

EAST 托卡马克大功率双向直流快速晶闸管开关 可靠关断理论分析及参数优化设计

温家良¹, 傅鹏², 刘正之², 汤广福¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085;

2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽省 合肥市 230031)

THEORY ANALYSIS AND PARAMETERS OPTIMIZE DESIGN OF RELIABILITY TURN-OFF OF HIGH POWER DC BI-DIRECTIONAL DC FAST THYRISTOR SWITCH IN EAST TOKAMAK

WEN Jia-liang¹, FU Peng², LIU Zheng-zhi², TANG Guang-fu¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The high power bi-directional DC thyristor switch is one of key equipments of the poloidal field power supply system in EAST Super-conductive TOKAMAK. Forced commutation technology has been analyzed thoroughly, which is the base of DC thyristor switch. Firstly, the reliable turn-off criterion and optimized expressions of parameters have been derived. Then, the influence of distributing resistance has been emphasized during turn-off. At last, a series of tests result have been provided. All these work make sure development of high power bi-directional DC fast thyristor switch finished successfully.

KEY WORDS: Power electronics; Thyristor; DC switch; Forced commutation; Reliable turn-off; Optimize design

摘要: 对 EAST 托卡马克极向场电源系统的关键设备之一——大功率双向直流快速晶闸管开关的基本工作原理, 即强迫换流技术进行深入的理论分析, 得出直流晶闸管开关可靠关断理论判据。并在此基础上进行了参数的优化设计。最后对换流支路分布电阻对关断特性的影响进行了分析。所有这些工作为大功率双向直流快速晶闸管开关的研制成功提供了坚实的理论保证。

关键词: 电力电子; 晶闸管; 直流开关; 强迫换流; 可靠关断; 优化设计

1 引言

托卡马克是最有前途发展成为用来进行商用

发电的磁约束受控核聚变试验装置之一。目前国际上主要的发达国家都在竭力研究和发展这种试验装置, 从而根本解决人类的能源短缺问题。基于跟踪和发展现有托卡马克试验装置的相关工程技术, 和进行深入的理论研究与试验的需要, “EAST (原名 HT-7U) 超导托卡马克核聚变试验装置” 作为国家“九五”重大科学项目之一于 1998 年正是批准立项。

高功率电源系统作为托卡马克试验装置的重要组成部分, 包括纵场电源, 极向场电源, 等离子体快控电源^[1-2], 谐波抑制和无功补偿等子系统。极向场电源是其中规模最大的子系统, 它由 12 组独立可调的晶闸管相控变流器分别向 12 组相互耦合的极向场超导线圈供电, 并在每个回路中串联一台大功率双向直流快速晶闸管开关, 从而实现等离子体的产生、加热、平衡与控制。一套极向场电源系统的主电路如图 1 所示。超导磁体上的典型电流电压波形如图 2 所示。

晶闸管开关主要起到两大作用: 一是主回路达到预定电流后, 晶闸管开关迅速开断, 超导线圈电流快速转移到耗能电阻上并快速下降, 从而在托卡马克的环形真空室 (相当于变压器的二次绕组) 感应一定的环电压, 激发等离子体并使等离子体电流快速上升, 在等离子体电流达到一定值之后, 晶闸

管开关快速闭合,通过调节变流器的输出电压实现等离子体电流的磁约束;二是作为超导磁体失超的一级保护主开关。极向场电源系统负载是造价非常昂贵的大型超导磁体,一旦发生失超,晶闸管开关必须迅速开断,磁体储存的磁能迅速通过耗能电阻释放,否则超导磁体将被烧毁。爆炸开关 1 和 2 是超导磁体失超的后备保护^[3]。

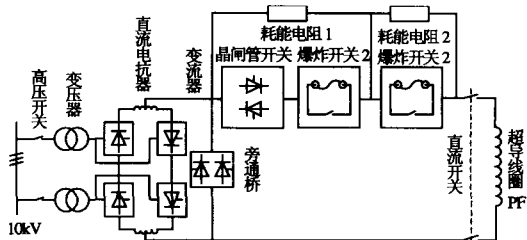


图 1 极向场电源系统主回路

Fig. 1 Poloidal Field Power Supply Circuit



图 2 超导磁体上典型电流电压波形

Fig. 2 Typical load current, voltage

2 大功率双向直流快速晶闸管开关简介

直流系统中,为实现线路开断,须建立一个人工零点,基于晶闸管器件直流开关电路如图 3。当直流电流很大时,基于晶闸管器件开关与基于可关断器件开关相比具有较高性能价格比优势。

