

# HT-7U 托卡马克高功率双向直流快速晶闸管开关的研制

温家良, 傅 鹏, 刘正之, 汤伦军, 王林森  
(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽省合肥市 230031)

**摘要:** 针对 HT-7U 超导托卡马克极向场电源系统要求设计了一种新型高功率双向直流快速晶闸管开关, 通过原理分析得到了可靠关断条件, 给出了新型晶闸管开关的设计方案, 并对方案进行了试验和仿真, 结果均验证了原理分析和方案设计的正确性, 且消除了强迫关断时过高的反向电压。

**关键词:** 晶闸管; 双向直流开关; 托卡马克; 关断条件

**中图分类号:** TM56; TN34

## 0 引言

“HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置”是磁约束受控核聚变装置中最有发展前景的一种试验装置, 它由环形真空室、纵场磁体、极向场磁体、高功率电源系统、加热系统、等离子体诊断系统、反馈控制系统、供气及送料系统及机械支架系统等部件构成。电源系统通过对极向场和纵场线圈提供强大电流所产生的磁场或磁场变化来实现在环形真空室中等离子体电流的产生、约束和控制, 并借助其他辅助手段提高等离子体温度和密度, 进而最终实现可控的聚变反应, 从而为人类和平利用聚变能(如发电)创造一种可行的技术途径<sup>[1]</sup>。

高功率电源系统作为其重要组成部分, 包括纵场电源、极向场电源、等离子体快控电源、谐波抑制和无功补偿等。极向场电源系统由 12 组独立可调的晶闸管相控变流器组成, 分别向 12 组相互耦合的极向场超导线圈供电, 实现等离子体的产生、加热、平衡与控制。在等离子体电流的快上升阶段, 要求线圈中的电流快速变化, 在大型托卡马克装置中, 一般采用开关换流的方法来实现。

晶闸管直流高压快速开关是电力电子技术和电力半导体器件迅速发展的产物, 是一种无触点、无噪声、寿命长、开闭迅速、维护方便的新型开关, 是电源中需频繁操作的主开关的理想选择<sup>[2]</sup>。在国内外大型托卡马克装置中得到了广泛应用, 如 TORUS SUPRA, RFX<sup>[3]</sup>等装置。随着托卡马克装置规模的增大, 一些新型的开关装置已在开发之中, 如 ITER 就采用了晶闸管开关和机械开关组合的复合开关, 其开断容量达 50 kA/20 kV<sup>[4]</sup>。但是, 若在托卡马

克装置中采用传统的晶闸管开关设计方案, 会在开关两端出现很高的反向电压, 这对于开关本身和整个极向场电源系统都是不利的。为此, 本文提出了一种新型高功率双向晶闸管直流高压快速开关的设计方案。采用该方案可快速实现双向关断能力, 具有结构巧妙、简单, 造价低廉, 关断时反向电压低等优点, 完全可以满足系统的要求。

## 1 HT-7U 极向场电源系统

HT-7U 托卡马克装置采用超导线圈作为纵场和极向场线圈, 其中极向场线圈最大电流为双向 15 kA, 磁体承受最大电压 5 kV, 极向场电源系统采用高功率双向晶闸管直流高压快速开关作为主开关, 以爆炸开关作为后备开关。极向场电源系统作为其重要部分, 它的主回路如图 1 所示。该回路由 2 台变压器、4 台反并联整流器、1 台晶闸管快速开关、2 台爆炸开关组成, 其负载为超导磁体。

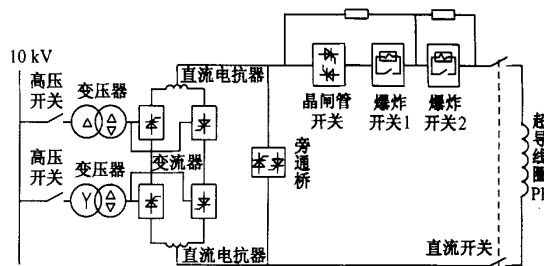


图 1 HT-7U 极向场电源系统的主回路  
Fig. 1 Circuit of HT-7U poloidal field power supply system

