

# 晶闸管在大功率变流和开关中的应用

傅 鹏<sup>1</sup> 高 格<sup>1</sup> 李 定<sup>1</sup> 温家良<sup>2</sup> 汤伦军<sup>1</sup>  
王林森<sup>1</sup> 宋执权<sup>1</sup> 黄大华<sup>3</sup> 吴文科<sup>3</sup> 田宇旗<sup>3</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031  
2. 中国电力科学研究院 北京 100085  
3. 西安整流器厂 西安 710077)

**摘要** 描述了利用大功率晶闸管器件和实时控制器实现的 30MW 有环流变流系统、15kA/2.5kV 大功率双向直流晶闸管开关, 该变流系统和开关系统电路结构新颖, 已经使用于国家九五重大科学工程 EAST 超导托卡马克装置中, 同时给出了实验结果。

**关键词:** 晶闸管 大功率环流变流器 晶闸管开关 实时控制

**中图分类号:** TN134

## The Application of Thyristor in High Power Converter and DC Breaker

Fu Peng<sup>1</sup> Gao Ge<sup>1</sup> Li Ding<sup>1</sup> Wen Jialiang<sup>2</sup> Tang Lunjun<sup>1</sup> Wang Linsen<sup>1</sup>  
Song Zhiquan<sup>1</sup> Huang Dahua<sup>3</sup> Wu Wenke<sup>3</sup> Tian Yuqi<sup>3</sup>

(1. Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Science Hefei 230031 China  
2. China Electric Power Research Institute Beijing 100085 China  
3. Xian Rectifier Work Xi'an 710077 China)

**Abstract** The paper gives a description of the four-quadrant converter with circular current and great power, and the DC breaker made from thyristor. A original configuration of AC/DC converter, thyristor DC circuit breaker (TDCB), and their real-time control system are introduced in detail. The good experiment results are also presented.

**Keywords:** Thyristor, four quadrant AC/DC converter, TDCB, real-time control

### 1 引言<sup>[1,2]</sup>

随着电力电子器件的发展, 各种由电力电子器件组成的新型装置正朝着小型化、高频化的方向发展, 并广泛应用于各行各业。但是在大功率电力电子应用中, 由于晶闸管器件具有电压高、电流大的特点, 它仍占着主要地位。在国家九五重大科学工程项目 EAST 电源系统的建设中我们利用晶闸管半导体器件研制出了大功率有环流运行的四象限变流系统和双向直流晶闸管开关系统。

地球上储存着取之不尽的氘气, 象氢弹和太阳一样氘气聚合反应可以产生巨大的能量。托卡马克装置主要是探索利用氘和氚核聚变反应释放出可以控制的能量, 解决人类所面临的能源问题。托卡马

克装置中聚变反应数千万度的高温等离子体电流环的产生、平衡、形状、约束主要靠大功率电源在等离子体外围的十几个线圈上通以大电流而产生各种磁场来控制。

EAST 超导托卡马克是一个电物理装置, 其外围有一极向场超导线圈, 和纵场超导线圈。超导磁体总储藏能量为 400MJ。EAST 托卡马克极向场有 14 个超导线圈, 它们通过组合可以用 12 套电源向其供电, 如图 1 所示。各线圈自感从数十毫亨到百毫亨, 各线圈之间互感在数十毫亨量级。12 组线圈在托卡马克中是以同心圆组成, 其互感较大, 因此各电源之间也存在较大的耦合, 在设计时必须予以考虑。电源是周期间歇运行, 运行占空比为 1000s/2800s。