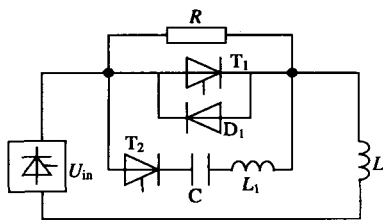


图 3 晶闸管直流开关主电路

Fig. 3 Circuit of thyristor DC switch

作为一种无触点、无噪声、寿命长、开闭迅速、维护方便的新型开关,晶闸管直流快速开关非常适合作为直流系统主开关。在国内外大型托卡马克装置中,如 TORUS SUPRA、RFX 等^[4-5],这种开关得到了广泛应用。图中电容 C 的电压是另外通过充电机给其充电来实现。

从图 2 看出,主回路电流是双向直流,因此直流晶闸管开关必须具有双向开通和双向强迫关断

的功能。双向直流快速晶闸管开关主电路方案如图 4 所示^[6]。

作为晶闸管直流开关的合理扩展,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 D_1 、 D_2 存在,消除了开关关断时的反向电压过冲。其内容见文献[3,7-11]。

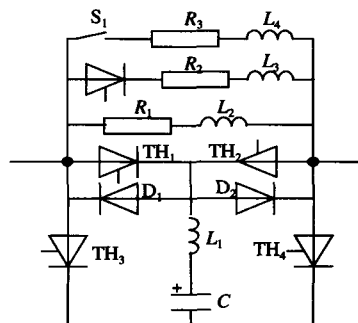


图 4 双向直流快速晶闸管开关电路

Fig. 4 Bi-directional Thyristor Switch Circuit

3 晶闸管直流开关可靠关断理论分析

由强迫关断原理可知,为保证晶闸管直流开关可靠关断,须满足以下 4 个条件:

(1) T_2 最大电流必须大于主回路电流与 T_1 反向恢复电流最大值之和,并有一定裕量;

(2) 在 T_1 反向恢复期间,必须给 T_1 施加一定的反向电压,且维持时间必须大于 T_1 固有关断时间,保证 T_1 恢复正向阻断能力;

(3) 为了保证晶闸管 T_1 、 T_2 的安全工作,晶闸管 T_1 、 T_2 的电流上升率不能大于晶闸管 T_1 、 T_2 的临界电流上升率;

(4) 为了保证晶闸管 T_1 、 T_2 的安全工作,晶闸管 T_1 、 T_2 的最大电压上升率不能大于其临界电压上升率。

设辅助晶闸管的电流临界上升率为 A , T_1 、 T_2 电流变化率安全工作系数为 $\xi = (di/dt)|_{\text{临界}} / (di/dt)|_{\text{min}}$, T_1 、 T_2 电压变化率安全工作系数为 $\gamma = (di/dt)|_{\text{临界}} / (di/dt)|_{\text{min}}$, T_2 电流系数为 $\eta = T_{r2} / (I_{L\text{max}} - I_{rrm} T_q)$, T_1 可靠关断时间系数为 $\delta = T_{rr} / T_q$, 从而可得

$$\begin{cases} -E_0 \sqrt{C/L_1} = \eta \times I_L \\ L_1 = -\xi \times E_0 / A \\ C = (\gamma \times I_L) / B \\ \sqrt{L_1 C} [\pi - 2 \arcsin(-I_L / E_0 \sqrt{L_1 / C})] = \delta \times t_q \end{cases} \quad (1)$$

化简后得

$$\begin{cases} E_0 = \frac{\delta \times t_q \times \eta \times B}{[\pi - 2 \times \arcsin(1/\eta)] \times \gamma} \\ C = (\gamma \times L) / B \\ L_1 = \frac{\xi \times \delta \times t_q \times \eta \times B}{A \times \gamma \times [\pi - 2 \times \arcsin(1/\eta)]} \end{cases} \quad (2)$$

这个公式是进行设计时正确确定电感电容和充电电压参数的基本依据。而晶闸管开关可靠关断的最根本因素是 T_2 电流大于负载电流部分的维持时间，即二极管导通时间必须大于 T_1 固有关断时间。因此对于式(3)要重点进行研究分析。

$$t_{RR} = \sqrt{L_1 \times C} [\pi - 2 \arcsin(-I_L / E_0 \sqrt{L_1 / C})] \quad (3)$$

