

# 150 kVA 超导线圈和锂电池—电容组合式 SVG—APF 设计技术

沈小晴<sup>1</sup>, 陆广香<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏 南京 210003; 2. 南大电气工程系, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 超导线圈和锂电池—电容组合式 SVG-APF 可以防止由“堵转多米诺效应”(Choke Domino Effect, CDE)引起的电压崩溃,也可以进行谐波治理从而提高电能质量。从应用角度出发,系统地总结了在研制 380 V/150 kVA 超导线圈和锂电池—电容组合式 SVG-APF 过程中解决的关键技术:在高频、过压、过热环境下确保 IGBT、控制模块和控制电路等大功率电力电子设备可靠稳定运行;利用数字滤波器、数字锁频、锁相等软件算法技术确保 SVG-APF 的精准输出,向电力系统输出工频同相电压实现无功补偿、向电力系统输出同频同幅反相谐波实现有源滤波。

**关键词:** 超导线圈; 有源电力滤波器; 无功补偿; 电压崩溃; DSP 控制器

## 150 kVA superconductor coil and lithium battery-capacitor SVG-APF

SHEN Xiao-qing<sup>1</sup>, LU Guang-xiang<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Superconductor coil and lithium battery-capacitor SVG-APF is very important for improving power supply quality and preventing voltage collapse induced by Choke Domino Effect. From practical application viewpoint, this paper systematically summarizes the key technology about the fabrication of 380 V/150 kVA superconductor coil and lithium battery-capacitor SVG-APF which was developed recently. The electrical and electronic devices of great power such as IGBT, the drive module and the control circuit are guaranteed reliable and stable operation in high frequency, over high voltage and superheat environment. The digital filter, the digital frequency-lock and the digital phase-lock software algorithm technology guarantee that the SVG outputs frequency in-phase voltage to implement reactive power compensation and the APF outputs the frequency with same amplitude but the opposition phase to realize active power filter.

**Key words:** superconductor coil; active power filter; reactive power compensation; voltage collapse; DSP controller

中图分类号: TM725; TM917; TM743 文献标识码: B

文章编号: 1674-3415(2010)16-0163-05

## 0 引言

由于电力电子技术的飞速发展,各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛,电网污染所造成的危害也日趋严重。为解决电网电能质量,我们研制和设计 150 kVA 超导线圈和锂电池—电容组合式 SVG—APF 系统。目前在电力系统大量使用的是并联电容无功补偿方式来补偿电网的无功负荷,这种方式会在系统电压降低时,无功补偿装置的输出电压成平方下降,实际上是加剧了系统的崩溃行为<sup>[1-3]</sup>。锂电池—电容组合式 SVG 不失为一个好的选择,正常运行时使用电容,电压下降较大时切换到锂电池,必要时还可进行适当的有功补偿。与锂电池相比,超导线圈式 SVG 的最大优点是能在短时间内输出数百安培甚至更大的有功电流,补充电网能量防止系统崩溃。超导线圈和锂

电池—电容组合式 SVG 对于防止“堵转多米诺效应”(Choke Domino Effect, CDE)引起的电压崩溃和提高电能质量有着十分重要的作用<sup>[4]</sup>。

超导线圈和锂电池—电容组合式 APF 有源滤波器,自身就是谐波源。其依靠 IGBT 电力电子元件和设备<sup>[5-6]</sup>,在检测到系统谐波的同时产生一组和系统幅值相等,相位相反的谐波向量,来抵消掉系统谐波。

目前使用 IGBT 在中小功率变频调速器已得到成功应用,但是 380 V/150 kVA 的 SVG—APF 的情形变得比较复杂,由于涉及高频、过压、过热和 DSP 控制等诸多领域,在具体的技术实现上还是有一定难度。这里研制的 150 kVA 超导线圈和锂电池—电容组合式 SVG—APF 系统使用了 TI 的 TMS320F2810 32 位 DSP 芯片和 Eupec 的 FS450R17KE3 6 单元 IGBT。有源电力滤波器的谐

