

# ITER 极向场整流器的可靠性分析

刘迪<sup>1</sup>, 杜少武<sup>1</sup>, 蒋力<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学电气及自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 极向场(PF)整流器是国际热核聚变实验堆(ITER)关键系统之一, 在 ITER 20 年使用寿命期间, 应该具有较高的可靠性和可用性。运用 RAMI(可靠性、可用性、可维护性、可检测性)分析的方法, 首先对系统进行功能划分, 然后在其基础上建立了系统可靠性模型, 通过该模型计算得到 PF 整流器的可靠性和可用性初始值, 最后提出改进方案提高了 PF 整流器的可靠性和可用性, 使之满足 ITER 的需求。

**关键词:** 极向场; 整流器; RAMI 分析; 可靠性; 可用性

**中图分类号:** TL62<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

## 1 引言

ITER 计划将建造、运行一个可以持续燃烧的托卡马克聚变实验堆, 从而验证聚变反应堆的工程技术可行性<sup>[1]</sup>。因为 ITER 是磁约束托卡马克装置, 利用大电流的磁体线圈所产生的强磁场把等离子体约束在很小范围内实现核聚变。这些磁体线圈需要配备许多大功率、大电流直流电源系统, 极向场电源系统就是其中最重要的电源系统之一。

极向场电源系统主要承担为 ITER 极向场超导磁体线圈供电的任务, 对电源系统的可靠性及可用性要求较高。由于所有 PF 整流器结构相同, 所以以 1 个 PF 整流器为例通过 RAMI 分析的方法计算并优化的整流器的可靠性。

## 2 PF 整流器介绍

图 1 为极向场整流器主回路原理图。其中, DS 为交流隔离开关, ES<sub>1</sub> 为交流接地开关, T 为 2 组整流变压器集装箱, CM<sub>1</sub> 为整流柜 1(1 个整流柜中含有 2 组三相全桥整流电路), CM<sub>2</sub> 为整流柜 2, L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub> 为环流电抗器, BP 为旁通装置, DS<sub>1</sub>、

DS<sub>2</sub> 为直流隔离开关, ES<sub>2</sub> 为直流接地开关。电源系统额定输出直流电流 55kA、电压 1.05kV。其主要部件参数列于表 1 中。表 1 中的参数均为系统参数, 在实际设计过程中要考虑裕量, 电压值取 2.5 倍裕量, 电流值取 3 倍裕量。

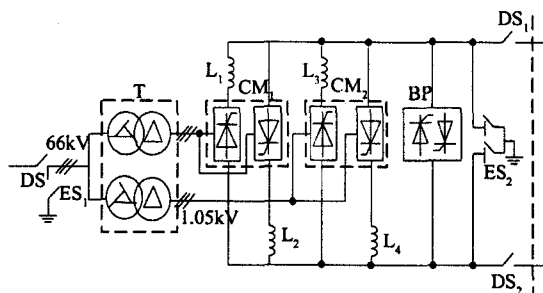


图 1 极向场整流器系统原理简图

## 3 PF 整流器的 RAMI 分析

RAMI 分析主要分成如图 2 所示的 3 个步骤<sup>[2]</sup>: 系统功能分析; 可靠性、可用性计算; 提出改进措施。首先, 绘制出极向场电源的功能分解图; 再根据功能分解图建立系统模型并仿真得到系统可靠性及可用性初始值; 最后, 分析得到的初始值, 提

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-06-08

基金项目: ITER 变流器及电源系统关键技术的研究资助项目(2008GB104001)

作者简介: 刘迪(1988-), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 电工理论与新技术专业。

出改进方案及措施, 提高系统可靠性及可用性。

表1 PF 整流器系统主要参数表

设备/组件	容量 /MVA	额定电压 /kV	额定电流/kA	数量
变压器	42	66/1.05	27.5×0.816(副边)	2
整流柜晶闸管	/	1.35×1.05	27.5/n×0.577	n=12
整流柜熔丝	/	1.35×1.05	27.5/n×0.577	n=12
环流电抗器	/	1.35×1.05	27.5	4
直流隔离开关	/	1.35×1.05	55	2
旁通晶闸管	/	1.35×1.05	55/n	n=10

