

交交变频器-同步电动机系统 等效电路模型及电流调节器设计

林 桦, 邹云屏, 王兴伟

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

EQUIVALENT CIRCUIT MODEL OF CYCLOCONVERTER-FED SYNCHRONOUS MOTOR SYSTEM AND DESIGN OF CURRENT CONTROLLER

LIN Hua, ZOU Yun-ping, WANG Xing-wei

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: A new analysis approach for analytic study of the cycloconverter-fed synchronous motor is proposed, based on the analysis of its operation characteristics. That is, the d - and q -axis variables of a synchronous motor are decomposed to low-frequency components (including aperiodic components) and high-frequency components, which can be treated separately. In this case, the resistances of rotor circuits to high-frequency components and the effect of damper winding on low-frequency components are negligible. Therefore, by using this analysis approach, the equivalent circuit model of a synchronous motor is obtained for steady-state and quasi-steady-state analysis. Furthermore, a new approach for designing current controller of the drive system is proposed, by using this equivalent circuit model. The experiment and simulation results show the equivalent circuit model established is correct, and the approach for designing current controller is reasonable.

KEY WORDS: Synchronous motor; Cycloconverter; Equivalent Circuit model; Current controller

摘要: 在分析同步电动机交交变频调速系统运行的基础上, 提出了把同步电动机的 d 、 q 轴各变量分解为低频分量 (含非周期分量) 和 高频分量分别加以处理, 忽略转子回路对高频分量的电阻以及阻尼绕组对低频分量作用的分析方法。进而建立了适合于稳态和似稳态分析的同步电动机等效电路模型; 应用该模型, 文中提出了设计调速系统电流控制器的新方法。运行试验及仿真结果表明所建立的等效电路模型是正确的, 所提出的调节器设计方法是有效的。

关键词: 同步电动机; 交交变频器; 等效电路模型; 电流调节器

1 引言

建立交交变频同步电动机调速系统的数学模型, 是分析该类系统动态、稳态运行性能的理论基础。由于对此类强非线性系统的解析分析非常困难, 通常采用数字仿真手段^[1-3], 但数字仿真方法难以获得规律性的认识, 特别是无法针对系统设计相应的控制规律; 文献[4, 5]在设计系统定子电流调节器时, 忽略同步电动机阻尼绕组电阻, 采取一些简化手段, 得到了同步电动机定子绕组的简化模型, 但此方法引起误差较大^[4]。

本文在分析该类系统运行特性的基础上, 将联接交交变频器的同步电动机 d 、 q 轴变量分解为低频分量和 高频分量分别加以处理, 建立了适用于交交变频器供电的同步电动机稳态和似稳态过程分析的等效电路模型和小扰动解析模型; 应用该模型, 本文提出了定子电流调节器设计的新方法。

2 系统的分析及基本假设

交交变频器供电的同步电动机在稳态和似稳态运行情况下, 其定子电压、定子电流为非正弦波, 即含有基波和丰富的谐波。图 1 为某 4000kW 同步电动机在 6 脉波交交变频器供电下的定子电压计算频谱^[6], f_0 为基波频率 (4.167Hz), u_0 为定子基波电压 (1348.144V)。

从频谱图可知, 定子电压频谱分布中以 65、67、77、79 次谐波分量幅值最大, 由它们产生的同次谐波电流幅值也最大, 其他次谐波分量的幅值较小^[6]。如果忽略较小的谐波分量, 可以认为定子电压、电