主回路电流典型波形如图 2 所示, 其工作过程为:

- a. 整流器通过闭合的晶闸管开关对极向场线圈供电, 线圈电流上升;
- b. 当线圈电流达到预定值后, 晶闸管开关快速

收稿日期: 2002-10-29; 修回日期: 2002-12-29。  
国家“九五”重大科学工程项目((1998)1303)。

关断,电流从其并联的耗能电阻支路流过,线圈电流快速下降;

c. 等离子体电流快速上升阶段要求开关换流后电压能够实现可调节,为此,在换流后一经过定时间,通过一个开关的闭合动作再投入一条并联的电阻支路,实现耗能电阻支路的阻值减低和换流电压的调节;

d. 在等离子体电流进入平顶段后,极向场线圈只需要提供低电压来实现等离子体的控制,为此,晶闸管开关快速闭合,同时整流器进入逆变状态,直至电流过零;

e. 反并整流器此时开始为线圈反向供电,从而延长了等离子体电流的维持时间;

f. 当反并整流器达到预定值后开始逆变,线圈退磁,系统退出运行。

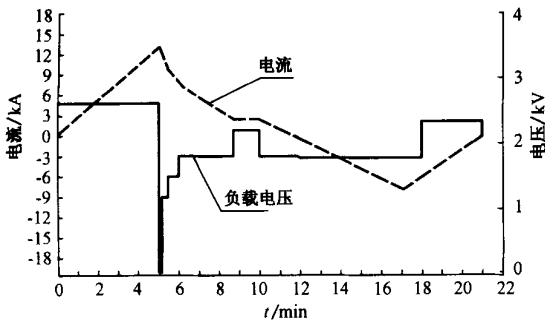


图2 极向场典型电流、电压波形  
Fig. 2 Waveforms of current and voltage in poloidal field coil

## 2 新型晶闸管开关的设计方案

在直流系统中,为实现线路开断,必须建立一个人工电流零点。转移原理是实现直流开断的有效方法之一<sup>[5]</sup>,晶闸管直流开关正是应用了这个原理,如图3所示。

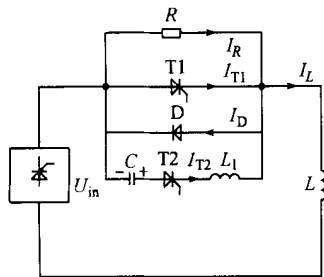


图3 晶闸管直流开关原理  
Fig. 3 Principle circuit of thyristor switch

其工作过程可分为以下几个阶段(换流电容 C 已预充电):

a. 导通 T1,  $U_{in}$  给 L 充电,主回路电流  $I_L$  增

长,电流关系为:

$$\begin{cases} I_L = I_{T1} \\ I_{T2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

b. 导通 T2, C 放电,放电电流  $I_{T2}$  强迫  $I_{T1}$  减小至 0,  $I_L$  不变,电流关系为:

$$\begin{cases} I_L = I_{T2} + I_{T1} \\ I_L = \text{const} \end{cases} \quad (2)$$

c. T1 关断,  $I_{T2}$  部分从 D 上流过 ( $I_D$ ), 电流关系为:

$$\begin{cases} I_{T2} = I_L + I_D \\ I_{T1} = 0 \\ I_L = \text{const} \end{cases} \quad (3)$$

d.  $I_{T2} < I_L$  后,  $I_L$  从 R 上分流, 电流关系为:

$$\begin{cases} I_L = I_{T2} + I_R \\ I_{T1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

e. T2 关断,  $I_L$  完全在 R 上通过, 电流关系为:

$$I_L = I_R \quad (5)$$

显然,为保证晶闸管直流开关的可靠关断,必须满足以下几个条件: T2 上最大电流必须大于主回路电流,并有一定裕量; T1 反向恢复期间,反向电压维持时间必须大于其关断时间; T1, T2 的最大电流上升率不能大于其临界电流上升率; T1, T2 的最大电压上升率不能大于其临界电压上升率。