图5显示了当负载电流为15kA，充电电压为2.4kV，电容分别为6mF、8mF、10mF、12mF时电感对二极管导通时间的影响。

图6显示了电容12mF、负载电流15kA、充电电压分别为1.8kV、2kV、2.2kV、2.4kV时电感对二极管导通时间的影响。

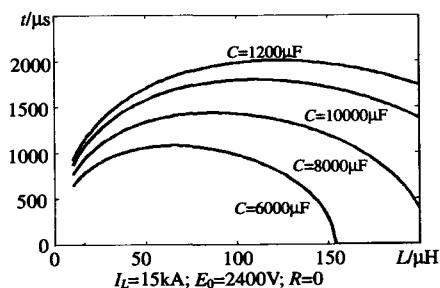


图5 电感与电容变化对二极管导通时间影响
Fig. 5 Turn-on time of diode with different capacitor and inductance

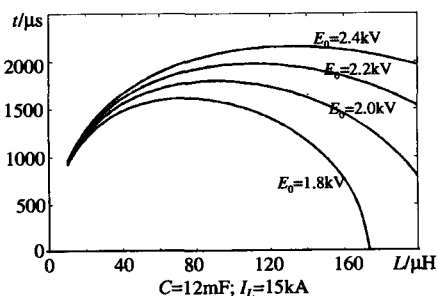


图6 充电电压和电感变化对二极管导通时间影响
Fig. 6 Turn-on time of diode with different capacitor voltage and inductance

由图5和图6波形，可以得出如下结论：

- (1) 随着电容、充电电压的增大，二极管导通时间明显增大；
- (2) 对于每一个电容值或充电电压，存在一个电感值使其可达到最大反向二极管导通时间；

(3) 随着电容或充电电压增大，这个电感值也应适当增大。

(4) 在不增加充电机造价和影响系统安全的情况下，应尽量提高充电机输出电压，这样不仅可以降低电容量和造价，而且可以提高关断速度。

4 晶闸管直流开关参数优化与设计

由上节分析可知，对于一定的关断电流和关断电压，电容、电容充电电压及电感参数的选取虽然根据可靠关断判据(2)即可确定，但不一定是最优的一组参数组合。

可以看出，要用最小的电容储能实现所要求的二极管导通时间，从而实现可靠关断，式(3)必须满足以下条件：

$$t = \sqrt{L \times C} [\pi - 2 \arcsin(I_L / U_0 \sqrt{L/C})] \quad dt/dL = 0 \quad (4)$$

由上式得到的参数，其反并二极管导通时间最大，假设为 T 。对上式进行推导，从而得到关于 C 的表达式

$$C = \frac{I_L^2 \times T^2 \times L}{E_0^2 \times T^2 - 4 \times I_L^2 \times L^2} \quad (5)$$

将 C 的表达式带入式(4)，并令 $X = (T^2 \times U_0^2) / (4I_L^2 \times L^2)$ ，可得

$$\sqrt{X-1} = \pi/2 - \arcsin(\sqrt{1-1/X}) \quad (6)$$

通过数值解法可得

$$X \approx 1.74 \quad (7)$$

从而可以得到

$$\begin{cases} L = E_0 T / (2.6382 \times I_L) \\ C = T^2 / (2.96 \times L) \end{cases} \quad (8)$$

假定 $T=2\text{ms}$ ， $E_0=2.4\text{kV}$ ， $I_L=15\text{kA}$ ，可以算出 $L=121\mu\text{H}$ ， $C=11.168\text{mF}$ 。通过图7中所示，可以看出电感在 $121\mu\text{H}$ 时，二极管的导通时间最大，且达到了 2ms ，与优化公式计算的结果一致。

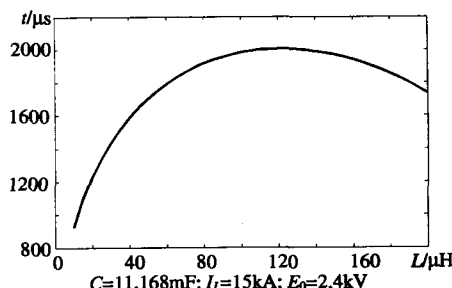


图7 固定电容、充电电压和负载电流时电感对二极管导通时间影响之一

Fig. 7 Relation between inductance and turn-on time of diode

可以看出，式(8)得出的参数使晶闸管开关中二极管

的导通时间始终处在最大值 2ms, 在特定的充电电压下, 所用电容最少。参数优化设计式(8)对工程设计极具指导意义, 使晶闸管直流开关的设计、造价和运行得到了优化。