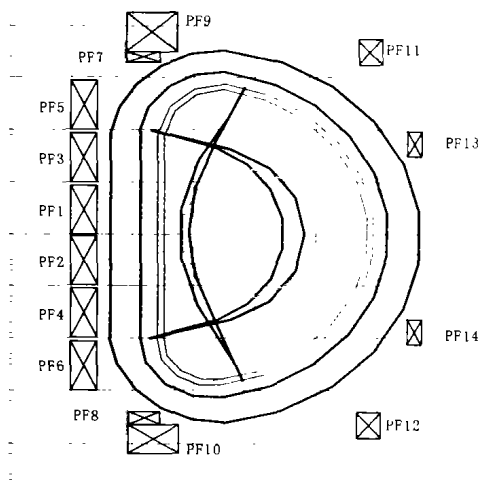


图 1 EAST 超导托卡马克装置极向超导线圈布置截面图

Fig.1 The poloidal field coil distribution of EAST superconducting tokamak

电源系统应该提供如下功能：①在各超导线圈上提供可以控制的且能正反方向的  $0\sim 15\text{kA}$  电流和  $0\sim 2.5\text{kV}$  电压，实现等离子体电流产生上升，平顶控制及其等离子体电流位置和形状的控制。②在超导线圈失超时，能迅速将超导线圈中电流转移出来，实现失超保护。③由于电源故障或非正常操作而出现的过电压和电流，应能迅速保护。④整个电源系统对地隔离  $5.0\text{kV}$ 。⑤电源系统测量及监控。

其运行电流波形和阶段见图 2 和表 1。从图中可以看出不同的阶段电流和电压非常不同，这需要使用开关网络、AC/DC 变流系统、和精确的计算机控制系统协同才能完成。该电源系统不仅功率高、耗资巨大，而且对其技术有特殊的要求。在极向场电源系统中，最关键的技术是  $15\text{kA}$  四象限有环流运行的晶闸管变流系统和开断双向电流的  $15\text{kA}/2.5\text{kV}$  晶闸管开关系统。鉴于目前我国工业技术水平限制，我们开发和研制了变流器和开关，并在实验中取得了非常好的结果，已经投入大批量生产。

托卡马克电源是间歇运行，运行占空比为  $1000/2800$ ，每套极向场电源在不同的阶段输出功率也不相同。因此要求变流系统和直流开关配合能任意输出电流波形，在托卡马克装置的等离子体建立初期和电流上升阶段需求功率非常大，其总功率为数百兆瓦，持续时间为数秒钟。如果配备如此大

的变电所和变流设备显然耗资太高，同时对电网形成很大的冲击，影响电网质量。我们采用开关和电阻网络换流的方法，利用超导线圈中的电感储能，在直流电源中产生这样数百兆瓦的短时功率，以满足物理要求。为了给电源供电，已经新建  $110\text{kV}/81.5\text{MVA}$  变电所，输出  $10\text{kV}$  中间电压给 12 套电源的整流变压器供电。电源不同阶段消耗功率如表 1 所示。

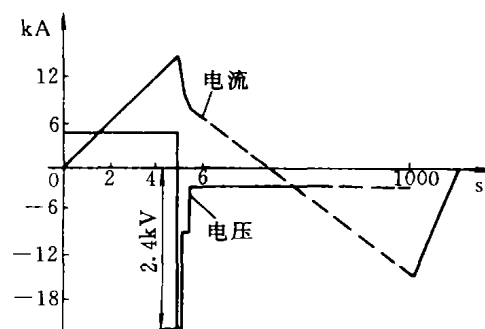


图 2 电源负载电流和电压运行曲线示意图

Fig.2 The voltage and current curves in power supply operation

表 1 电源运行各阶段消耗功率

Tab.1 The dissipative power of power supply in each phase

放电阶段	电网消耗功率/MW	持续时间/s
超导线圈励磁	20	5
等离子体电流运行初期	-200	1~2
等离子体电流慢上升	-30	4
等离子体电流平顶	20	1000
等离子体电流下降	-10	5

每套电源由  $10\text{kV}$  高压开关柜、整流变压器、AC/DC 晶闸管变流器、晶闸管开关及其电阻网络、失超保护的直流快速开关和爆炸开关，计算机控制和监控测量系统。典型的电源原理电路如图 3 所示。

