

晶闸管旁通装置在 EAST 极向场电源中的应用

张 强, 秦品健

(中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 EAST 极向场电源对全超导、大电感线圈提供峰值达 ± 15 kA 的电流。为防止过电压, 必须为超导线圈上的电流提供续流回路, 一旦电源出现故障, 旁通作为故障保护系统的重要组成部分, 将为超导线圈上提供一条续流通路, 避免过电压的产生, 保护整个电源系统。提出在 EAST 极向场电源系统中得到应用的旁通装置, 并对旁通的工作特性予以分析, 最后指出此类旁通设计中应注意的若干问题。

关键词 极向场电源; 旁通; 续流; 均流

中图分类号: TM 26

文献标识码: A

文章编号: 1002-087X(2012)01-0114-04

Application of thyristor bypass in poloidal field power supply system of EAST

ZHANG Qiang, QIN Pin-jian

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: The poloidal field power supply system of EAST supplied the current of ± 15 kA peak value for the all-superconducting and large inductance coil. For preventing over-voltages, there must be a freewheeling loop of the superconducting coil. Once there were faults in the supply system, the bypass which played an important role in the protecting system would supply a freewheeling loop for the superconducting coil to prevent over-voltages, and protect the supply system. The bypass which was applied in the poloidal field power supply system of EAST was introduced, and the operating characteristics were analyzed in this paper. Finally, some tips should be noted in the design process of this kind of bypass were proposed.

Key words: poloidal field power supply system; bypass; freewheeling; current sharing

EAST 超导托卡马克装置是中国科学院等离子体物理研究所承担建设的九五国家大科学工程, 于 2006 年建成并通过国家验收。它是世界上第一个非圆截面全超导托卡马克。EAST 装置的电源系统, 包括极向场电源、纵场电源、等离子体快控电源、谐波抑制和无功补偿等子系统^[1]。

极向场电源是 EAST 规模最大的子系统, 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^[1]。一组变流器结构示意图如图 1 所示。

极向场电源系统的安全可靠运行对于 EAST 装置运行的

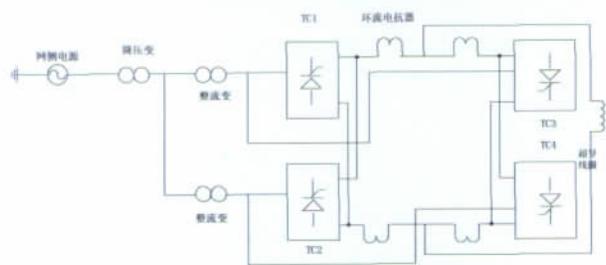


图 1 EAST 极向场电源系统示意图

收稿日期: 2011-07-13

作者简介: 张强(1986—), 男, 湖北省人, 硕士, 主要研究方向为大功率脉冲电源。

性能与安全、物理实验的成败与效率, 有着极为重要的影响^[1]。

极向场电源系统容量大、结构复杂、故障种类也很多, 比如直流侧短路故障、失超故障、整流桥晶闸管误触发故障、水冷失效、逆变失败、交流侧开关断开、整流变压器短路故障等等。一旦发生上述故障, 采取的措施包括: 变流器改为逆变工作方式, 触发旁通, 封锁变流器触发脉冲, 交流侧开关断开, 动作机械开关(PMS)等。按时间顺序, EAST 极向场电源目前的故障保护过程为: 首先将变流器改为逆变运行, 同时触发旁通装置; 其后封锁变流器的触发脉冲, 使其退出运行; 之后交流侧电网开关断开, 切断电源, 与负载线圈并联的 PMS 开关也闭合, 最后在必需时将整个电源系统退出运行。

每一组超导线圈的电感值都在几十微亨左右, 是典型的大电感负载, 通过电流可达十几千安, 一旦变流器系统发生故障, 特别是发生线圈失超故障, 变流器退出运行时, 必须为其提供一条续流通路, 否则在极短时间内线圈电流降为零, 将产生很高的过压, 破坏绝缘, 损坏线圈及系统里的其他设备。旁通的存在即提供了这样一个续流通路, 是极向场电源保护系统的重要组成部分。