波检测虽有多种方法,基本上都采用低通滤波器(或带通滤波器),在比较非递归数字滤波器与小波滤波器的关系并继而分析利用 FFT 的快速小波变换后,针对系统特定快速需求,设计了适合于有源电力滤波器控制系统数字式快速小波滤波器。

在研制 380 V/150 kVA 高温超导储能及无功补偿、有源滤波系统的过程中,遇到和克服不少困难,在理论和实践两方面积累了一些经验,现将有关技术总结如下,希望能从另一个侧面对该领域已发表的文献做些补充,供参考。

### 1 系统构成

#### 1.1 主电路

主电路采用常规结构,如图 1 所示,主要由 IGBT 模块、容性母线、电抗器、锂电池和直流电容及超导磁体构成。对于超导储能,仅额外增加由 IGBT 实现的电流—电压变换环节。

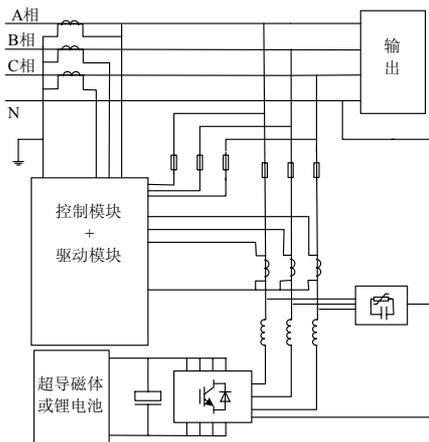


图 1 系统组成图

Fig.1 System configuration

#### 1.2 IGBT

目前市场上供应的 IGBT 模块以欧洲和日本的产品为主。欧洲在大功率器件方面占有优势,主要有 Semikron 和 Eupec 两大制造商。尽管现在看来 Semikron 的产品具有较好的性价比,在研发之初考虑到当时 Eupec 的产品以 80℃ 标定,所以我们选择了 Eupec 的 FS450R17KE3 作为主功率模块,该模块为 6 单元/1700 V/450 A。

IGBT 模块外表看上去抗击能力很强,其实无论是电气性能还是机械性能都要比可控硅脆弱得多。电气方面,由于内部用的是集成电路芯片,在过压、过流和通态损耗及开关损耗引起的过热方面的裕度很小。机械方面,芯片与底座之间的连接,引出线与芯片之间的连接对外界的机械应力特别是引出线上的拉应力非常敏感,安装时必须严格按照

说明书进行操作。

#### 1.3 驱动模块

从原理上讲,驱动模块并不复杂,市场上品种繁多,也完全可以自己设计制作。实践表明,对于大功率器件,购买专业厂家的驱动模块也是值得考虑的,甚至总体上是经济的。目前市场上出售的输出电压为 +15 V 和 -8 V 的驱动模块,不宜用于大功率 IGBT,利用稳压管产生负压的廉价模块更不宜使用。我们选用了 CONCEPT 的 6SD312EI,这种模块的封锁电压为 -15 V,可在一定程度上抵御外来干扰的影响,即使如此仍需将散热器可靠接地

6SD312EI 的最大优点是驱动模块与 IGBT 之间不用连线,而是直接焊接,最大限度地减少了门极杂散电感。如图 2 所示,模块分主板和底板两部分,主板适用于所有 IGBT,底板则是量体裁衣并直接焊接在 IGBT 模块上,不同的 IGBT 使用不同的底板。底板上各种电阻、电容和 TVS 都是经过精心设计和整体测试的,特别是开关损耗的计算与精确测量(如图 3 所示),从而在硬件上保证 IGBT 模块能够运行在最佳状态。