## 2 大功率有环流四象限变流器<sup>[3,4]</sup>

EAST 磁体电源变流系统主要是在超导线圈中通以一定的电流波形，实现等离子体电流的慢上升和电流控制、以及等离子体的位移、和形状控制，整个电源系统变流器装机容量为  $210\text{MW}$ ，每套电源变流系统有环流四象限运行，直流电流  $15\text{kA}$ ，直流电压  $200\sim 700\text{V}$  不等。在变流器设计中关键是有环

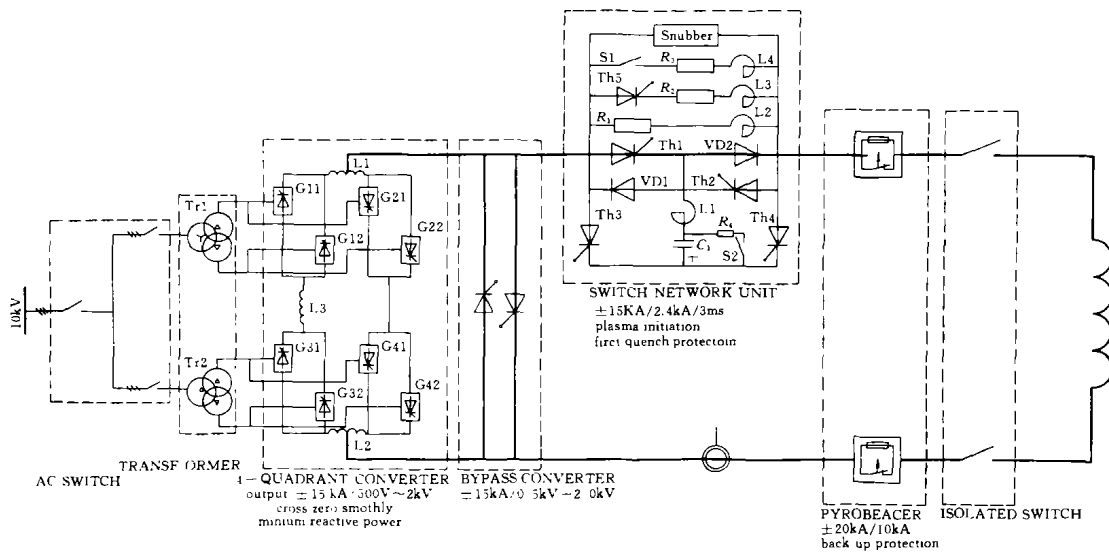


图3 EAST极向场电源电路示意图

Fig.3 The power supply circuit for EAST poloidal field coils

流四象限运行，降低变流器成本，高的可靠性，同时利用两变流器的串联顺序控制运行方式，减小无功功率输出。

极向场电源变流系统距110kV变电所大约200m，整个电源系统由50MW/110kV/10kV主变压器供电，通过15台高压开关柜分配到12台3~10MW的干式变压器，每台整流变压器输出变流系统所需电压。

每组电源变流系统由四台同相逆并联的晶闸管变流器组成，如图4所示。每台变流器和整流变压器组成同相逆并联方式，如G1由两个并联的半桥组成G11和G12组成，在相位上它们相差180°。同相逆并联连接方式，在大电流运行时可以减小母排电动力和空间电磁干扰。