1 晶闸管旁通设计要求

由于极向场电源是四象限运行系统, 负载电流的方向周

期性变化,因此在运行的不同阶段发生故障时,负载线圈续流的方向会发生变化。

针对这一要求,旁通必须具有双向续流能力,如图2所示,将旁通设备设计为逆并联的方式。



图2 旁通结构示意图

当负载电流方向与图2中标注的输入正向一致时,发生故障之后,导通BP1,闭锁BP2;反之,则导通BP2,闭锁BP1。

1.1 旁通工作过程

电源系统发生故障后,旁通迅速被导通,变流器直流输出侧故障电流经过旁通续流,流过旁通的电流迅速上升。故障撤除以后,由于大电感线圈的续流作用,流过旁通的电流一段时间内基本保持稳定。PMS动作之后,如图2中所示,旁通中的电流向PMS中转移,二者共同为线圈提供续流通道。因此旁通工作过程中通过的电流分为三个阶段,其中第1阶段电流迅速上升,表示直流侧电流向旁通的转移,第2阶段电流基本保持稳定,表示旁通续流过程,第3阶段电流下降较慢,表示旁通电流向PMS的转移。

旁通的工作时间由上述三段时间相加而得,其值对旁通安全稳定运行产生直接影响,如果工作时间变长,对晶闸管的热稳定要求将提高,导致并联管数与故障率增加。

1.2 旁通的内部故障

由图2可知,旁通设备直接跨接在直流侧两端,与负载线圈并联。在电源系统正常运行时,总有一组晶闸管(BP1或BP2)承受正压,若旁通设备出现了误触发导通的情况,则将直接导致直流侧短路,实验发现此时故障电流更大,程度更重,此为旁通内部故障。

1.3 旁通设计要求

根据上述分析旁通结构与工作过程特性,对旁通的设计提出以下要求:

(1)旁通导通之后80ms PMS导通,因此要求旁通装置能流过稳态15kA的电流。

(2)出现故障时,旁通装置不仅流过负载线圈电流,还要承受瞬时故障大电流的冲击,按整流变压器短路阻抗16%估算^[2],短路电流峰值可达15kA/16%=94kA。

(3)结构(元件)承受能力:晶闸管能在稳态时间内(80ms)与故障电流峰值下不发生过热以致爆裂;快速熔断器在晶闸管正常续流时不熔断,在旁通装置发生内部故障时迅速熔断;母排与其他机械结构能有足够的机械强度,在故障电流冲击下不发生不可逆形变以致打坏旁通柜内的设备。

(4)对旁通装置的控制要求:发生外部故障时,旁通要对触发信号响应迅速,尽早实现续流,以避免负载线圈电流突变;电源正常工作时,旁通必须可靠关断,能承受干扰信号而不致误触发;发生内部故障时,要求变流器迅速逆变,然后整

个电源系统退出运行。

2 旁通设计过程

2.1 并联晶闸管数目选择

由于发生故障时,电源直流侧的电流值可能非常大(与具体故障类型有关),图2中所示BP1、BP2均为一组并联联接的晶闸管,共同实现续流的功能。

每一支晶闸管能通过的电流值都有限制,否则会引发过热,爆裂等问题,使故障扩散。晶闸管导通时有导通压降和正向导通电阻^[3],在通过故障大电流时,发热问题尤为突出,必须予以重点考虑。

晶闸管等效热阻模型表述如式(1):

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_{thi} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (1)$$

一般来说,根据式(1),晶闸管等效热阻回路取4组电阻电容串联^[4],已经能够满足精度要求,其等效热阻回路如图3所示。

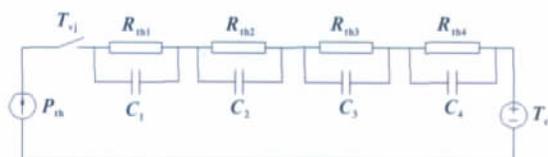


图3 晶闸管等效热阻回路图

图中, P_{th} 、 T_{vj} 、 T_c 分别表示管耗发热功率、管结温升、晶闸管管壳温度, $R_{thi}/C_i \sim R_{th4}/C_4$ 表示晶闸管管结至管壳的等效热阻^[4]。以ABB系列产品52U5200为例,图3中的参数如表1所示。

表1 ABB52U5200晶闸管热阻参数

i	1	2	3	4
$R_{thi}/(k \cdot kW^{-1})$	2.701	0.816	0.326	0.160
τ_i/s	0.9478	0.1249	0.0146	0.0032