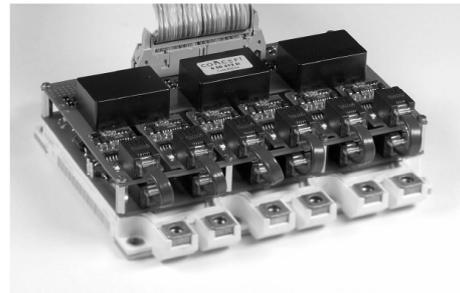


图 2 6SD312EI 驱动模块及 S450R17KE3 IGBT 模块

Fig.2 6SD312EI drive module and S450R17KE3 IGBT

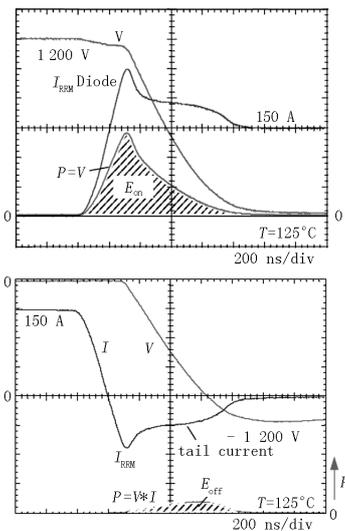


图 3 开关损耗的测量计算

Fig.3 Switch loss measurement

## 1.4 散热器与冷却风机

目前国内散热器厂家一般不提供热阻数据, 这就很难确定散热器的大小。为正确设计散热器和选择冷却风机的类型及流量, 有必要实测所选散热器的热阻。我们的方法是将大功率电熨斗与散热器接触, 接合面上同样涂上适量的导热胶, 通过电熨斗消耗的电功率和散热器的温升即可算出散热器在某一风机流量下的热阻。SVG 在系统中是长期连续运行的, 所以风机的质量也至关重要。

## 1.5 电抗器

大功率电抗器要求散热性能好, 这与小型 SVG 所用的封闭式电抗器不同。我们所用电抗器的载流能力为 250 A, 电抗器制造厂曾为神舟 5 号制造过类似设备, 发热及噪声等总体质量基本上令人满意。

## 1.6 容性母线

在预研阶段, 在 IGBT 直流侧我们也曾采用铜排直接连接。这种做法比较省事, 对于小功率装置也是可行的。对于大功率装置采用铜牌直接连接基本上行不通, 因为在大功率情况下全控型器件中的电流变化率非常高, 即使主通道有微小的杂散电感也能引起相当高的振荡过电压。而 IGBT 实际上就是集成电路芯片, 其耐压能力非常有限。实践表明容性母线的杂散电感确实比较小, 大功率电路应优先采用。

## 1.7 高温超导磁体结构

目前国产单根 BSCCO 高温超导线在 77 K 液氮温度下临界超流虽已达到 85 A 左右, 但这仅仅是直线和零场情况。对于超导线圈结构, 其临界电流会随着磁场特别是垂直于超导带表面磁场的增加而迅速下降, 所谓的高温超导磁体结构就是用高导磁材料为超导线圈产生的磁场提供良好通路, 使线圈端部漏磁场被吸引并约束在高导磁材料中, 不经过线圈本身。这样可使线圈端部垂直于超导带表面的径向磁场分量大幅下降, 从而提高超导线圈的储能密度。

## 1.8 超导磁体材料选择

超导磁体所用材料的选择涉及材料、物理、磁学和电学等诸多领域, 将由另文发表。

# 2 控制电路

## 2.1 控制电路

如图 4 所示, 控制电路采用 TMS320F2810 32 位 DSP 芯片, 选用 2810 的主要原因是其总线不出芯片。与微机保护不同, SVG 的大功率 IGBT 本身就是一个很强的干扰源。2810 内部有 18K SRAM, 64K FLASH, 其事件管理器能提供 4 个定时器和 2

路 6 通道 PWM 信号。如图 4 所示。

2810 的 2 路 6 通道 PWM 输出信号, 经电平转换后, 一路控制 FS450R17KE3 IGBT 模块, 另一路控制超导线圈的电流电压变换模块。此外, 2810 能在 150 MHz 下稳定运行, 对于计算复杂、实时性要求高的 SVG 来说是一个良好的平台。