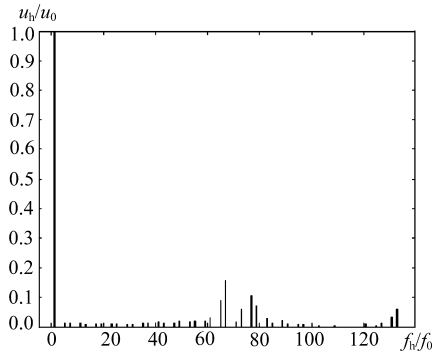


图 1 定子电压频谱
Fig.1 The spectrum of the stator voltage

流由基波和高于基波几十倍的高次谐波组成。对应联接交变频器的同步电动机在正常运行状态下，其基波电压、电流的 d 、 q 分量是恒值或缓慢（低频）变化的，而定子高次谐波电压、电流的 d 、 q 分量是高频脉振的。转子励磁电流同样有两种分量，一种是恒定的或缓慢（低频）变化的分量，其幅值较大，另一种是高频脉振分量，其幅值很小。由于两种分量的变化频率相差很远，因此在对交变频同步电动机进行理论分析时，可将同步电动机中各变量的 d 、 q 轴的低频分量和高频分量分别加以处理。由于转子回路对高次谐波电流的感抗比电阻大得多，因此可忽略转子回路对高次谐波的电阻，即认为转子回路的磁链中不存在高频分量；由于阻尼绕组的时间常数很小，因此可不考虑阻尼绕组对低频分量的作用，即不考虑阻尼绕组电流中的低频分量^[7-12]。

设 $i_{dl}, i_{ql}, \psi_{dl}, \psi_{ql}, u_{dl}, u_{ql}$ 分别表示 $i_d, i_q, \psi_d, \psi_q, u_d, u_q$ 中的低频分量。

将同步电动机定子绕组的磁链 ψ_d, ψ_q 分解成低频分量 ψ_{dl}, ψ_{ql} 和高频分量 $(\psi_d - \psi_{dl}), (\psi_q - \psi_{ql})$ 两部分。对电流的高频分量，电动机表现的电抗为 x_d'' 和 x_q'' ，则由 Park 方程，有

$$\psi_d = \psi_{dl} + (\psi_d - \psi_{dl}) = x_d(p)i_{dl} + G(p)u_{fd} + x_d''(i_d - i_{dl}) \quad (1)$$

$$\psi_q = \psi_{ql} + (\psi_q - \psi_{ql}) = x_q i_{ql} + x_q''(i_q - i_{ql}) \quad (2)$$

其中 $x_d(p) = \frac{x_d + x_d' T_{d0}' p}{1 + T_{d0}' p}$ 为不考虑阻尼绕组作用

时的 d 轴运算电抗； $G(p) = \frac{1}{1 + T_{d0}' p} \frac{x_{ad}}{r_{fd}}$ 为运算电导；

忽略低频分量 $\psi_{dl}, \psi_{ql}, i_{dl}, i_{ql}$ 对时间的导数，得定子绕组的电压方程

$$u_d = p\psi_d - \omega\psi_q + ri_d = x_d'' pi_d - \omega x_q'' i_{ql} - \omega x_q'' (i_q - i_{ql}) + ri_d \quad (3)$$

$$u_q = p\psi_q + \omega\psi_d + ri_q = x_q'' pi_q + \omega x_d(p)i_{dl} + \omega G(p)u_{fd} + \omega x_d''(i_d - i_{dl}) + ri_q \quad (4)$$

若假定，同步电动机 d 轴和 q 轴的超瞬变电抗值相差不大，即 $x_d'' \approx x_q''$ ，实际上，此条件在许多情况下是满足的，则上面各式可以简化，令

$$x_t = \frac{x_d'' + x_q''}{2}$$

$$x_{d1}(p) = x_d(p) - x_t \quad x_{q1}(p) = x_q(p) - x_t$$

则由式(3)、(4)可得

$$u_a = u_d \cos\theta - u_q \sin\theta = \{\cos\theta(-x_{q1}\omega i_{ql}) - \sin\theta[\omega G(p)u_{fd} + x_{d1}(p)\omega i_{dl}]\} + ri_a + x_t pi_a \quad (5)$$

$$u_b = u_d \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) - u_q \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) = \{\cos(\theta - \frac{2}{3}\pi)(-x_{q1}\omega i_{ql}) - \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi)[\omega G(p)u_{fd} + x_{d1}(p)\omega i_{dl}]\} + ri_b + x_t pi_b \quad (6)$$

$$u_c = u_d \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) - u_q \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) = \{\cos(\theta + \frac{2}{3}\pi)(-x_{q1}\omega i_{ql}) - \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi)[\omega G(p)u_{fd} + x_{d1}(p)\omega i_{dl}]\} + ri_c + x_t pi_c \quad (7)$$