通过电路分析及关断条件,并设晶闸管 T1 与 T2 的电流安全工作系数为  $\lambda$ 、电压安全工作系数为  $\mu$ , T2 的电流系数为  $\lambda_2$ , T1 的可靠关断系数为  $\mu_1$ , 联立得:

$$\begin{cases} -E_0 \sqrt{\frac{C}{L_1}} = I_L \\ L_1 = -\frac{E_0}{A} \\ C = \frac{I_L}{B} \\ \sqrt{L_1} C \left[ -2\arcsin \left( -\frac{I_L}{E_0} \sqrt{\frac{L_1}{C}} \right) \right] = t_q \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\frac{(di/dt)|_{\text{临界}}}{(di/dt)|_{\text{max}}} = \frac{I_{T2}|_{\text{max}}}{I_L - I_{rrm}}$   
 $\frac{T_{rr}}{T_q} \quad r = \frac{(dv/dt)|_{\text{临界}}}{(dv/dt)|_{\text{max}}}$

化简得:

$$\begin{cases} E_0 = \frac{t_q B}{\left[ -2\arcsin \frac{1}{\lambda} \right]} \\ C = \frac{I_L}{B} \\ L_1 = \frac{t_q B}{A \left[ -2\arcsin \frac{1}{\lambda} \right]} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)是进行方案设计时正确确定电感、电容和充电电压参数的基本依据。

当然,没有反并二极管 D,同样可以实现关断功能,但在关断时, T1 上会出现很大的反向恢复电流,且开关两端会出现很高的反向电压,这对于开关本身和整个极向场电源系统都是不利的。

由于极向场电源系统主回路电流是双向的,它要求晶闸管开关必须设计成双向导通、双向关断。因此对图 3 所示电路进行适当扩展,得到如图 4 所示的高功率双向晶闸管直流高压快速开关的设计方案<sup>[6,7]</sup>。

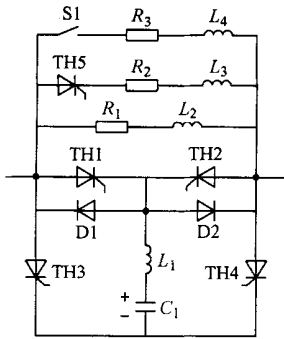


图 4 双向晶闸管开关方案

Fig. 4 Circuit of bi-directional thyristor switch

图 4 所示方案中 TH5, R<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 支路和 S<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>, L<sub>4</sub> 支路分别是二级和三级耗能支路。二级耗能支路用来实现等离子体快上升阶段的电压调节,三级耗能支路用来在超导磁体失超时降低二级耗能支路中电流负荷,实现可靠的失超保护。

方案中:TH1 ~ TH5 均采用 5.3 kV/2.5 kA 的 4 英寸晶闸管;TH1, TH2 各采用 9 只并联;TH3, TH4 各采用两并两串,以提高触发可靠性;TH5 采用 2 只并联;D1, D2 均各采用 9 只 3 kA/5.2 kV 二极管并联。

换流电阻 R<sub>1</sub> 在开关换流后要求产生最高 2.4 kV 的电压,因此,电阻值为 0.16 (2 400/15 000)。

R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> 也是取值 0.16,均要求可调,以便于试验调试。

换流电容的充电电压的选取根据开关关断后耗能电阻上产生的最大电压来确定,所以选择 2.4 kV。

电容量的确定由式(8)得出,在此 I<sub>L</sub> 是所需关断最大电流 15 kA, t<sub>q</sub> 是晶闸管关断时间,一般为 200 μs,由于晶闸管反并二极管后,其关断时间大大延长,为保证晶闸管开关可靠关断,系数 与 的选择非常重要,越大越好。但是为降低系统造价,提高