## 2.2 触摸控制屏

人机界面采用 3M Microtouch 的 15 英寸触摸液晶控制屏, 通过 232 口与主控板相连, 并通过以太网卡联网。触摸控制屏的软件由 VC++ 与 Matlab 实现, Matlab 具有很强的计算和绘图功能, 又能很好地与 VC 接口。使用 Matlab 与 VC 混合编程, 比起仅使用 VC 的传统编程方法要方便得多, 计算和绘图效果更好。Matlab 还可以与 Java 接口, 在网络编程方面具有优势。

## 2.3 保护部分

6SD312EI 驱动模块通过监视 IGBT 的集电极电压来实现对 IGBT 的保护, 输出 6 路反馈信号, 分别反映模块中 6 只 IGBT 的状态。出现异常时驱动模块自动封锁 PWM 信号 1 s, 1 s 以后的行为由 DSP 根据系统的状态决定。

# 3 关键技术

## 3.1 CLARK 变换及其 32 位 DSP 编程

派克变换和克拉克变换是变频调速、SVG 及电力有源滤波器的核心算法。由于专业背景不同, 不同领域的研究人员有着不同的表达习惯和不同的侧重点, 从而文献或书刊中给出的派克变换和克拉克变换形式各异。过去电力系统研究人员主要在电力系统仿真计算中使用派克变换, 基本上不涉及硬件。从事电机变频调速的研究人员首先在硬件方面实现了克拉克变换, 从而提高了变频调速系统的稳定性。后来从事 SVG 和电力有源滤波器的科技工作者也在硬件中引进了此类算法, 但直至现在并未发现有文献能够给出克拉克变换在 DSP 中的具体实现方法, 可能是出于技术保密原因。这种现象在一定程度上妨碍了 SVG 技术的发展, 因为如果处理不当, 则很难得到一个稳定的系统。派克变换和克拉克变换的若干变异形式及其 32 位 DSP 编程方法将由另文给出。

## 3.2 数字锁频

无论是 SVG 还是 APF, 其输出的工频成分必须与电力系统同频率, 要求 SVG 或 APF 稳定地并网运行这一点是变频调速系统研究人员未曾碰到过的, 也是难点之一。通过硬件将工频信号变成方波再加以适当处理可以实现这一点, 但无论是采用

DSP 内部的 16 位或 32 位计时器（或计数器）都存在一个截断误差问题，很难做到 SVG 的输出频率与系统频率完全相同。如果两者频率不等，用不了多长时间，少则几十分钟，多则几小时，SVG 输出电压与系统电压的相位差将拉开到  $180^\circ$ 。以 16 位计数器为例，当 IGBT 的开关频率为 3 kHz 即每周波 60 个点时，截断误差约五万分之一，一个周波 60 个点的累计误差约为五千分之六，即最坏的情况下

只需十几分钟相位差即可达到  $180^\circ$ 。这显然是不允许的，必须实行数字锁频。所谓的数字锁频其实很简单，即在每个周波开始用软件强行同步。这样虽然从一个周波的开始到一个周波结束可能有微小的相位漂移，但这种误差不会带到下一周波，这样就在数字上实现了锁频。显然这种数字锁频方式对输出波形有一定影响，但只要 SVG 输出电压频率和系统频率非常接近，这种影响就可忽略不计。

