EAST极向场电源限流控制仿真分析

汪桂霞， 秦品健
（中国科学院 等离子体研究所，安徽 合肥 230031）

摘要：针对 EAST 极向场电源过流保护时不宜直接切断电源的情况，介绍了一种具有自动限流作用的过流保护策略，当电源达到限流值前正常运行，达到限流值时稳定在这一值附近运行。运用 Matlab 和 Saber 对整个限流控制系统进行仿真以及对 PID 控制参数分析，最终确定了控制方案和 PI 控制参数，证明了该控制方法的可行性和优越性。

关键词：超导托卡马克聚变实验装置；极向场电源；限流控制；PID 参数
中图分类号：TM 461　　文献标识码：A　　文章编号：1002-087 X(2013)11-2038-02

Current-limiting control in power supply of EAST polorial field

WANG Gui-xia, QIN Pin-jian
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: A protection strategy with automatic current-limiting was introduced because the power supply couldn't be cut off directly in the process of over-current protection in EAST polorial field power supply. This strategy can ensure the ordinary operation of the current when it is lower than the setting current value and maintains the current to the setting current value when it reaches the setting current value. Matlab and Saber were utilized to simulate the entire system and analyze the PID parameters. The control scheme and PI parameters were achieved, which verified the feasibility and superiority of the control strategy.

Key words: EAST; polorial field supply; current-limiting control; PID parameters

EAST 极向场电源控制系统是托卡马克主要子系统之一，它为等离子体的产生、约束、维持、加热以及等离子体的电流、位置、形状、分布和破裂的控制，提供必要的工程基础和控制手段，而过流保护在装置可靠运行过程中更是必不可少的重要组成部分。由于极向场电源是为全超导环境下的大电感负载供电，直接过流保护故障时会使电源输出电流变化过大，影响实验等离子体放电的正常进行，对超导线圈也会产生不良影响，因此可靠的限流控制措施对 EAST 装置及实验较为重要。

该套系统包含 12 套电源，图 1 中每套电源由两台整流变压器各自连接一对同相逆变联的晶闸管整流桥组成。在实验运行时极向场整流器直流侧电流变化曲线如图 2，极向场电源过流保护是控制电源直接退出，导致实验中等离子体放电终止，影响实验的正常进行；电流变化率大，对设备和负载冲击很大；过大的电流变化也会对超导线圈产生影响。限流控制是使系统先不进入过流保护状态，而是维持在这一限流值附近运行，实验能够维持基本等离子体放电运行。

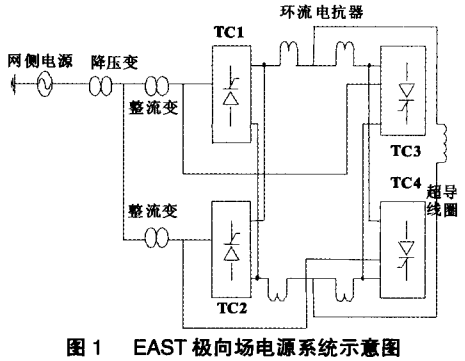

图 1　EAST 极向场电源系统示意图

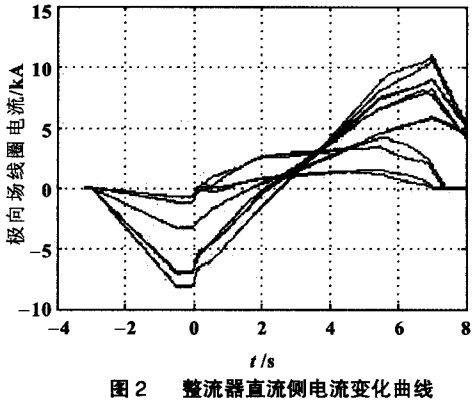

图 2　整流器直流侧电流变化曲线

1 限流控制参数设计

极向场电源整流装置的主电路采用三相桥式同相逆并联整流电路。变压器的输出为 2 个绕组输出，每台变压器对应有两台变流器，对于每一台变流器都设有 alpha 控制器一块，因此，只需要分析其中一台变流器的控制回路。

