与电力传动。

Hardware Design and Realization of Excitation Control System for Five-phase Dual Stator Winding Induction Generator

PAN Zihao, WANG Siqi, JIANG Zhipeng, ZHANG Zhexuan, BU Feifei
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper mainly studies the hardware design and realization of excitation control system on the five-phase dual stator winding induction generator. This generator has basket winding and there are two types of five-phase winding on its stator: one type is control winding that is connected with excitation converter; the other is power winding which can provide direct electrical power after rectification. Excitation converter consists main circuit based on IGBT modular, drive circuit, digital signal calculation circuit, sampling conditioning circuit, protection circuit and so on. Excitation controller provides generator with changeable excitation reactive power to control the excitation of generator, realizing the control of output voltage.

Key words: dual winding induction generator; five-phase; excitation control; hardware design

(编辑 刘晓燕)