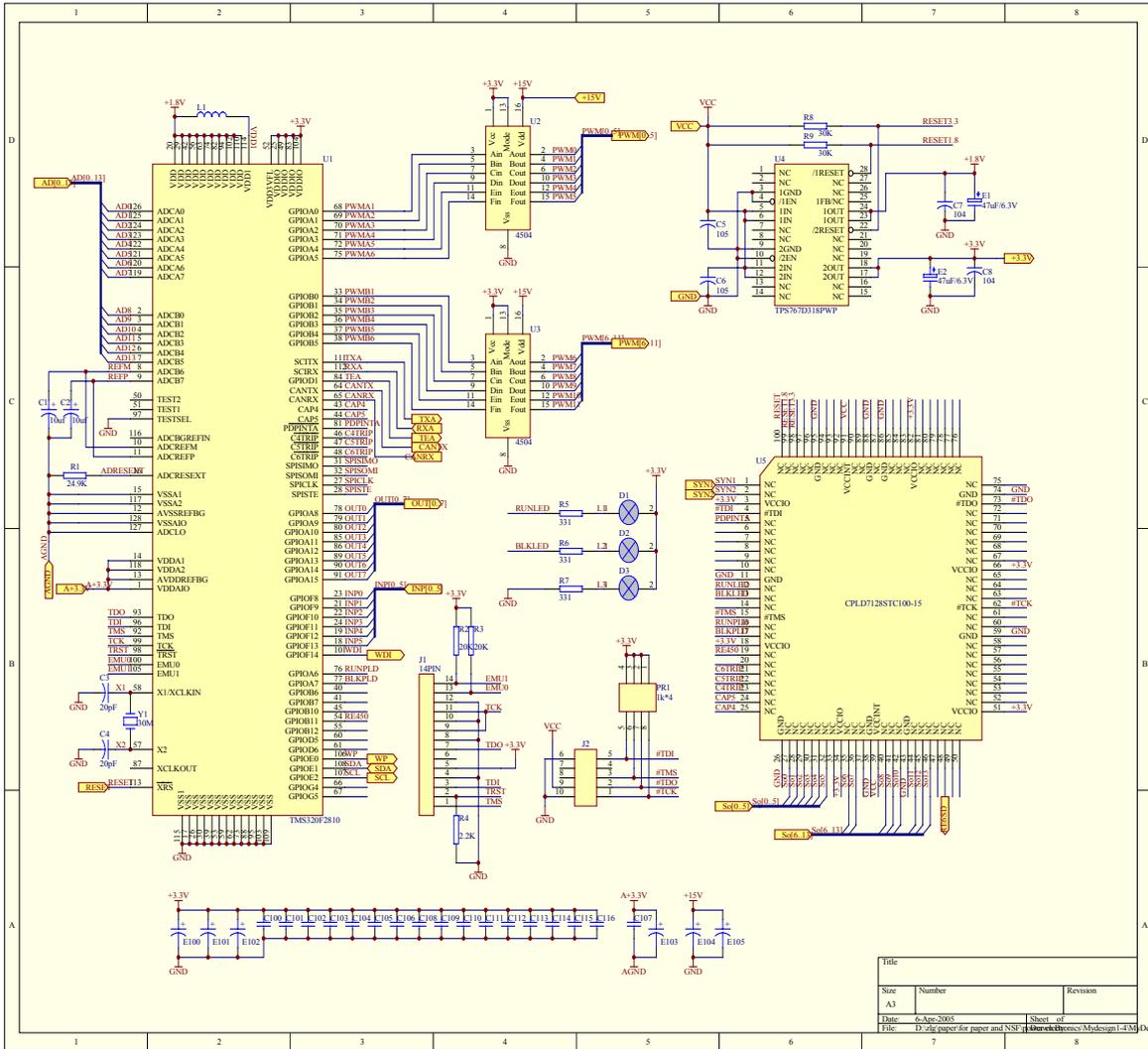


图 4 控制电路图

Fig.4 Control circuit

### 3.3 数字锁相与电压环

锁相环（PLL）技术已经非常成熟，PLL 集成电路的使用也非常普遍。在 SVG 中已经配置了高性能 DSP，所以就不宜再使用 PLL，因为这样会使硬件电路十分复杂。数字锁相与数字锁频及电压环的闭环控制是紧密相连的，数字锁相是在数字锁频的基础上根据系统需求人为地将相位差拉开一个角度，这个角度对于给定的系统状态是恒定不变的。

显然数字锁相与电压环的闭环控制是密不可分的，正常运行时既要保证 SVG 输出电压与系统电压同频同相，又要吸收一定有功以维持 IGBT 模块直流侧电容电压恒定并达到一定数值。实践表明，使用 32 位 150 MHz 的 TMS320F2810 能够在保持硬件电路比较简洁的情况下较为轻松地完成这一任务。