由图3热等效回路,安装散热器之后,晶闸管与周围环境之间的热阻回路包括管结、管壳、散热器与周围环境四个部分,由此可知晶闸管管结温度 T_{vj} 与管耗功率 P_{th} 存在以下关系:

$$T_{vj} = T_a + (Z_{thjc} + Z_{thch} + Z_{thsa}) P_{th} \quad (2)$$

式中: T_a 表示环境温度; Z_{thjc} 、 Z_{thch} 、 Z_{thsa} 分别表示晶闸管管结至晶闸管壳、晶闸管壳至散热器、散热器至周围环境的热阻。

在瞬时冲击电流情况下,管耗功率计算如式(3)所示:

$$P_{th} = V_T i_T = [A + B \times i_T + C \times \ln(i_T + 1) + D \times \sqrt{i_T}] i_T \quad (3)$$

式中: V_T 、 i_T 为晶闸管正向导通压降和流过的电流; A 、 B 、 C 、 D 是与具体晶闸管产品型号相关的系数。

检测到故障电流,考虑电流不平衡因素之后,根据式(3)和预设并联管数可计算得到管耗 P_{th} ,再根据式(2)得到晶闸管管结温升,比较计算结果与产品限值(一般晶闸管产品管结温不允许超过125℃),如果计算管结的温度不超过限值,则认为联管数满足热稳定要求。

考虑到旁通装置的脉冲工作方式,目前的晶闸管产品都会有一组发热极限值(用最大 I^2t 值表示)曲线,图4是ABB系列产品的典型曲线。

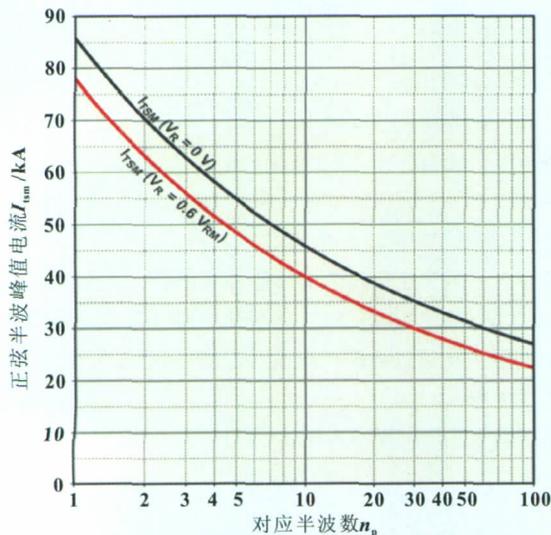


图4 ABB晶闸管产品极限 I^2t 值曲线

此曲线表示在工频正弦波电流下，对应不同半波个数的最大电流峰值 I_m 。由旁通的工作时间 t 可以算出对应半波数 n_p ，对应曲线计算可得到极限 $(I^2t)_{lim}$ 值，保证每支晶闸管发热不超过此值，是旁通安全稳定工作的重要前提。热稳定条件如式(4)表示，为：

$$I_g^2 t < n_p \times \int_0^{\pi/2} (I_m \sin t)^2 dt = (I^2 t)_{lim} \quad (4)$$

式中： I_g 表示每支晶闸管通过的电流。由式(4)得到的 I_g 范围可对管并联数进行修正。

2.2 旁通装置母排连接与均流问题

2.2.1 母排连接

EAST设备放置空间有限，需要经过合理布局，因此要求将旁通设备设计成柜式一体结构。直流母排是柜式结构内的重要组成部分，并联晶闸管之间需要通过母排联接，典型联接方式如图5所示。

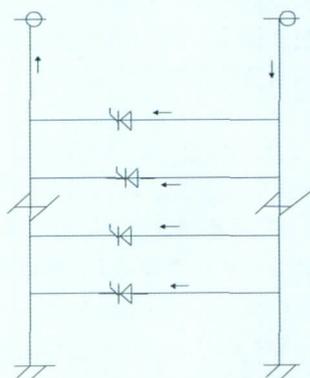


图5 旁通柜母排联接结构示意图

包括纵向联接母排与每一个晶闸管支路的支撑母排在内，将流过较大电流，母排发热也较严重，一般选用铜或铝材质的矩形截面母排时，需要在母排截面打上水冷孔进行水冷，保证母排温升在限制范围之内。