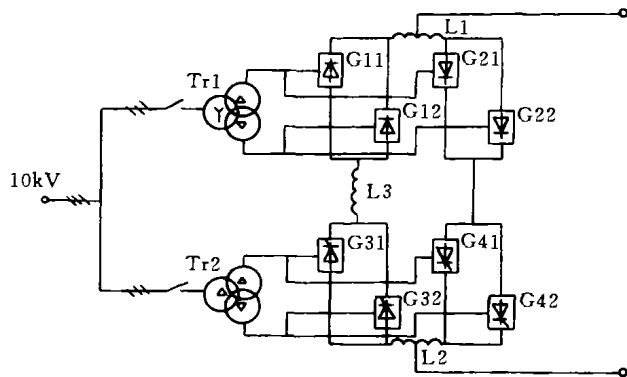


图4 大功率四象限有环流变流器电路

Fig.4 The four-quadrant converter circuit with circular current

四台变流器中有两台G1、G2串联正相运行，输出正相电流；另两台G3、G4串联反相运行，输

出负向电流；G1和G2、G3和G4在相位上分别相差30°。正反两组串联的变流器通过电感L1、L2、L3连接，变流器G1和G2、变流器G3和G4分别同一个变压器Tr1和Tr2二次的两个绕组。环流运行时控制器根据输出直流电流大小不同选择运行的变流器G11、G12、G21、G22、G31、G32、G41、G42投入和退出运行，自动实现系统有环流运行控制，而且不增加变压器容量和造价。所有变流器用去离子水循环冷却<sup>[3,4]</sup>。

在变流系统输出处有电流测量传感器，直流电流绝对值从额定的40%~100%时，变流器是两象限运行，G1和G3输出正向电流，G2和G4输出负向电流，每个变压器二次两绕组同时运行，各负担50%的功率；当负载电流的绝对值在额定值40%以下时，变流系统运行在四象限方式，仅G11、G22、G31、G42运行，其他变流器关闭，实现变压器交叉有环流运行。仅用一台变压器和两台变流器（如Tr1、G1、G2），通过适当的连接和运行方式控制的配合，保证了在大电流时，可以组合成同相逆并联方式，减少系统电动力和电磁干扰；又可以在电流减小快要过零时，利用变压器的两个同相逆并联绕组实现有环流运行，电流平滑过零点。这种四象限运行变流器不增加整流变压器容量。

两组变流器串联运行，可以输出12脉波。在负载需要有功率较小时，可以利用串联顺序控制方法减小无功输出。采用该控制方式后，电源系统最大无功输出从50MW减小到了25MW。实验电流波形见图5。

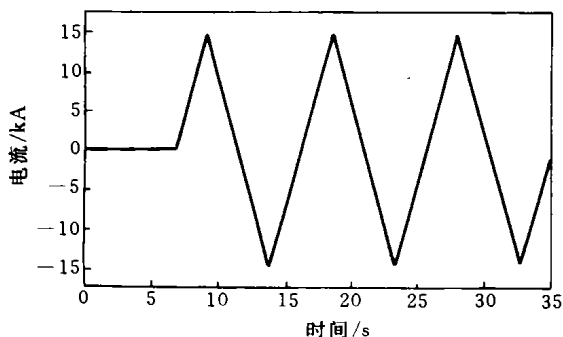


图 5 30MW 四象限变流器有环流运行实验电流波形

Fig.5 The output current curve of 30 MW converter in experiment

### 3 大功率直流晶闸管开关

整个电源系统有 12 套晶闸管开关。每个晶闸管直流开关是用来迅速分断超导线圈中直流电流，使超导线圈中电流迅速下降，在托卡马克装置中建立等离子体和使等离子体电流快速上升，同时也可以作为超导磁体的一级失超保护。晶闸管开关参数如表 2 所示。

表 2 晶闸管开关参数表

Tab.2 The TDCB parameter

额定电流	15 kA
额定电压	2.4 kV
开断时间	2 ms
开关重复动作间隔时间	200 ms
开关消耗能量	20 MJ

在电源系统中，晶闸管开关将频繁动作，要求开关具有高的可靠性和长的寿命；同时托卡马克装置的等离子体电流是靠 12 套开关同时动作而共同产生一个综合高电压建立的，因此要求所有开关动作必须同时，这就要求开关开断时间短和分散性小，具有好的同步性。上述要求排除了我们使用一般机械开关的可能性，我们研发了如图 6 所示由晶闸管、二极管、电阻、电容、电感等组成的大功率开断双向直流电流晶闸管开关。这个新型双向直流晶闸管开关采用一条强迫换流支路实现了双向直流电流的关断。回路结构简单，设计较为巧妙，而且由于反并二极管 VD1、VD2 存在，消除了开关关断时的反向电压过冲。