### 3.4 系统控制

有了高性能的 DSP，不但可以实现常规的双闭

环控制, 还可实现较复杂的控制算法(包括电力有源滤波器中的滤波算法)。与过去使用硬件电路或低性能 DSP 触发 IGBT 不同, 在 DSP 上实现复杂的控制算法后不但可以提高系统的稳定性, 还可减小直流电容和输出电抗器的容量, 从而降低成本, 在铜价不断上涨的形势下这一点显得特别重要。

#### 4 结语

所研制的 380 V/150 kVA 超导线圈和锂电池—电容组合式有功无功补偿和有源滤波装置实际上是两位一体。锂电池—电容组合式可独立工作, 用超导线圈加上电流—电压变换模块替代锂电池即构成超导线圈式补偿装置。锂电池—电容组合式补偿装置已投入试运行, 目前超导线圈式补偿装置还在调试阶段。

目前 380 V/150 kVA 锂电池—电容组合式无功补偿及有源滤波装置已经运行两年多了, 由于设计和制造过程中尚存在一些问题, 试运行期间装置的输出功率控制在 100 kVar。虽然输出电抗器仅为 1 mH, 直流侧电容用 6 只 450 V/10 000  $\mu$ F 三串两并, 系统运行非常稳定。

#### 参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[J]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
  - [2] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究: (一) 仿真和试验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57.  
GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of
- (上接第 118 页 continued from page 118)
- HUANG Jin-hai, DAI Guo-an, HAN Ming-guang. Structure and application of traction substation comprehensive automation system[J]. Relay, 2007, 35 (S): 341-343.
  - [3] 杨坚昌. 铁路电力远动系统技术研究[J]. 应用科学, 2009: 125-126.  
YANG Jian-chang. Research on railway power telecontrol system technique[J]. Applied Science, 2009: 125-126.
  - [4] 刘家军. 微机远动技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.  
LIU Jia-jun. Microcomputer telecontrol technique[M]. Beijing: China Water Resources and Hydro-electric Press, 2001.
  - [5] 默少丽. 计算机接口技术及自动控制综合实验系统[J]. 试验技术与管理, 1999 (3): 36-38.  
MO Shao-li. Comprehensive experimental system of computer interface and automatic control[J].

cascade STATCOM: part one simulation and experiments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-57.

- [3] 魏文辉, 刘文华, 滕天乐, 等.  $\pm 50$  Mvar 链式 STATCOM 的稳态特性研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 28-31.  
WEI Wen-hui, LIU Wen-hua, TENG Tian-le, et al. Steady state study of  $\pm 50$  Mvar STATCOM with chain-circuit topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 28-31.
- [4] 蒋晓华, 褚旭, 吴学智, 等. 20 KJ/15 kW 可控超导储能实验装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 88-91.  
JIANG Xiao-hua, CHU Xu, WU Xue-zhi, et al. A 20 KJ/15 kW SMES system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 88-91.
- [5] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[J]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 刘文华, 刘炳, 王志泳, 等. 基于 IGBT 三电平逆变器的  $\pm 100$  kvar D-STATCOM[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 70-73.  
LIU Wen-hua, LIU Bing, WANG Zhi-yong, et al.  $\pm 100$  kvar D-STATCOM based on IGBT tri-level inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (1): 70-73.

收稿日期: 2010-07-15

作者简介:

沈小晴 (1969-), 女, 硕士, 工程师, 从事继电保护、电力电子、计算机应用方面的研究;

陆广香 (1956-), 男, 博士, 教授, 从事继电保护、轴系扭振和超导材料及其应用方面的研究。

Experimental Technology and Management, 1999 (3): 36-38.

- [6] 陈建. 机电专业项目课程体系构建探讨[J]. 中国职业技术教育, 2007 (31): 28-29, 32.  
CHEN Jian. Chinese curriculum system construction of mechanical electronics specialty project[J]. Vocational and Technical Education, 2007 (31): 28-29, 32.

收稿日期: 2009-09-10

作者简介:

刘家军 (1967-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统监控与调度自动化; E-mail: liujiajun-88@163.com

姚李孝 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与运行;

刘小勇 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统测量与控制。