

ITER 极向场电源系统的设计与仿真

黄 晖¹, 杜世俊², 傅 鹏², 宋执权²

(1. 合肥工业大学, 安徽 合肥, 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: ITER 极向场电源由两台三相桥式整流器通过平衡电抗器并联输出 12 脉波, 额定电流 45 kA, 额定电压 2 kV。文章提出电源运行方案为无环流与有环流运行相结合, 可以实现四象限运行模式。通过 Ansoft Simplorer 仿真软件, 建立了详细 ITER 主整流器模型, 并设计其电压电流控制器, 通过仿真实验验证了设计方案。

关键词: 晶闸管整流器; simplorer 仿真; 环流控制

中图分类号: TN86

文献标识码: A

The Design and Simulation of ITER Poloidal Power Supply System

HUANG Hui¹, DU Shi-jun², FU Peng², SONG Zhi-quan²

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, 2. China Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper designs an ITER poloidal converter, it is a 12-pulse, 4-quadrant converter rated for 45 kA, 2 kV. To avoid the danger of current extinction at zero crossing, the converter operates in 6-pulse current-circulating mode when the absolute value of the current is below 10% of the maximum current. A simulation model was built by simplorer software, and the design scenario was validated correctly.

Key words: thyristor converter; simplorer simulation; circulation current control

0 引 言

ITER 极向场电源的设计与建设是超导可控核聚变的国际合作项目之一。论文的目的在于设计极向场主整流器, 该整流器要求为极向场超导线圈提供可以控制其正反方向的 0~45 kA 电流、输出电压 0~2 kV。

电力电子主电路及其电源控制模块构成了一个巨大的电力电子系统, 建立详细准确的电源系统计算机模型可对电源的运行模式进行全局的仿真分析, 验证设计方案的可行性、优化控制器参数、分析故障状态。ITER 整流器电源的设计与分析基于 simplorer 仿真软件, 通过仿真软件建立详细电源系统模型。根据系统对输出电压的要求及考虑实际运行参数的不对称, 设计了整流器电源的电压和环流控制器。

1 电源系统设计方案

ITER 超导线圈电源系统主要是在超导线圈中通以一定的电流波形, 实现等离子体电流上升、电流控制以及等离子体位移、形状。整个电源系统由 400 MVA \ 400 kV \ 69 kV 主变压器供电, 额定容量 95 MVA 整流变压器接

至 69 kV 母线, 提供整流器 12 脉波运行所需电源。

大功率电源中使用的电流传感器量程很大, 检测电流过零点很困难。无环流运行模式下实现四象限运行, 需要在电流过零点期间, 同时封锁正、反组整流桥, 设置控制死区, 这种控制模式不适用于电流要求连续的场合。ITER 极向场电源采用无环流与有环流模式相结合的运行方式, 即当输出电流较大时运行在无环流模式, 当输出电流绝对值在给定值(取最大输出电流的 10%~20%)以内, 采用有环流运行模式。这种运行方式可以实现电流的平滑过零点, 仅在小电流情况下运行环流模式, 环流通道少, 可以有效减少造价。电源系统如图 1 所示。

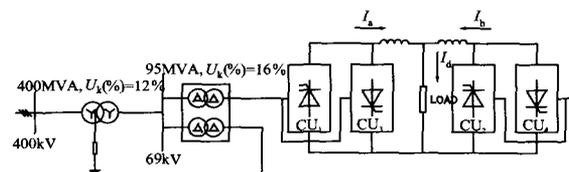


图 1 ITER 极向场电源系统示意图

晶闸管器件具有耐压高、电流大的优点, 在大功率变流场合应用广泛。ITER 主整流器方案采用晶闸管整流。主整流器由正、反两组整流桥并联构成四象限电源, 每组由两台三相桥式整流器通过平衡电抗器并联, 输出 12 脉波电压。如图所示, 通过检测变流系统输出电流 I_d , 当直流电流绝对值在额定电流的 20%~100% 时, 变流器是两象限运行, CU_1 与 CU_2 并联运行提供正向电流, CU_3 与 CU_4 并联提供反向电流, 并联支路各分担 50% 的功率; 当负载电流的绝对值在额定值 20% 以下时, 变流系统运行在四象限方式, 开通