3 同步电动机等效电路及解析模型

从式(5)、(6)、(7)可以看出， u_a, u_b, u_c 由两部分组成。

若定义：

$$E_1 \sin(\theta - \delta) \equiv \sin\theta[\omega G(p)u_{fd} + x_{d1}(p)\omega i_{dl}] - \cos\theta[-x_{q1}\omega i_{ql}] \quad (8)$$

则式(5)、(6)、(7)可写成

$$u_a = -E_1 \sin(\theta - \delta) + ri_a + x_t pi_a \quad (9)$$

$$u_b = -E_1 \sin(\theta - \delta - \frac{2}{3}\pi) + ri_b + x_t pi_b \quad (10)$$

$$u_c = -E_1 \sin(\theta - \delta + \frac{2}{3}\pi) + ri_c + x_t pi_c \quad (11)$$

显然，由式(9)、(10)、(11)可以看出，若将电抗 x_t 和电阻 r 移至交变频器后，当作变频器的滤波器，则由交变频器供电的同步电动机可看成由两部分组成：一是由 x_t 和 r 组成的外阻抗；二是产生基波反电势 E_1 的等效同步电动机，该等效电动机有如下特点：①无阻尼绕组，无绕组电阻；②端电压的有效值为 E_1 ；③运算电抗为

$x_{d1}(p) = x_d(p) - x_l$, $x_{q1} = x_q - x_l$, 相应的同步电抗和瞬变电抗值分别为: $x_{d1} = x_d - x_l$, $x_{q1} = x_q - x_l$, $x'_{d1} = x'_d - x_l$, $x'_{q1} = x'_q - x_l$; ④等效电动机定子中的各量都是基波正弦量, 它们的 d 、 q 轴分量以及励磁绕组的各量都是低频变化量 (含恒值量和非周期变化量), 用下标 “1” 表示。

图2给出了由交交变频器供电的同步电动机 a 相的等效电路。

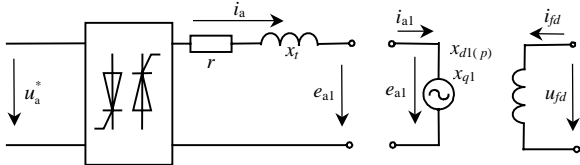


图2 交交变频器供电的同步电动机的等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of cycloconverter-fed synchronous motor

设系统在初始平衡状态所受的是小扰动, 因而在初始状态点建立解析模型。

小扰动时, 各 d 、 q 分量可表示为恒值 (稳态) 与低频变量之和, 对于低频的微小变化的 d 、 q 分量, 可忽略 $p\Delta\psi_{1d}$ 、 $p\Delta\psi_{1q}$, 则由上述等效电路模型和 Park 方程, 可写出低频的小扰动方程

$$\begin{cases} \Delta\psi_{1d} = G(p)\Delta u_{fd} + x_{d1}(p)\Delta i_{1d} \\ \Delta\psi_{1q} = x_{q1}\Delta i_{1q} \\ \Delta e_{1d} = -\Delta\psi_{1q} - \Delta\omega\Psi_{1q} = -x_{q1}\Delta i_{1q} + E_{1d}\Delta\omega \\ \Delta e_{1q} = \Delta\psi_{1d} + \Delta\omega\Psi_{1d} = G(p)\Delta u_{fd} + x_{d1}(p)\Delta i_{1d} + E_{1q}\Delta\omega \end{cases} \quad (12)$$