旁通续流是一个脉冲过程，峰值持续短、数值大，这对母排抗电动力提出较高要求。需要校验母排在峰值电流冲击时的应变、刚度、挠度等是否符合要求，采取螺栓固定等方

式可以提高母排的动稳定程度。

2.2.2 均流问题

旁通续流由并联晶闸管共同完成，而均流问题是所有并联结构所共同面临的问题。如果均流系数达不到预期要求，会导致某些并联支路出现过载，严重时会导致支路过热甚至爆裂，使故障扩大^[9]，如式(5)：

$$K_j = (\sum I_i / n) / I_{max} \quad (5)$$

式中： I_i 为各并联元件中的电流值； n 为并联支路数； I_{max} 为 I_i 中的最大值。

2.2.2.1 并联结构

晶闸管并联结构是影响均流效果的重要因素，如果能采用一种使各并联支路的阻抗值，以及分布参数完全一致的结构^[9]，即所有并联晶闸管支路呈圆形对称分布，则均流问题会迎刃而解。但实际上考虑到安装与布局方面的问题，往往不能采用理想化的并联结构。出于使旁通柜内接线尽量简单的目的，EAST旁通目前采用的典型并联结构如图6(a)所示，是一种在同侧（旁通柜顶部）进出电流的结构，其电流分布如图6(b)所示。

2.2.2.2 均流措施

从图6(b)可以看出，旁通自然均流的效果并不好，均流系数远远不能达到要求，必须采取一些均流措施。从主回路角度来看，采用同侧进出电流的方式时，由于母排和管阻抗值很小，各并联支路阻抗值之差的相对值很大。要改善均流效果，首先要使各并联支路间阻抗值接近。在保证热稳定的前提下，在各支路上串联一个阻值相对较大的电阻，可通过在支路中叠加入硅钢片或软连接等措施实现。此外，该电阻还能起到限流与施加正压、促进晶闸管同步触发的作用。

当然，采用先进控制方法会使均流效果更好，如动态均流技术^[10]等，目前在EAST电源系统中也已得到应用。

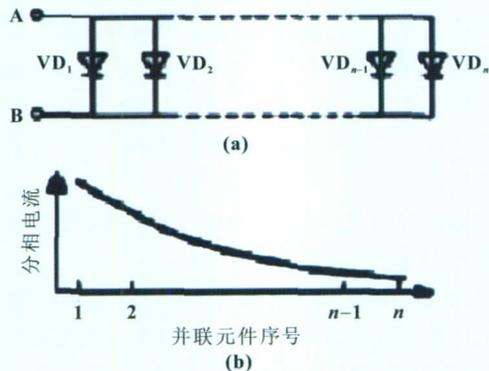


图6 (a)EAST旁通采用的并联结构;(b)旁通电流分配

3 设计中要注意的问题及旁通装置实际应用情况

EAST旁通装置的设计需注意：(1)大功率。EAST极向场电源是典型大电流输出设备，旁通装置的设计要把大功率下的安全稳定放在第一位，要考虑包括热稳定、动稳定、同步触发、均流在内的诸多问题。(2)脉冲旁通。EAST旁通不需要稳态续流工作，主要完成短时续流和电流转移的任务。在考虑晶

闸管热稳定时,不可采用稳态计算方法来校验,只需考虑短时限制条件。(3)旁通柜。EAST 极向场电源实验现场布局经过严格设计,旁通设备需做到整体成柜化,因此在考虑元件尺寸、导线连接方式等问题时,要注意空间布局的限制。

EAST 实用旁通装置如图 7 所示拍摄的 EAST 极向场电源第 7、8 套电源 PS7、PS8 的旁通装置。图 7(a)为并联晶闸管(共 9 支)与母排,图 7(b)为现场旁通柜外观,柜内还包含晶闸管触发与保护装置等。



图 7 EAST 用旁通装置照片

(上接第 113 页)

直流源时间长度大于 125 s,电压为 20 V(探头具有十倍的衰减)通过改变变压器两侧的匝数比以及负载电阻的阻值就能得到我们所需要的电压与电流值,能较好的达到目标,为 Snubber 提供反偏直流源。

实验结果显示直流源还存在毛刺,为了得到更好的效果,我们可以采用无源滤波器和有源电力滤波器构成混合型滤波器对谐波进行抑制^[12-14]。

3 结语

(1) 在实验中,该电源实现了时间大于 125 s、电压值为 20 V 的直流电压输出,开关频率可达到 50 kHz。这说明了该电源的原理正确性和实际的可行性。由 PC 机控制的高频高压发生器已经完成了设计、制造、测试。在高压电源的不同谐振频率下可以通过 PC 调节微脉冲和宏脉冲的个数来控制电压值和频率,以满足不同电路的需要。