可靠性,一般不会取得太大,在此取 1.67;而可以取较大值,在此取 11。

$$C = \frac{-t_q I_L}{-2 \arcsin \frac{1}{11}} E_0 = 12\,372 \mu\text{F} \quad (8)$$

实际取值 12 mF,而辅助关断回路中的最大电流值约为 25 kA。

换流电容的额定电压值取为 3 kV,可以满足系统的要求。

换流电感值由下式确定:

$$L = \frac{CU^2}{I^2} = 110 \mu\text{H} \quad (9)$$

强迫环流支路通过反并二极管的时间可用下式计算:

$$T_D = \sqrt{L_1 C} \left[ -2 \arcsin \left( \frac{I_L}{E_0 \sqrt{L_1 C}} \right) \right] = 2.133 \text{ ms} \quad (10)$$

可见,主晶闸管低反压维持时间远高于晶闸管的关断时间,可以保证主晶闸管在承受正向电压之前恢复阻断能力,确保晶闸管开关可靠关断。

### 3 仿真结果

我们对上述方案进行了仿真,晶闸管开关正反向开通、关断和整流器双向调制电流的主回路仿真波形如图 5 所示。

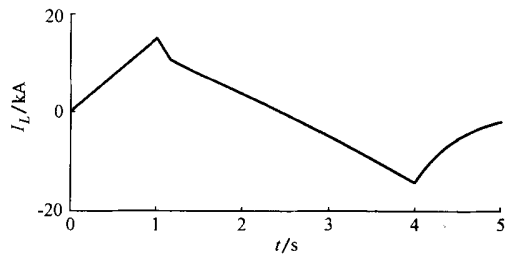


图 5 主回路电流仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of current in load coil

负载电感两端的电压仿真波形如图 6 所示。

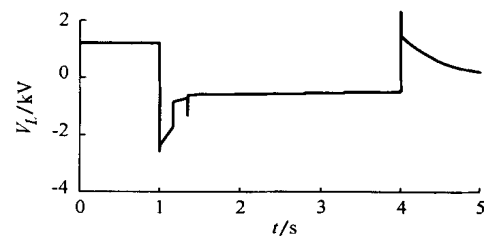


图 6 负载两端电压仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of voltage on load coil

主晶闸管 TH1, TH2 开通与关断的电流仿真波形如图 7 所示。

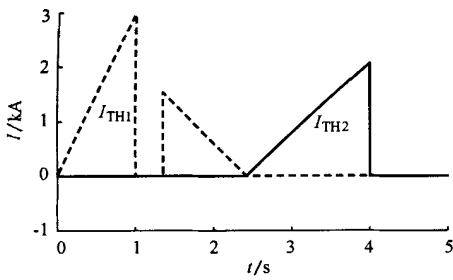


图7 主晶闸管开通与关断的电流仿真波形  
Fig.7 Simulation waveforms of current in main thyristors TH1 and TH2

主晶闸管关断瞬时其与换流电容的电流、电压及耗能电阻  $R_1$  上的电压的仿真波形如图8所示。

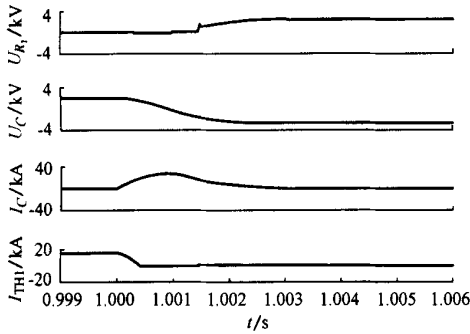


图8 关断瞬时  $I_{TH1}$ ,  $I_C$ ,  $U_C$ ,  $U_{R1}$  波形  
Fig.8  $I_{TH1}$ ,  $I_C$ ,  $U_C$ ,  $U_{R1}$  simulation waveforms during turn-off