收稿日期: 2007-12-21

作者简介: 黄 晖(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器;

杜世俊(1950-), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博导, 研究方向为电物理装置结构与分析;

傅 鹏(1962-), 男, 博士, 研究员, 博导, 研究方向为高功率电源及计算机控制技术;

宋执权(1975-), 男, 博士, 研究方向为高功率电源技术。

CU₁与CU₄,形成环流通道。整流器每个桥臂由8只晶闸管(额定值5 200 V\3 700 A)并联,正常工作情况下导通7只晶闸管,另外1只作为冗余设计,当需要运行内旁通工作模式时触发。整流变压器额定容量95 MVA,变压器二次侧移相30°。

极向场电源系统主要参数如下:

400 kV 电网:额定电压400 kV,±4%,短路容量12 GVA;

主变压器:额定变比400 kV/69 kV,额定容量300 MVA,短路电压百分比12%;

整流变压器:额定变比69 kV/1.481 kV,额定容量95 MVA,短路电压百分比16%;

平衡电抗器:电感值176 μH,空心电抗器。

2 基于 simplorer 整流器电源系统建模与仿真

2.1 simplorer 工作界面及系统建模

Ansoft simplorer 是一款用于电力电子系统仿真的计算机软件。它的主工作界面如图2所示,软件包含众多电气元件模块,可方便的搭建电源系统模型。如图所示,Circuit 模块提供各种基本电路元件,如理想交流电源、阻抗等;控制系统的构成主要通过 Blocks 模块;Add Ones 模块内有集成的晶闸管整流桥模块,该整流桥模块提供同步信号、三相电源、alpha 触发信号等重要接口。

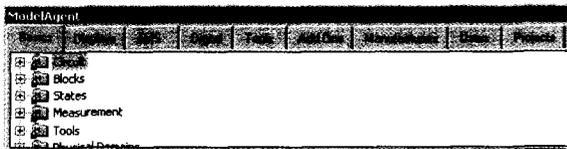


图2 simplorer 主要工作界面

按照图1所示的电源系统结构,在 simplorer 工作界面下搭建系统模型。模型各模块设置的电参数必需按照实际参数计算得出。系统模型如图3所示。

2.2 整流器主电路及其控制器

超导线圈是强耦合系统,控制各个线圈的电流需

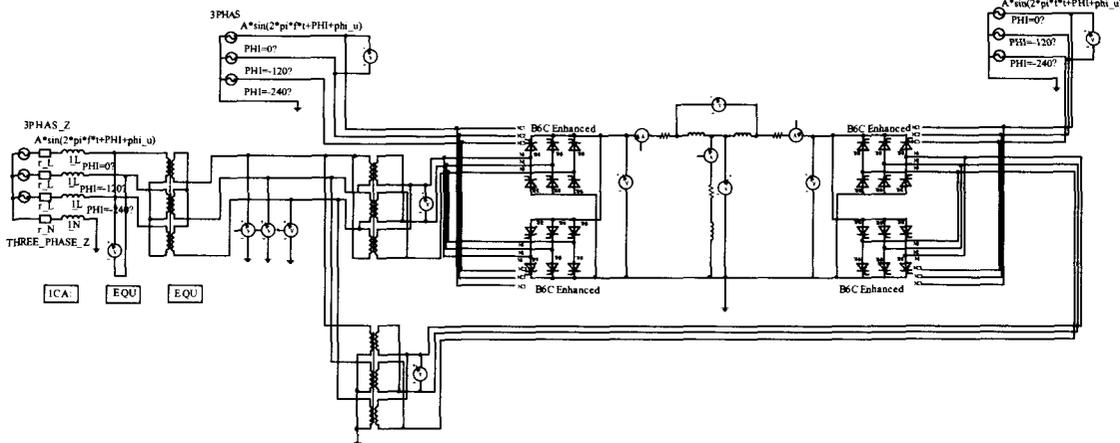


图3 整流器主电路

要进行解耦控制,这一任务在等离子电流试验中由总控制室完成。对极向场电源的要求是接收总控发出的电压指令信号,并按此给定值输出电压,因此要求整流器具有较高的动态响应速度与精确度。