首先根据需要建立限流控制系统框图如图 3 所示，从主回路采集的反馈电流值与设定的限流值进行比较，进而判断

收稿日期：2013-04-11

作者简介：汪桂霞（1986—），女，安徽省人，硕士研究生，主要研究方向为控制工程。

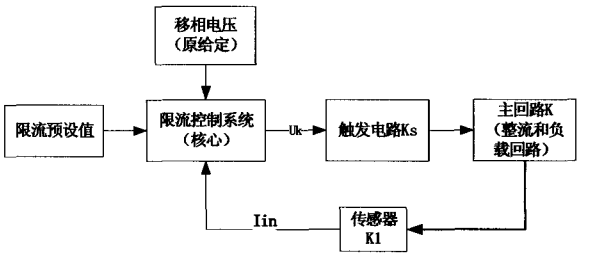

图 3　限流控制系统结构框图

是否过流。当过流时，限流电路动作；不过流时，电路正常运行，限流电路相当于不存在。图 4 为三输入闭环限流控制系统 Matlab 仿真图。

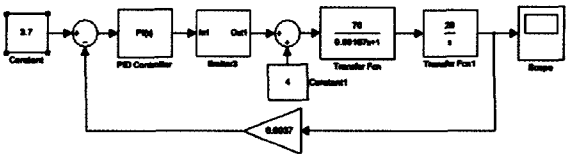

图 4　三输入闭环限流控制系统 Matlab 仿真图

当 $I \leqslant I_{限}$，即不过流，限流电路输出 $U_{out}=U_c$，主回路正常运行输出电流；

当 $I \geqslant I_{限}$，即过流，限流电路输出 $U_{out}=U_{限}$，主回路电流 $I=I_{限}$。

移相电压：0~5 V；

PID 控制器：$K_P+\dfrac{K_I}{S}$ ；

limiter 模块：实现过流时输入和输出相等，不过流时，输出为零；

主回路：包括触发和整流电路。在进行限流控制系统分析时，可以把主回路当作系统的一个环节来看待，应用线性控制理论时，必须求出这个环节的放大系数和传递函数。实际上触发电路和整流电路都是非线性的，只能在一定的工作范围内近似看成线性环节。根据装置的参数，触发电路控制电压 U_c 调节范围是 0~5 V，对应的整流电压 U_d 范围是 0~350 V 时，可取 $K_s=\triangle U_d/\triangle U_c=350/5=70$ 。在动态过程中，可以把晶闸管出发与整流装置看成一个纯滞后的环节，其滞后效应是由晶闸管的失控时间引起的，查表知三相桥式整流电路的平均失控时间 T_s=1.67 ms，即 $K=70/(0.001\ 67\ S+1)$。

负载回路：取电感 L=50 mH，L=200 mH 两种情况；

传感器：K_i= 电流互感器变比；

限流值：小于运行时最大电流值。

L=50 mH，L=200 mH 两种负载仿真图如图 5 和图 6 所示，所对应的 PI 参数分别为：

K_{P_1}=1.2，K_{I_1}=40；K_{P_2}=35，K_{I_2}=40；K_{P_3}=35，K_{I_3}=1

图 6 对应的 PI 参数分别为：

K_{P_1}=12，K_{I_1}=400；K_{P_2}=300，K_{I_2}=400；K_{P_3}=300，K_{I_3}=50

经过仿真，对两种负载下取最优 PI 参数：

L=50 mH 时，K_{P_2}=35，K_{I_2}=40 ；L=200 mH 时，K_{P_2}=80，K_{I_2}=160。

2 限流控制器模拟电路设计

K_s、K、K_i、PID 参数计算出来后，代入实际电路，进行模拟

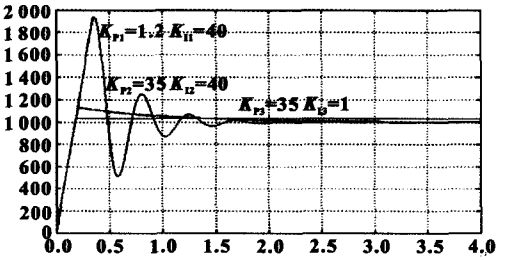

图 5　L=50 mH 时三组 PI 参数情况下的仿真图

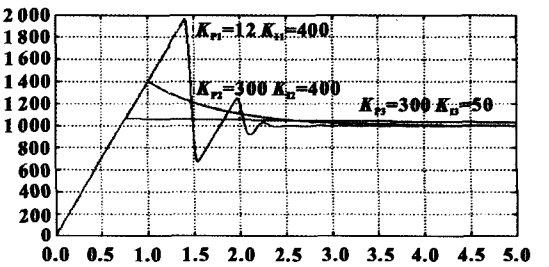

图 6　L=200 mH 时三组 PI 参数情况下的仿真图

电路搭建。当主回路没有过流时，输出移相电压处下方的二极管 VD 不导通，输出移相电压按总控给的指示电压正常运行，限流控制电路系统相当于不存在模式；当主回路过流时，反馈回来的电流大于设定的限流值，经过 PID 运算放大电路，使二极管 VD 阴极为负，VD 导通，即限流控制回路起作用，输出的移相电压进一步调节触发角，最终输出电流值被限定在预设值附近。