由以上仿真结果可以看出,该方案实现了晶闸管开关的可靠关断,关断后负载两端会产生高压,关断时晶闸管的反向恢复电流很小,且没有很高的反向电压,完全满足系统要求。

#### 4 试验结果

通过试验,得到了晶闸管开关试验的部分结果。

图9所示为主晶闸管 TH1 在关断时的电流及两端电压波形、电容电压在开关关断期间的变化波形及电容电流波形。可以看出,晶闸管 TH1 被可靠关断,且反向恢复电流极小,在晶闸管两端没有出现很高的反向电压。

晶闸管开关开通与关断时开关两端的电压波形如图10所示。可以看出,晶闸管开关关断后,负载电感电流转移至电阻上泄放,从而在开关两端产生了一个较高的电压。

晶闸管开关开通与关断时主回路电流波形如图11所示。可以看出,晶闸管开关关断后,负载电感电流在电阻上泄放,并迅速下降。

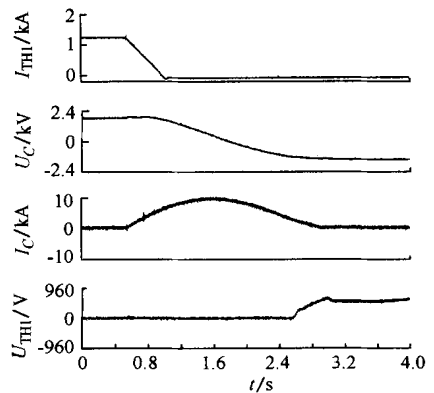


图9 晶闸管开关关断时各参数波形  
Fig.9  $I_{TH1}$ ,  $I_C$ ,  $U_C$ ,  $U_{TH1}$  experiment waveforms during turn-off

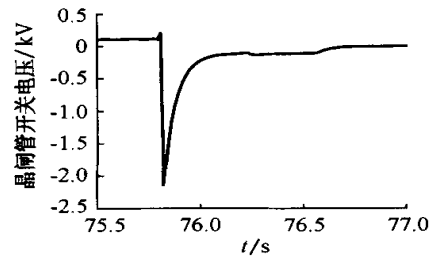


图10 晶闸管开关开通与关断时端电压波形  
Fig.10 Experiment waveform of voltage on thyristor switch

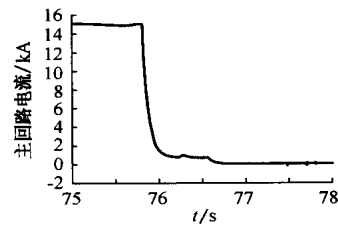


图11 主回路电流波形  
Fig.11 Current experiment waveform in load coil

#### 5 结语

本文论述了晶闸管直流开关关断原理,得出了可靠关断的条件,给出了方案设计,基于仿真结果所确定的高功率双向晶闸管直流高压快速开关方案具有拓扑简单、巧妙等优点。试验证明本方案实现了可靠关断,有利于 HT-7U 的顺利建成。

#### 参考文献

- 1 石秉仁 (Shi Bingren). 磁约束聚变原理与实践 (Magnetic Confinement Theory and Experiment). 北京:原子能出版社 (Beijing:Atomic Energy Publishing House), 1999
- 2 Liu Z Z, Xu J Z, Fu P, et al. The Design of Power Supply System of HT-7U Superconductive TOKAMAK. In: Proceedings of the 21st Symposium on Fusion Technology. Madrid: Fusion Engineering and Design, 2000. 75 ~ 78

3 De Lorenzi A, Taddia G, Teigo V. Design and Tests the 50 kA-18 kV Thyristor Making Switches for the RFX Experiment. In: Proceedings of the 21st Symposium on Fusion Technology. Madrid: Fusion Engineering and Design, 2000. 23 ~ 27