5 分布电阻对关断可靠性影响分析

由于强迫换流电路中总是存在一定的电阻值, 它对放电波形总是存在一定的影响。当电阻较大时, 甚至有可能使晶闸管无法实现关断功能, 因此完全有必要进行其对关断特性影响的分析。根据电容振荡放电的电流计算公式

$$i = U_0 / \omega L \cdot e^{-\delta t} \sin \alpha t \quad (9)$$

通过编程计算电阻变化对放电电流在 15kA 以上维持时间的影响。如图 8 所示曲线是电感 130μH, 电容 12mF, 充电电压 2.4kV, 关断电流 15kA 情况下, 电阻从零增大到 65mΩ与二极管导通时间的关系曲线。可以看出电阻对二极管导通时间的影响较为明显, 为此, 应尽量减少强迫换流回路中电感、母排及其它元件的电阻, 保证足够的二极管导通时间, 确保晶闸管开关可靠关断。

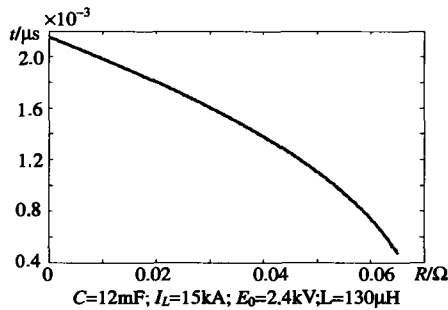


图 8 强迫换流电路电阻对二极管导通时间影响分析
Fig. 8 Relation between resistance and turn-on time of diode

6 试验结果

在进行晶闸管开关的关断试验之前, 必须强迫换流回路的放电波形进行调试, 使得强迫换流回路的放电波形、幅值、15kA 以上的维持时间满足设计要求。这是保证晶闸管开关嫩构可靠关断的必要前提。在经过改造之后, 电容放电波形如图 9 所示。

可以看出, 当电容充电电压为 2.4kV, 回路电阻减小为 25mΩ, 由于充电电压增加, 15kA 以上电流维持时间也增加至 1.9ms 左右, 可以保证主晶闸管 TH₁、TH₂ 的可靠关断。强迫换流回路改进过程中, 主要参数调试及测量结果如表 1 示。由表 1 可以看出, 经过改造后的强迫换流回路振荡参数可以确保主晶闸管 TH₁、TH₂ 的可靠关断, 而且回路参

数与前面各节的分析非常吻合, 从而验证了可靠关断理论分析和参数优化设计的正确性, 并保证了关断试验的顺利完成。

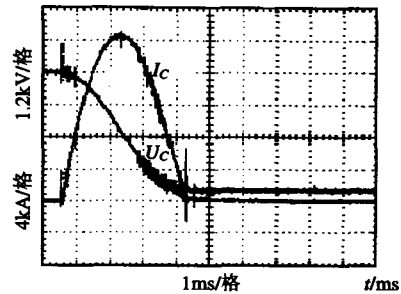


图 9 充电电压 2400V 时电容放电波形

Fig. 9 Discharge of capacitor with 2.4kV

表 1 强迫换流回路主要参数调试及测量结果
Tab.1 Debug results of parameters in the forced commutation circuit

序号	充电电压/kV	换流电容/mF	换流回路电感/μH	换流回路电阻/mΩ	大于 15kA 维持时间/ms
1	2.4	12.9	113	60	1
2	2.1	12.9	113	25	1.5
3	2.4	12.9	113	25	1.9

晶闸管双向直流快速开关在进行开通与关断试验时, 主晶闸管 TH₁ 上的电流 I_{TH1}, 电容上的电压 U_C, 振荡电流 I_C, 开关两端电压 U_{sw} 的波形如图 10 所示: 晶闸管开关完全关断瞬时, 晶闸管开关的电流电压试验波形如图 11 所示:

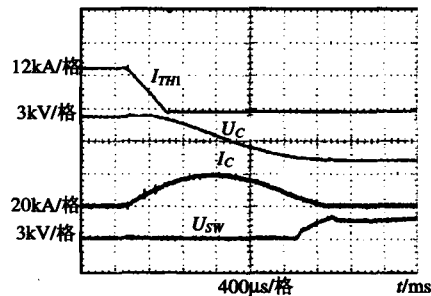


图 10 晶闸管开关关断时各参数波形

Fig. 10 I_{TH1}, I_C, U_C, U_{sw} waveforms during turn-off

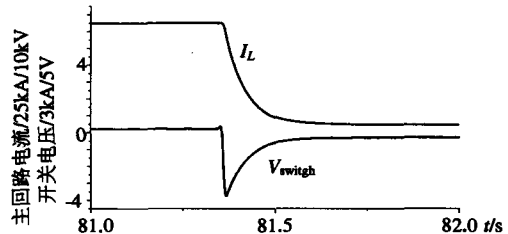


图 11 晶闸管开关关断时的电流电压波形

Fig. 11 Current and voltage waveform during thyristor switch turn-off

从上两图可以看出, 晶闸管开关实现了直流电流的快速关断功能, 关断电流达 15kA 以上, 关断后的开关端电压达到 2.4kV, 关断时间约 2.5ms 左

右, 满足了系统的要求。

在进行超导磁体试验时, 超导磁体上的电流波形如图 12 所示。

由图 12 可以看出, 晶闸管开关双向了双向快速开通, 及单方向关断功能, 而且关断电流达到 16kA 以上, 从而证明了晶闸管开关优越的性能。图 13 中负载电感上的电流波形则证明了晶闸管开关的双向关断性能。

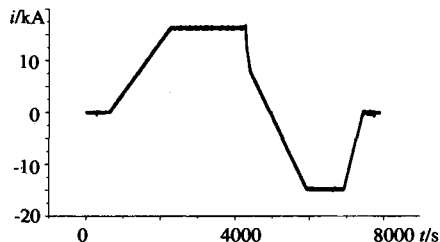


图 12 超导磁体上的电流波形

Fig. 12 Super-conductive magnet current waveform

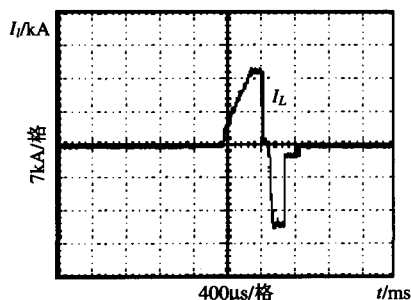


图 13 晶闸管开关双向开通与关断试验负载电感电流波形

Fig. 13 Current waveform on load inductance during bi-directional turn-on and turn-off

由这些试验波形可以看出, 大功率双向直流快速晶闸管开关实现了双向直流电流的快速开通与关断, 满足了系统的要求, 且关断迅速, 关断电流达到 16kA 以上。且试验中没有发生过关断失败和重燃等现象。

7 结论

通过直流晶闸管可靠关断理论分析、参数优化设计及换流回路分布电阻对关断特性的分析等诸多分析工作, 为 EAST 托卡马克大功率双向直流快速晶闸管开关的开发成功奠定了坚实的理论基础。试验结果充分证明了这些理论分析的正确性。为提高晶闸管开关的关断速度和关断可靠性, 还需要从以下几个方面来进行必要的工作。

(1) 尽量选择存储电荷少且一致的晶闸管来进行主晶闸管 TH₁、TH₂ 的并联;

(2) 对主晶闸管和反向并联的二极管应采用

同轴环形排列方式, 直径尽量小, 降低并联杂散电感及其分散性;

(3) 强迫换流回路电阻应尽可能减少;

(4) 适当提高充电电压既可减少电容和电感, 又提高了关断速度, 同时对提高 12 台晶闸管开关关断同时性也有利。

目前, 12 台晶闸管开关已经完成全部的研制工作, 并进入安装调试工作。同时作为等离子体物理研究所低温超导磁体试验装备中重要设备之一, 为低温超导磁体研制工作的顺利进行发挥了不可替代的作用。