4 定子电流调节器设计

交交变频同步电动机调速系统在 d, q 坐标系的定子电流调节系统如图3所示。

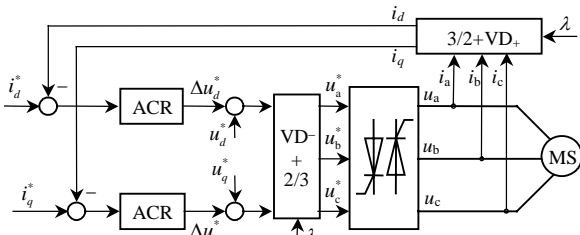


图3 d, q 坐标系的定子电流调节系统原理图
Fig.3 The diagram of the stator current closed-loop control system

图中 u_d^*, u_q^* 是电压前馈补偿信号, 由式(13)计算

$$\begin{cases} u_d^* = r i_d^* - \omega \psi_q^* \\ u_q^* = r i_q^* + \omega \psi_d^* \end{cases} \quad (13)$$

ACR 是定子电流调节器, 采用本文提出的小扰动模型, 可设计该电流调节器。

由于交交变频器在低频输出的条件下谐波电

流相对于基波电流比较小, 而 r, x_l 又相当于一个小时间常数的滤波器, 故可以忽略谐波的影响, 输出电流只考虑基波分量。

交交变频器通常被看作一个小惯性环节, 其小扰动数学模型如下^[4]

$$\begin{cases} \Delta e_{1d} = \frac{1}{1+T_m p} \Delta u_d^* \\ \Delta e_{1q} = \frac{1}{1+T_m p} \Delta u_q^* \end{cases} \quad (14)$$

式中 $T_m = 2\pi f T_j$, $T_j = 3ms$

通常在设计电流调节器时, 假设同步电动机的励磁电压恒定, 转速维持不变, 即 $\Delta u_{fd} = 0, \Delta\omega = 0$ 。

由式(12)可得用于电流调节器设计的等效同步电动机的小扰动模型。

$$\begin{cases} \Delta e_{1d} = -x_{q1}\Delta i_{1q} \\ \Delta e_{1q} = x_{d1}(p)\Delta i_{1d} = \frac{x_{d1} + x'_{d1}T'_{d0}p}{1+T'_{d0}p} \Delta i_{1d} \end{cases} \quad (15)$$

图4为定子电流调节系统的小扰动模型。

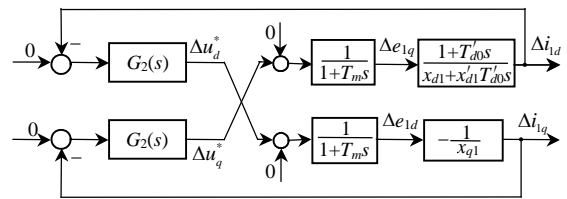


图4 定子电流调节系统小扰动模型

Fig.4 The diagram of the stator current closed-loop control system under small disturbances

当采用常规的PI控制规律时, d 、 q 轴的电流调节器的传递函数分别是

$$\begin{cases} G_1(s) = K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \\ G_2(s) = K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \end{cases} \quad (16)$$

从图4可以看出, 由于同步电动机 d, q 轴变量的相互耦合作用, 无法简单地对 d, q 轴的定子电流控制器分别设计, 必须对系统进行解耦处理^[13]。从图4可得

$$G_1(s)G_2(s)G_d(s)G_q(s) = \frac{1+T'_{d0}s}{x_{d1}x_{q1}(1+T_m s)^2(1+\frac{x'_{d1}T'_{d0}s}{x_{d1}})} = 1 \quad (17)$$

式中 $G_d(s) = \frac{1+T'_{d0}s}{(1+T_m s)(x_{d1} + x'_{d1}T'_{d0}s)}$, $G_q(s) = -\frac{1}{x_{q1}(1+T_m s)}$ 分别为 d 、 q 轴被控对象的传递函数。