(2) EAST 是一个非常庞大的装置,它周围紧密的排列着许多其他器件,且工作时具有强烈的电磁干扰。该发生器与一般的 50/60 Hz 供电系统相比具有体积小、效率高、能直接接三相电、且做到了 90 kV 的隔离等许多优点,能直接放入 EAST 实验大厅,为 EAST 服务。它的研制成功对 EAST 的许多外围系统如 NBI、DNB 等等离子体加热或者诊断系统具有重大意义。

(3) 进一步实验将完善构造闭环系统,通过输出电压的反馈来自动调节开关频率,以实时匹配负载的变化,将直流源升高到 100 V/500 A,持续时间 3 600 s 以上,为 ITER 服务^[15]。

参考文献:

[1] 李伟. EAST-NBI 系统高压电源传输线及缓冲器(Snubber)的研究与设计[D].合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2009:15-35.

4 总结

(1) EAST 极向场电源带大电感线圈负载,发生故障时必须为其提供续流通道以避免过压的产生破坏绝缘,保护电源系统,而旁通可以提供续流通道。

(2) 适应电源系统的四象限运行,旁通必须是逆并联结构,对晶闸管并联数目、热稳定、母排动稳定、可靠动作与闭锁等都有严格的要求。

(3) 从脉冲工作特性及成柜整体化的角度去设计旁通,是需要注意的问题。

参考文献:

- [1] 高格.可控并联十二脉波四象限运行整流电源的研制[J].电工技术学报,2004,7:17-20.
- [2] 杨荫福.电力电子装置及系统[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [3] 陈坚.电力电子学-电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 杨文焕.变流器均流系数的温度特性[J].电力电子技术,2003,4:75-78.
- [5] 许敬涛.整流设备动态均流技术[J].中国氯碱,2010,3:5-7.

- [2] 李伟,刘小宁,黄懿赞. EAST 中性束注入器打火保护的缓冲器设计[J].高电压技术, 2009, 35(3): 667-671.
- [3] CAO L, LI G, WANG H T. Development of iron core snubber[J]. High Voltage Engineering, 2010, 31(5):1269-1274.
- [4] BIGI M, TOIGO V, ZANOT TO L. Protections against grid break downs in the ITER neutral beam injector power supplies[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5): 905-911.
- [5] 潘圣民,傅鹏,蒋力.采用 DSP 和 CPLD 的 100 kV 高压脉冲电源控制系统[J].高电压技术, 2009,35(7):1667-1671.
- [6] HAUGHIAN J, LOU K, BYRNS R, et al. Fabrication and testing of the flexible transmission line to the TFTR neutral beam ion sources [C]//Proceedings of the 10th Symposium on Fusion Engineering. Philadelphia, USA: [s.n.],1983:1629-1633.
- [7] 杨雷,傅鹏,刘小宁.大功率直流高压电源的变压器分布电容分析[J].高电压技术,2009,35(6):1403-1408.
- [8] WANG H T, LI G, CAO L, et al. Parameter analysis for arc Snubber of EAST neutral beam injector[J]. Plasma Science and Technology, 2010,12(4):499-505.
- [9] PREBEN L. Application of pulse energisation on electrostatic precipitators for various processes[J]. Journal of Electrostatics, 1990,25(6):41-53.
- [10] BISHOP S R, MAYHALL D J, WILSON J H, et al. Design and test of 80 kV snubber core assemblies for MFTF sustaining neutral beam power supplies[C]//The 9th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. Palmer House Chicago, Illinois, USA: IEEE Press, 1981: 419-422.
- [11] CLAESSEN R, BAUR U, BERTOLINI E, et al. The JET neutral injection 160 kV transmission lines, the associated snubbers and the SF6 tower for the termination of the transmission lines housing of the snubbers and voltage breaks[C]//The 14th Symposium on Fusion Technology. Congress Center of the Palais des Papes. Avignon, France: Pergamon Press, 1986: 941-947.
- [12] LI G, ZHOU Y G. Compact digital high voltage charger[C]//IEEE PAC. Knoxville, Tennessee: IEEE, 2005: 3964-3966.
- [13] BRAMBILLA A, DALLAGO E, BERTOLOZZI P L. Circuit analysis of a power pulse generator for electrostatic precipitators[J]. IEEE, 1990,137(2):83-88.
- [14] WATANABE K, MIZUNO M. Development of a high performance core snubber for high power neutral beam injectors[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(12): 4136-4141.
- [15] MONDINO P L, BAYETTI P, PIETRO E D, et al. ITER neutral beam system[J]. Nuclear Fusion, 2000, 40(3):501-507.