参考文献

- [1] 张兴, 季建强, 余勇, 等. 电流型 PWM 整流器低电压应力空间矢量 PWM (SVPWM) 研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 144-149.
Zhang Xing, Ji Jianqiang, Yu Yong *et al.* Study of low voltage stress space vector PWM control for current source PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 144-149.
- [2] 程荣仓, 刘正之. 大容量单相逆变装置并联技术的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 112-116.
Cheng Rongcang, Liu Zhengzhi. Analysis of parallel single-phase inverters of large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 112-116.
- [3] 温家良, 傅鹏, 刘正之, 等. HT-7U 托卡马克高功率双向直流快速晶闸管开关的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 49-53.
Wen Jiali, Fu Peng, Liu Zhengzhi *et al.* Development of high power bi-directional DC fast thyristor switch in HT-7U TOKAMAK [J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(14): 49-53.
- [4] De Lorenzi A, Taddia G, Tiego V. Design and tests the 50kA-18kV thyristor making switches for rfx experiment [C]. Proceedings of the 21st Symposium on Fusion Technology, Madrid, Fusion Engineering and Design, 2000. 23-27.
- [5] Kuchinski V, Mikhailov N, Soikin V. High-power fast switch [C]. IPEC. Yokohama, 1995. 899-903.
- [6] 傅鹏, 温家良. 晶闸管高压交流开关[P]. 中国专利, 012454079, 2002-09-18.
Fu Peng, Wen Jiali. Thyristor high voltage ac switch[P]. Chinese Patent, 012454079, 2002-09-18.
- [7] 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[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所.
Wen Jiali. Research and development of high-power bi-directional dc thyristor fast switch and its application in poloidal-field power supply system of HT-7U super-conductive TOKAMAK[D]. Institute of Plasma Physics, Hefei: Chinese Academy of Sciences.
- [8] 邹刚, 陈祥训, 郑健超. 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 1-5.
Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao. Macro-model of thyristor for transient analysis in power electronic system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 1-5.
- [9] 邹刚, 陈祥训, 郑健超. 一种微观—宏观相结合的晶闸管 PSPICE 模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 6-10.

- Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao. Micro-macro PSPICE Model of Thyristor[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 6-10.
- [10] 温家良, 刘正之, 傅鹏. 一种简化晶闸管宏模型及其在暂态分析中的应用[J]. 电力电子技术, 2002, 36(2): 66-68.
- Wen Jialiang, Liu Zhengzhi, Fu Peng. A simplified macro-model of thyristor and its application in the transient analysis[J]. Power Electronics, 2002, 36(2): 66-68.
- [11] 赵中原, 邱毓昌, 于永明, 等. 用晶闸管宏模型分析换流阀内电压分布特性[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 33-36.
- Zhao Zhongyuan, Qiu Yuchang, Yu Yongming *et al.* Analysis of

voltage distribution in HVDC converter valve by macro-model of thyristor[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 33-36.

收稿日期: 2005-01-10.

作者简介:

温家良 (1970-), 男, 在站博士后, 从事电力电子技术研究工作;
傅鹏 (1963-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事高功率脉冲电源技术及控制研究工作。

关于召开第十届全国电工数学学术年会的通知

由中国电机工程学会电工数学专委会主办的“第十届全国电工数学学术年会”, 定于 2005 年 8 月 10 日至 14 日在吉林省延边开元酒店召开。欢迎全国广大专家、学者、科技和教育工作者参加本次学术年会。

一、会议内容

- 1、召开中国电机工程学会电工数学专委会四届四次全委会, 讨论布置下届年会工作计划
- 2、邀请中国电机工程学会有关领导到会讲话
- 3、召开学术年会
- 4、组织与会代表讨论
- 5、组织与会代表参观

二、会议时间安排: 2005 年 8 月 10 日全天报道, 11 日~14 日开会

三、会议地点延边开元酒店。路线: 火车站乘公交 49 路到酒店下车; 或打车直接到开元酒店 (车费不超过 10 元人民币); 机场乘公交 28 路到德意楼站下车, 走 100 米到开元酒店, 打车车费不超过 20 元; 请各位代表自行前往。

四、会议费用: 与会人员每人交会务费 300 元, 论文作者交论文版面费 300 元/篇; 费用报道时交纳。会议食宿统一安排, 费用自理。

五、会议回执: 各位委员、代表、论文作者接到通知后请将回执于 7 月 27 日前用电话、传真、或 E-mail 等形式通知东北电力学院科研处

联系电话: 0432-4806324、4806217

传真: 0432-4883102

E-mail: cj@cseem.org或 cjy@mail.neiep.edu.cn

联系人: 曹娟 13843226378

张磊 13843226788

中国电机工程学会电工数学专委会

2005 年 7 月 15 日