4 Kuchinski V, Mikhailov N, Soikin V. High-power Fast Switches. In: IPEC. Yokohama: 1995. 899 ~ 903

5 李天和 (Li Tianhe). 大功率开关装置的物理基础与工程应用 (Physics Basis and Engineer Application of High Power Switch Device). 北京: 电力工业出版社 (Beijing: Electrical Power Industry Publishing House), 1982

6 傅鹏, 温家良 (Fu Peng, Wen Jialiang). 晶闸管高压交流开关 (Thyristor High Voltage AC Switch). 中国专利 (Chinese Patent),

012454079. 2002-09-18

7 刘正之, 温家良 (Liu Zhengzhi, Wen Jialiang). 晶闸管交流高压开关 (Thyristor AC High Voltage Switch). 中国专利 (Chinese Patent), 012454087. 2002-05-08

温家良 (1970 →), 男, 博士研究生, 从事高功率脉冲电源技术研究工作。E-mail: wenjl@epri.oc.cn

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。

刘正之 (1943 →), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事高功率脉冲电源技术研究工作。

### DEVELOPMENT OF HIGH POWER BIDIRECTIONAL DC FAST THYRISTOR SWITCH IN HF-7U TOKAMAK

Wen Jialiang, Fu Peng, Liu Zhengzhi, Tang Lunjun, Wang Linsen  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Based on the requirement of poloidal field power supply system in HT-7U super-conductive TOKAMAK, this paper presents the design of a new type of bi-directional DC fast thyristor switch, and discusses its principle, design plan, simulation and experiment. Through the principle analysis, reliability turroff criterion is derived. The results of simulation and experiment all validate the principle and design plan. This kind of switch can operate turroff function without reverse voltage.

This work is supported by National Ninth Mega-Project of Science Research (No. (1998) 1303).

**Key words:** thyristor; bi-directional DC switch; TOKAMAK; turroff criterion

(上接第 22 页 continued from page 22)

最后, 式(A4)可写为:

$$F_{PTDF, l} P = \sum_i \left( \sum_{l \in G_l} F_{PTDF, l-ij} P_i + \sum_{k=1}^K \left[ \sum_i \left( \sum_{l \in G_l} F_{PTDF, l-i, k} P_{i, k} \right) \right] \right) \quad (A6)$$

式(A6)也可表示为矩阵形式。式(A6)代入式(14), 可得到实际使用的计算公式。

张永平 (1976 →), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行及电力市场。E-mail: zyp99@mails.tsinghua.edu.cn

焦连伟 (1969 →), 男, 博士, 研究方向为电力系统分析与控制、电能质量和电力市场。

倪以信 (1946 →), 女, 副教授, 研究方向为控制理论、优化方法、人工智能技术和电力电子技术在电力系统中的应用及电力市场。

### A PRACTICAL APPROACH FOR INTER-REGIONAL BILATERAL CONTRACTS CONGESTION MANAGEMENT

Zhang Yongping<sup>1</sup>, Jiao Lianwei<sup>1</sup>, Ni Yixin<sup>2</sup>, Wen Fushuan<sup>2</sup>, Chen Shousun<sup>1</sup>, Felix F. Wu<sup>2</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** In order to deal with the emerging inter-regional congestion management problem, an optimization model and a practical approach for checking the feasibility of inter-regional bilateral contracts is presented in this paper. In the objective of this model, the economy and policy factors are considered by introducing weighting factors of contracts with the objective of minimizing regulating amount. The thermal stability limit and dynamic stability limit of the tie line are also considered as the constraints in this model. Defining and formulating the combined distribution shift factor for group to group contracts represent the constraints as the linear combination of generation change vector. The feasible contract set is obtained by using an efficient optimization algorithm. Numerical example on IEEE 30-system demonstrates this model and approach is correct and efficient.

This project is jointly supported by National Key Basic Special Fund of China (No. G1998020305) and the Research Grant Council (RGC), Hong Kong SAR Government.

**Key words:** electricity market; inter-regional congestion management; bilateral contract; distribution factor