电路仿真作为电路计算的必要补充和论证手段。本文中所选的 Saber 仿真软件是美国 Synopsys 公司的一款 EDA 软件，为复杂的混合信号设计与验证提供了一个功能强大的混合信号仿真器，兼容模拟、数字、控制量的混合仿真，可以解决从系统开发到详细设计验证等一系列问题。

给出一个随机的移相电压系列，在闭环的状态下，移相电压和设定限流值输入条件下，图 7 中所示是主回路反馈电流与预设的限流值比较的结果：不过流时，输出为正；一旦过流，输出反向饱和。图 8 中为经过闭环反馈、主电路及反向传感器后的最终输出结果（反相的），说明电流一直稳定在设定值附近运行，仿真结果收敛。

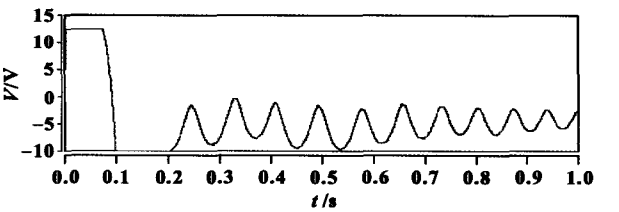

图 7　主回路反馈电流与预设的限流值比较输出

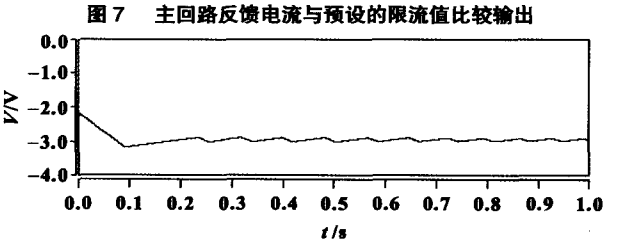

图 8　限流闭环控制输出(反相)

(下转第 2066 页)