若设计电流控制器 $G_1(s), G_2(s)$, 使得

$$G_1(s)G_d(s) = G_1(s) \frac{1 + T'_{d0}s}{x_{d1}(1 + T_m s)(1 + \frac{x'_{d1}}{x_{d1}} T'_{d0} s)} = -1 \quad (18)$$

$$G_2(s)G_q(s) = G_2(s) \frac{1}{-x_{q1}(1 + T_m s)} = -1 \quad (19)$$

则式(18)、(19)分别是图 5 所示的 d 、 q 轴电流调节系统的闭环特征方程。

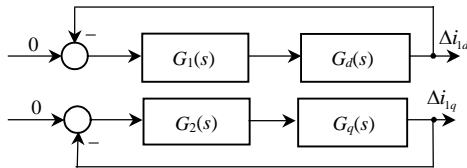


图 5 电流调节系统解耦框图
Fig.5 Diagram of decoupling of the stator current closed-loop control system

按此设计的电流控制器, 消除了电流环 d 、 q 轴之间的耦合, 于是, 可采用解析法按照性能指标的要求, 设计相应的比例、积分系数。

由此, 本文提出电流调节器的参数可由式(20)描述

$$\begin{cases} K_{pd} = kx'_{d1}, & K_{id} = k \frac{x_{d1}}{T'_{d0}} \\ K_{pq} = 2x_{q1}, & K_{iq} = \frac{x_{q1}}{2T_m} \end{cases} \quad (20)$$

式中 $0 < k \leq 1$ 为修正系数, 该值可根据参数 T'_{d0} 值确定, 以获得好的性能指标。实际上, 由式(18)可知, T'_{d0} 描述了开环传递函数中的一个零点。

5 试验与仿真

采用上述设计方法, 本文对一实际的基于 DSP 控制的交交变频同步电动机调速系统设计了相应的电流调节器, 并已投入运行。其中, 同步电动机参数如表 1 所示。

表 1 同步电动机参数
Tab.1 Parameters of synchronous motor

r /pu	x_d /pu	x_q /pu	x'_d /pu	x''_d /pu	x''_q /pu	T_{d0} /s
0.009	0.297	0.171	0.047	0.044	0.0742	4.04

本文对该实际系统进行了深入的试验和仿真研究。其中, 同步电动机的仿真模型由 Park 方程^[14]详尽描述。图 6、图 7 分别给出了同步电动机启动工况下, 定子 d 、 q 轴电流的仿真和试验波形。图中, 定子给定电流 $i_d^* = 0, i_q^* = 0.7$, d 、 q 轴实际电流 i_d 、 i_q 由波形描述。

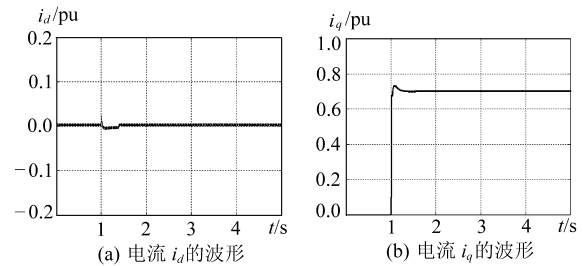


图 6 电流仿真波形
Fig.6 Simulation waveforms of current

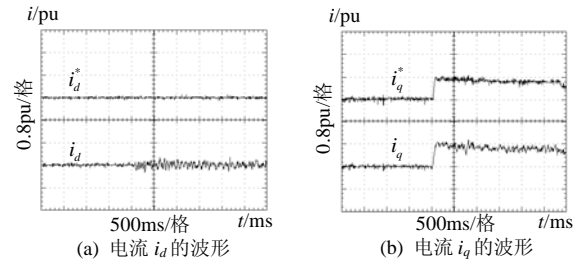


图 7 电流试验波形
Fig.7 Experimental waveforms of current

运行试验及仿真结果表明, 采用本文设计的电流调节器可以获得较好的动态和稳态性能。试验及仿真验证了本文提出的用于解析分析的等效电路模型及提出的调速系统电流控制器设计方法是正确的, 设计的控制器是有效的, 性能优良。