电源实际运行当中必须考虑电网电压的波动,系统允许的电网电压波动范围为±4%。过大的电网电压的波动会影响输出电压的精度。此外,电源系统最大输出直流电流达45 kA,单桥最大输出电流为22.5 kA,电流流过变压器、直流母排,将会产生较大的压降,该值也会影响输出电压的准确度。综合考虑电源设计要求和整流器动态性能,设计采用电压反馈控制,控制结构如图4所示,该电压控制器能够抵消电网电压波动、补偿变压器漏抗压降、母排压降,同时具有较高的动态响应速度。

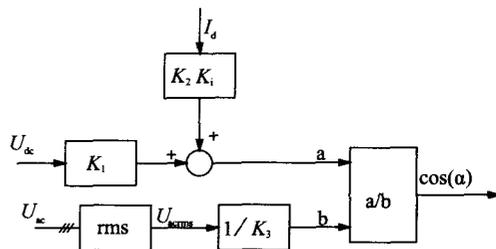


图4 电压控制器

电压反馈控制器的数学表达式:

$$\cos\alpha = \frac{K_1 U_{ref} + K_1 K_2 I_d}{U_{ACrms} / K_3} \quad (1)$$

从控制结构图及上式可以看出,电压反馈控制的原理在于,当电网电压产生波动时,控制器能根据电网电压的变化及时调整触发控制角;当电网电压跌落,式中分母的值将小于1,控制器减小触发控制角以提高输出电压平均值;反之亦然。分子中 K₁K₂I_d项的物理意义在于补偿变压器漏抗压降及线路电压损耗。

交流电压有效值检测计算公式:

$$U_{ACrms} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[u_a \sin \omega t + u_b \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + u_c \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \quad (2)$$

电压控制器系数: K_3 值为电网电压额定值, K_1 取 0.9, K_1 、 K_2 计算如下:

$$K_1 = \frac{1}{E_{d0}} = \frac{1}{2.34U_2} = \frac{1}{2.34 \times (1.481/\sqrt{3}) \times 10^3} = 0.0005 \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{qfL}{2E_{d0}} = \frac{6 \times 50 \times 176 \times 10^{-6}}{2 \times 2000} = 1.32 \times 10^{-5} \quad (4)$$

实际运行中, 两台标称值相同的整流变压器实际参数不能完全对称, 以及考虑母排及安装工艺, 两组整流桥各自回路参数不对称, 将产生不流经负载而仅在两组整流桥之间流通的环流。该环流如不加以限制将导致电流分配严重不平衡。等效内阻抗小的一组整流桥将负担较大的负载电流, 将引起变压器饱和, 降低电源系统的效率。设计的均流控制器如图 5 所示, 检测两组整流器的电流平均值, 比较二者之差, 通过 PI 调节器产生触发角的一个修正值: 等效内阻抗大的整流桥触发角减小一个修正值, 使该组桥输出电压增大, 从而使两组电流分配均匀。

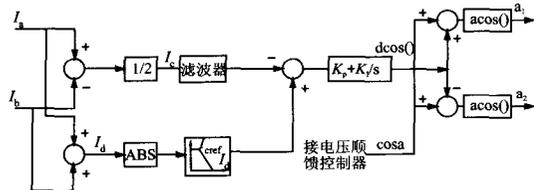


图 5 环流控制器

该电流控制器更大的作用在于作为整流器环流模式控制器。当负载电流绝对值小于最大输出电流的 20%, 系统开始运行有环流模式。以电流从正向变为反向为例, 首先封锁正组整流桥 CU_2 , 仅由 CU_1 运行在 6 脉波整流, 约 50 ms 控制延时后, 触发反组整流桥 CU_4 , 系统运行在环流模式。电流传感器检测环流 $I_c = I_a - I_b$, 通过环流控制 PI 调节使该环流跟踪给定环流参考量 I_{ref} 。环流控制使环流模式下环流电流处于受控状态, 有效地提高了系统的安全性。环流控制流程如表 1 所示。