2565-2575.
[2] PADHI A K, NANJUNDASWAMY K S, GOODENOUGH J B. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. J Electrochem Soc, 1997, 144(4): 1188-1194.
[3] YAMADA A, HOSOYA M, CHUNG S C, et al. Olivine-type cathodes achievements and problems [J]. J Power Sources, 2003, 119: 232-238.
[4] PROSINI P P, LISI M, ZANE D, et al. Determination of the chemical diffusion coefficient of lithium in $LiFePO_4$ [J]. Solid State Ionics, 2002, 148(1/2): 45-51.
[5] STAUFFER D, AHARONY A. Introduction to percolation theory [M]. London: Taylor & Francis, 1992.
[6] SHEEMA K, LEE Y H, LIM H S. High-density positive electrodes containing carbon nanotubes for use in Li-ion cells [J]. J Power Sources, 2006, 158(1): 1425-1430.
[7] ZHOU Y K, WANG J, HU Y Y, et al. A porous $LiFePO_4$ and carbon nanotube composite [J]. Chem Commun, 2010, 46(38): 7151-7153.
[8] IIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. Nature, 1991, 354: 56-58.
[9] BRYNING M B, ISLAM M F, KIKKAWA J M, et al. Very low conductivity threshold in bulk isotropic single-walled carbon nanotube-epoxy composites [J]. Adv Mater, 2005, 17(9): 1186-1191.
[10] LIU Y J, LI X H, GUO H J, et al. Effect of carbon nanotube on the electrochemical performance of C-$LiFePO_4$/graphite battery [J]. J Power Sources, 2008, 184(2): 522-526.
[11] XU J, CHEN G, LI X. Electrochemical performance of $LiFePO_4$ cathode material coated with multi-wall carbon nanotubes [J]. Mater Chem Phys, 2009, 118(1): 9-11.
[12] JIN B, JIN E M, PARK K H, et al. Electrochemical properties of $LiFePO_4$-multiwalled carbon nanotubes composite cathode materials for lithium polymer battery [J]. Electrochem Commun, 2008, 10(10): 1537-1540.
[13] 张勇, 杜培培, 王力臻, 等. $LiFePO_4$/CNT 复合材料的制备及电化学性能 [J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(2): 205-209.
[14] WANG L, HUANG Y D, JIANG R R, et al. Nano- $LiFePO_4$/MWCNT cathode materials prepared by room-temperature solid-state reaction and microwave heating [J]. J Electrochem Soc, 2007, 154 (11): A 1015-A 1019.
[15] FENG Y. The preparation and electrochemical performances of $LiFePO_4$-multiwalled nanotubes composite cathode materials for lithium ion batteries [J]. Mater Chem Phys,2010,121 (1/2): 302-307.
[16] MURALIGANTH T, MURUGAN A V, MANTHIRAM A. Nanoscale networking of $LiFePO_4$ nanorods synthesized by a microwave-solvothermal route with carbon nanotubes for lithium ion batteries [J]. J Mater Chem, 2008, 18(46): 5661-5668.
[17] CHEN Z Y, ZHU H L, ZHU W, et al. Electrochemical performance of carbon nanotube-modified $LiFePO_4$ cathodes for Li-ion batteries [J]. The Nonferr Metal Soc, 2010, 20(4): 614-618.
[18] LI X L, KANG F Y, BAI X D, et al. A novel network composite cathode of $LiFePO_4$/multiwalled carbon nanotubes with high rate capability for lithium ion batteries [J]. Electrochem Commun, 2007, 9(4): 663-666.
[19] JIN E M, JIN B, PARk K H, et al. Electrochemical characteristics of lithium iron phosphate with multi-walled carbon nanotube for lithium polymer batteries [J]. J Nanosci Nanotechno, 2008, 8(10): 5057-5061.
[20] RANGAPPA D, ICHIHARA M, KUDO T, et al. Surface modified $LiFePO_4$/C nanocrystals synthesis by organic molecules assisted supercritical water process [J]. J Power Sources, 2009, 194 (2): 1036-1042.
[21] AWARKE A, LAUER S, PISCHINGER S, et al. Percolation-tunneling modeling for the study of the electric conductivity in $LiFePO_4$ based Li-ion battery cathodes [J]. J Power Sources, 2011, 196 (1): 405-411.
[22] VAISMAN L, WAGNER H D, MAROM G. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 128-130: 37-46.
[23] WOOD J R, ZHAO Q, WAGNER H D. Orientation of carbon nanotubes in polymers and its detection by Raman spectroscopy [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32 (3/4): 391-399.

(上接第 2039 页)

3 模拟实验

借助信号发生仪测试所设计的限流控制电路板，用信号发生仪模拟现场 EAST 极向场主回路的电流，模拟信号给出振幅为± 2 V 的信号，如图 9 中蓝色；跟预设限值 $U_{限}$=1 V 比较，如图 9 中绿线。当过流时，显然，电路会动作，输出被限制在 $U_{限}$=1 V，如图中绿线；当不过流时，按照正弦电压值正常输出，说明电路板设计符合我们最初的目的。

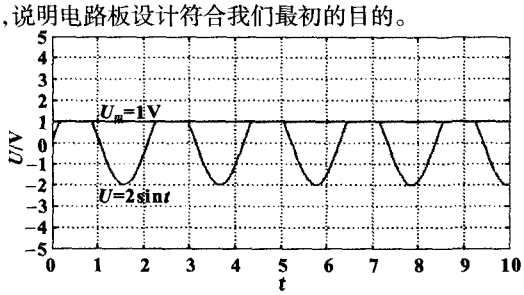

图 9 信号发生仪模拟现场电流实验结果

4 总结

通过对 EAST 极向场电源系统限流控制器方案设计，Matlab 和 Saber 软件仿真及模拟实验，证明了 EAST 极向场电源系统限流控制器在 EAST 极向场电源系统中对主回路电流限流的可行性，当限流控制器投入使用时，且系统在遇到过流时，不会使整套电源装置全部断开，对设备进行了有效的保护。从某种程度上说，等离子体放电过程中也是不希望有突然断电的情况产生，否则会造成等离子体破裂以及实验失败，所以提高了实验运行过程中等离子体放电的可靠性[1-6]。

参考文献：

[1] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,2006.
[2] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].4 版.北京:机械工业出版社,2000.
[3] 黄嘉.低电压大电源整流电源并联供电[J]. 电气传动,2008(7): 31-33.
[4] 韩恩典,李培.浅谈限流保护—电流截止负反馈分析及应用[J].科技信息(科学教研),2008,25:30-31.
[5] 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.
[6] 高格,傅鹏,汤伦军,等. HT-7U 装置极向场电源变流系统的研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2005(6):124-128.