在电源系统通过正向电流时，晶闸管 VT<sub>1</sub> 和 VD<sub>2</sub> 工作，导通晶闸管 VT<sub>3</sub> 就可以关断 VT<sub>1</sub>，使回路电流迅速转移到电阻上，开关关断；当电源系统通以负向电流时晶闸管 VT<sub>2</sub> 和 VD<sub>1</sub> 工作，导通晶

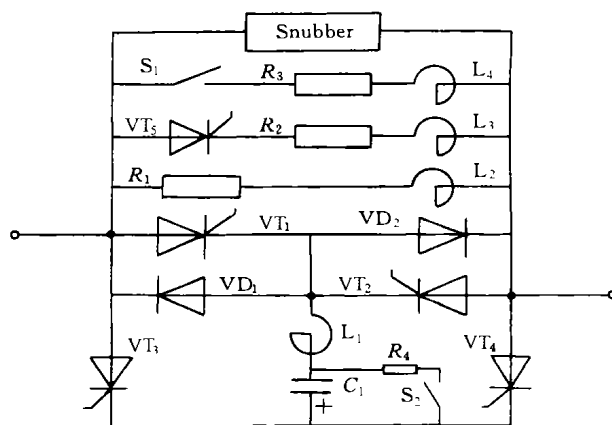


图 6 晶闸管开关原理电路图

Fig.6 The TDCB circuit

管 VT<sub>4</sub> 就可以关断 VT<sub>2</sub>，使回路电流迅速转移到电阻上。主晶闸管 VT<sub>1</sub> 或 VT<sub>2</sub> 关断是依靠预先充好电的电容 C<sub>1</sub> 通过 L<sub>1</sub> 放电，在主晶闸管上形成一个反向电流相互抵消，而使电流降为零，自然关断。

晶闸管开关重复关断频率和电容器再次充电有直接的关系。我们在充电机输出并联了一个反向二极管，和串联电感。在开关关断过程中电容器 C<sub>1</sub> 的能量通过电感 L<sub>1</sub> 振荡，在开关关断时，电容器电压将为负向电压，该电容器负向能量可以通过充电机回路和其电感振荡，快速将其电压反向。周期为 0.2s 左右。

开关通过 15kA 电流，我们使用 10 个 2.5kA/5.2kV 晶闸管并联，在并联时有两个问题必须考虑，一个就是大直流电流并联时，在每个晶闸管中的静态均流问题；另一个是所有晶闸管的动态均流问题，在电容器 C<sub>1</sub> 向所有主晶闸管快速放电时，每个晶闸管中电流必须迅速均匀下降直到零，如果所有并联的晶闸管中只要有一个电流下降不均匀，不能关断，整个开关关断失败，同时 15kA 电流还会从没有关断的一只晶闸管中流过，而烧坏开关。为了克服上述两个问题，我们采用一个大的圆盘，在其周围对称安装晶闸管和二极管，直流输入和输出从圆盘中间穿过。这种布置使各元器件在电路和空间上对称和均匀分布，每个元件支路长度相等、分布参数也相等，保证了动态和静态均流的效果。实验证明这种圆盘结构和一般柜式结构比较起来有非常好的优越性。整个圆盘通以冷却水。

保证开关关断的另一个条件是电容器放电回路的放电电流大小和放电周期。电容器 C<sub>1</sub> 和电感 L<sub>1</sub> 形成的放电电流必须大于晶闸管开关要关断的电流，才能保证通过晶闸管的电流形成自然过零点；