表 1 环流控制流程

工作模式	无环流	过渡状态	环流模式
导通状态	正向	CU_1, CU_2	CU_1
	反向	CU_3, CU_4	CU_4

2.3 仿真结果

在上述分析的基础上, 建立了极向场电源系统, 仿真波形如图 6、7、8 所示。图 6 表明电压反馈控制器使输出电压精度提高。图 7 为运行过程中环流电流的波形。图 8 为负载输出电流波形, 可以看到, 在无环流模式下, 两组整流桥电流分配均匀; 有环流模式下环流为给定电流值。

3 结论

上文建立了详细 ITER 主整流器模型, 并设计其

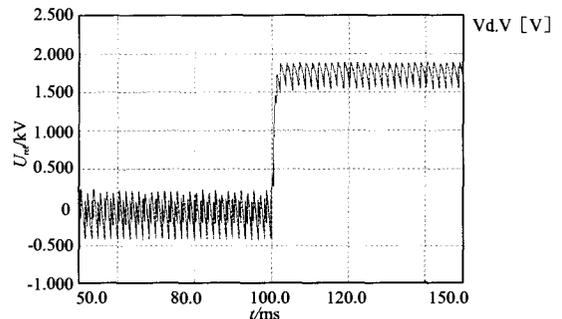


图 6 输出电压波形 ($I_d = 45 \text{ kA}, U_{ref} = 1.7 \text{ kV}$)

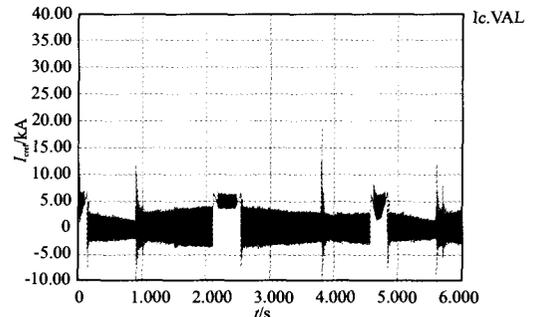


图 7 环流电流 ($I_{ref} = 5 \text{ kA}$)

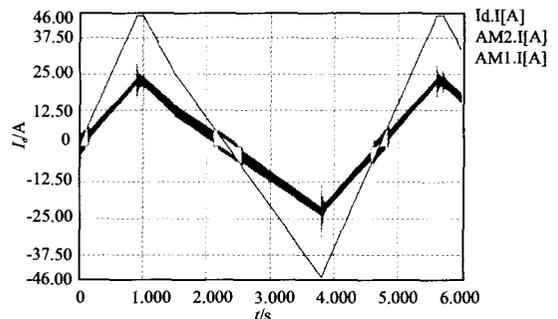


图 8 输出电流波形

电压电流控制器, 通过仿真验证可得出如下结论:

(1) 设计了采用晶闸管构成的整流桥的极向场电源方案, 该电源为四象限运行整流器, 最大输出电压 2 kV, 输出直流电流 45 kA。

(2) 建立了极向场整流器模型, 并对电源系统的稳态运行进行了仿真, 从而验证了该方案可用于超导线圈的直流电源。

(3) 根据超导线圈负载对电源的要求, 及实际电源在运行中遇到的均流问题, 设计了电压反馈控制器、环流控制器。仿真结果说明该环流控制器设计思路新颖, 可以有效地达到均流与控制环流的目的。

参考文献:

[1] 傅鹏, 高格, 宋执权. 晶闸管在大功率交流和开关中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 34-39.
 [2] 高格, 傅鹏, 黄大华. 15 kA 四象限运行交流电源的研制[J]. 电力电子技术, 2005, 39(2): 72-74.
 [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
 [4] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.