6 结论

本文将交交变频器供电的同步电动机中各变量的 d 、 q 轴低频分量(含非周期分量)和低频分量分别加以处理, 得出了交交变频器供电的同步电动机的等效电路模型。该等效电路模型适合于交交变频同步电动机系统稳态和似稳态的分析。在此基础上, 本文提出了一种设计调速系统电流控制器的新方法。试验及仿真结果表明了本文提出的等效电路模型和电流调节器设计方法是正确有效的, 为同步电动机交交变频器调速系统的解析分析提供了重要的理论基础和方法手段。

参考文献

- [1] 孟朔, 王祥珩. 交交变频同步电机系统的稳态仿真及性能研究[J]. 电工电能新技术, 1997, (4): 1-5.
Meng Shuo, Wang Xiangheng. The research on AC-AC inverter synchronous motor system simulation in steady state[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy. 1997, (4): 1-5.
- [2] Smith K S, Ran L. Time domain simulation of cycloconverter-fed variable speed AC drivers with closed-loop control[J]. IEEE Control. 1994: 1406-1410.
- [3] 干永革, 王文, 李发海, 等. 交交变频同步电机控制系统供电电网谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 21-25.

- Gan Yongge, Wang Wen, Li Fahai *et al.* Study on harmonics of supply net of cycloconverter synchronous motor field-oriented control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 21-25.
- [4] 马小亮. 大功率交-交变频调速及矢量控制技术(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 伍小杰, 谢桂林, 姜建国. 大功率交-交变频-双电枢绕组同步电动机调速系统的研究及应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2001.
Wu Xiaojie, Xie Gulin, Jiang Jianguo. Research and application of the regulation system of high-capacity cycloconverter-fed dual three-phase synchronous machine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2001.
- [6] 李耀华, 李发海, 王祥珩. 交交变频磁场定向控制同步电动机性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 1994.
Li Yaohua, Li Fahai, Wang Xiangheng. Study of cycloconverter-fed synchronous motor drive system with airgap flux-oriented control [D]. Beijing: Tsinghua University, 1994.
- [7] Ma Weiming, Hu An, Liu Dezhi *et al.* Stability of a synchronous generator with diode-bridge rectifier and back-EMF load[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 458-463.
- [8] 杨青, 马伟明, 孙俊忠, 等. 3/3相双绕组发电机系统的等效电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 93-98.
Yang Qing, Ma Weiming, Sun Junzhong *et al.* Equivalent circuit model of 3/3-phase double winding generator with simultaneous AC and rectified DC load[J]. Proceedings of the CSEE. 2003, 23(3): 93-98.
- [9] 孟进, 马伟明, 刘德志, 等. 带反电势负载的三相发电机整流系统直流脉动分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 53-57.
Meng Jin, Ma Weiming, Liu Dezhi *et al.* DC ripple analysis of three-phase generator-rectifier system with back-EMF load [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 53-57.
- [10] 杨青, 马伟明, 孙俊忠, 等. 同时带交流和整流负载的三相同步发电机系统的等效电路模型[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 1-5.
Yang Qing, Ma Weiming, Sun Junzhong *et al.* Equivalent circuit model of 3-phase synchronous generator with simultaneous AC and rectified DC load[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2003, 18(4): 1-5.
- [11] 杨青, 马伟明, 张磊, 等. 电路模型在同步发电机整流系统仿真中的应用[J]. 中小型电机, 2001, 28(2): 9-12.
Yang Qing, Ma Weiming, Zhang Lei *et al.* Application of Circuit Model to Simulation of Synchronous Generator Rectifier Load Systems[J]. S&M electric machines, 2001, 28(2): 9-12.
- [12] 马伟明, 胡安, 刘德志, 等. 同步发电机-整流器-反电动势负载系统的稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2002, 15(1): 1-7.
Ma Weiming, Hu An, Liu Dezhi *et al.* Stability analysis of synchronous machine with diode-bridge rectifier and back-EMF load[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2002, 15(1): 1-7.
- [13] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 121-125.
Zhou Zhigang. A induction motor de-couple control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 121-125.
- [14] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

收稿日期: 2004-11-05。

作者简介:

林桦(1963-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动;

邹云屏(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动;

王兴伟(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。