同时该电容器放电电流大于晶闸管开关关断电流的时间不能小于每个晶闸管关断时间和恢复时间。在工程设计中,考虑到晶闸管关断时间分散性、晶闸管和二极管每个支路的动态参数分布性,电容器放电电流和放电时间应该留有设计余地。电容器  $C_1$  和电感参数可以由式(1)给出<sup>[5]</sup>。

$$L = \frac{E_0 T}{2.6382 \times I_L} \quad (1)$$

$$C = \frac{T^2}{2.96 \times L}$$

式中  $L$ ——放电感  $L_1$   
 $C$ ——电容器  $C_1$   
 $E_0$ ——电容器充电电压  
 $I_L$ ——晶闸管开关关断电流  
 $T$ ——晶闸管的关断和恢复时间

和晶闸管开关并联的电阻网络的电感值对晶闸管关断也有较大的影响。我们使用不锈钢钢管,绕制时来回对折,以减小电阻中的电感,同时尽量减小电阻网络和晶闸管开关本体的距离。为了吸收开断时的瞬时过电压,开关两端的阻容吸收也是必要的。开关开断实验波形如图7所示。

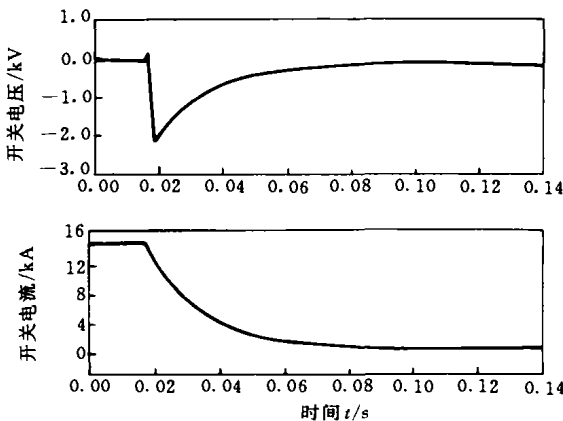


图7 晶闸管开关开断实验电流电压波形

Fig.7 The current and voltage curves during TDCB turn-off

#### 4 变流器和晶闸管开关控制系统<sup>[6]</sup>

由变流器和晶闸管开关组合的12套电源系统,具有模拟信号277路,数字信号657路,这些信号必须实时监控、测量和控制。我们根据信号的特性和功能,使用了三层计算机网络对整个系统进行控制。一层网络是由Windows平台构成,主要是完成人机交互和系统监控方面的功能,由7台PC计算机构成;第二层网络是高速实时应用层,它由8台Compact PCI组成,其中一台任务重的计算机使用双CPU,系统使用QNX分布式实时操作

系统,本台计算机各进程之间使用共享内存传递数据和信息,计算机之间采用高速透明的Qnet轻网络协议,进行数据和信息通信,各计算机之间保证1ms相互传递数据一次,为了保证计算机可靠性,各计算机装备有守护进程;第三层网络是现场总线、现场数据采集、工控计算机(IPC)组成,现场总线对要求不太快的状态和控制信号进行控制和采集,现场工控计算机采集现场总线速度不能满足要求的模拟量信号,所有信号都通过以太网传输到电源控制室的数据库。控制和保护系统如图8所示。

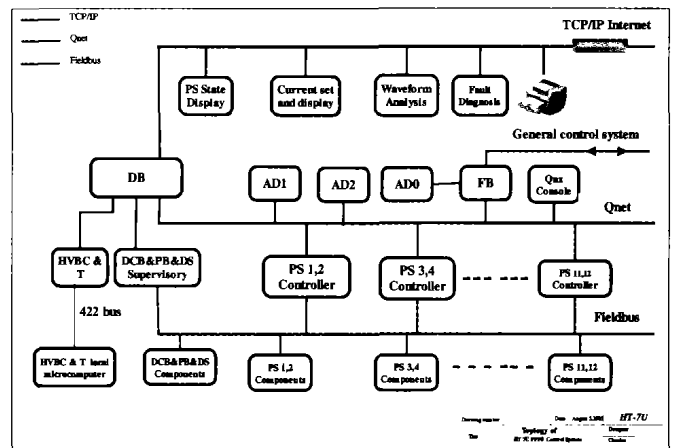


图8 变流器和晶闸管开关控制系统框图

Fig.8 Control system block of the converter and TDCB

#### 5 总结

变流系统和晶闸管开关系统在设计之前利用了ANSOFT公司的仿真软件Simplorer进行了计算和论证<sup>[7]</sup>。一套变流器和开关已经安装并进行了各项实验,已经得到了非常满意的实验结果。其他变流设备和晶闸管开关现已基本加工完成,正在现场安装。变流器实验电源见图9,部分四象限变流设备如图10所示。



图9 变流器和晶闸管开关实验电源

Fig.9 Test power supply for the converter and TDCB



图 10 大功率四象限变流器部分设备

### 参考文献

- 1 Bertolini E, et al. The JET magnet power supplies and plasma control systems. *Fusion Technology*, 1987, 11 (1): 71~119
- 2 Fu P, et al. Poloidal field power supply systems for the HT-7U steady-state superconducting tokamak. *Fusion Science and Technology*, 2002, 42 (7): 155~161
- 3 Benfatto I, et al. AC/DC converters for the ITER

poloidal system. *Proc. of the 16th SOFE, USA*, 1995, 658~661

- 4 Sihler C, Fu P, Huart M, et al. Paralleling of two large flywheel generation for the optimization of the ASDEX upgrade power supply. *21st Symposium on Fusion Technology. Madrid*: 2000
- 5 温家良. 高功率双向直流快速晶闸管开关的研究与开发及其在 HT-7U 超导托卡马克极向场电源系统中的应用: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2003
- 6 Fu Peng, et al. Development of plasma multivariable control model in HT-7 superconducting tokamak. *Fusion Science and Technology*, 2003, 43 (1): 38~44
- 7 SIMEC GmbH. *Simplorer. Version 4.2. Chemnitz*, 2000

### 作者简介

傅 鹏 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率电源及计算机控制技术。

高 格 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为大功率脉冲电源。

## 第八届全国永磁电机学术会议征文通知

近年来, 随着永磁材料的发展和性能的不不断提高, 特别是电力电子技术的进步, 使永磁电机的应用越来越广, 已深入到国民经济的各个重要领域。为了及时进行学术交流和探讨, 促进永磁电机和永磁材料的进一步开发和应用, 同时也为了适应企业提高产品质量、优化产品结构、增强自主开发能力的需要, 中国电工技术学会永磁电机专业委员会和全国稀土永磁电机协作网决定于 2004 年 11 月联合召开第八届全国永磁电机学术会议, 现将征文有关通知如下。

### 一、征文范围

1. 永磁电机国内外发展动态
2. 永磁电机科研成果、技术总结
3. 永磁电机设计计算及 CAD 技术
4. 永磁电机制造技术、关键工艺
5. 永磁电机测试及试验方法
6. 永磁电机可靠性研究
7. 永磁电机新产品研制成果和应用效益
8. 新型永磁材料及其在电机中的应用

### 二、征文要求

1. 论文应理论联系实际, 反映国内外先进水平。
2. 论文插图、表格、标注符号要符合国家标准, 文字要清楚, 按《电工技术学报》的征稿要求和打印格式, 用 word 文档排版, 全文不超过 4 页 (包括图表)。未选用论文不退稿, 请作者自留底稿。
3. 在国内外正式刊物发表过的论文, 不再征用。
4. 征文将聘请专家评审, 录用论文将编入会议论文集。
5. 来稿请用电子邮件传来, 或邮寄电子文档和激光打印稿 (勿折)。
6. 论文截止日期: 2004 年 9 月 30 日

联系地址: 沈阳市铁西区兴华南街 58 号沈阳工业大学特种电机研究所

邮政编码: 110023 电话和传真: (024) 25691651 E-mail: [tdssygd@mail.sy.ln.cn](mailto:tdssygd@mail.sy.ln.cn)

联系人: 胡素华