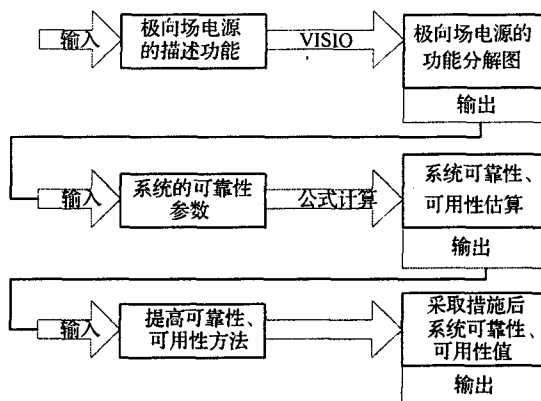


图2 ITER 极向场整流器 RAMI 分析过程

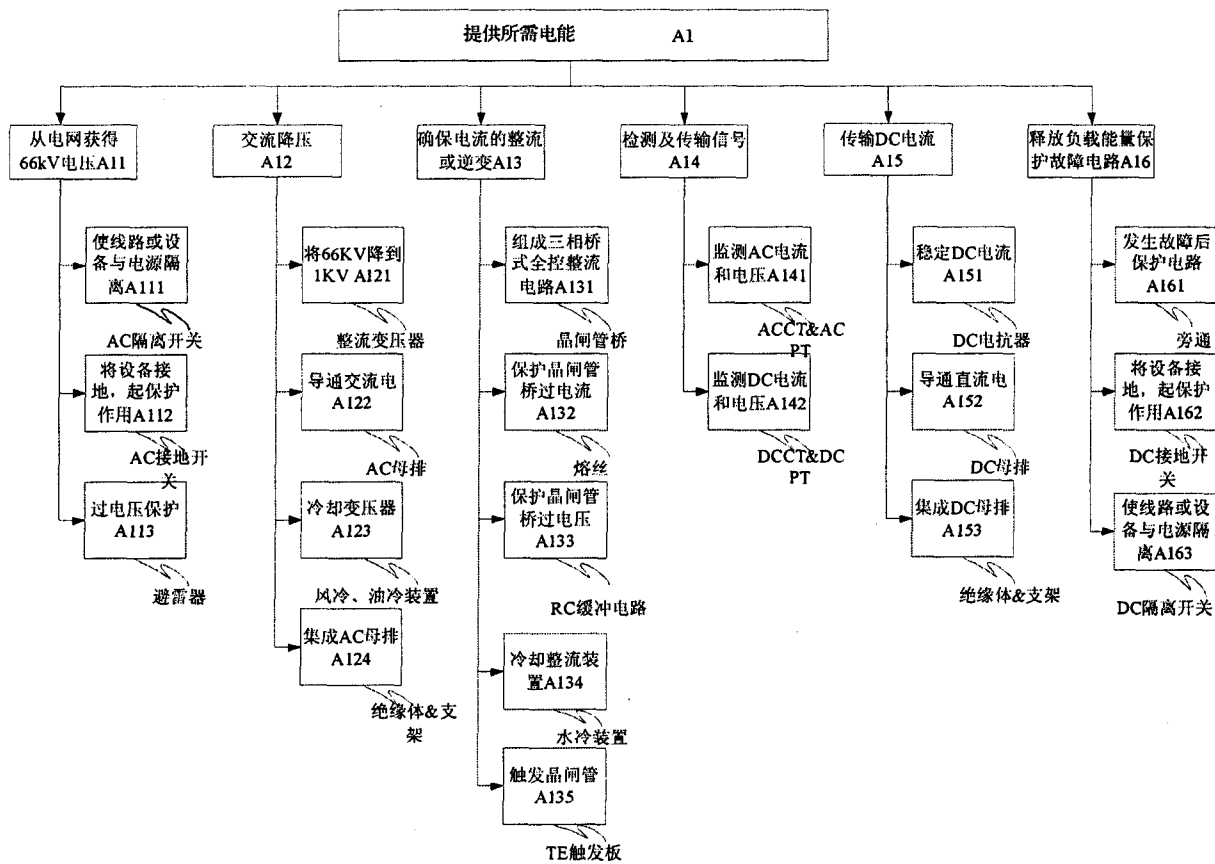


图3 极向场整流器系统功能分解图

### 3.1 PF 整流器功能分析

功能分解是对系统进行 RAMI 分析的第一步, 采用自上而下分层描述的方法, 通过功能分解即可快速了解到系统的各个功能和其相对应的组件以及各个组件之间的可靠性逻辑关系, 从而有助于建

立系统的可靠性模型<sup>[2]</sup>。

图3是PF整流器功能分解图。PF整流器的主要功能是从电网接受交流功率以及将其变换为可以控制的直流功率, 然后向负载PF线圈供电。其主要功能由6个具有不同基本功能且相互独立的子

单元组成。与基本功能对应的是系统的组件，每个组件和 PF 整流器的可靠性存在一定的对应关系。从图 3 中可以看出，底层的组件发生比较严重的故障时，可能会引起其上层的功能故障。而当主要功能发生故障时，会使整个设备或系统的运行受到影响。故 PF 整流器系统为串联系统<sup>[3]</sup>，对于串联系统，其数学模型为：

$$R(A_i) = R(A_{i1})R(A_{i2}) \cdots R(A_{in}) = \prod_{i=1}^n R(A_{ik}) \quad (1)$$

式中， $i$  为单元数； $R(A_{ik})$  为第  $i$  个单元可靠性； $R(A_i)$  为系统可靠性。

第一个单元串联子系统的可靠性数学模型为：

$$R(A_{11}) = R(A_{111})R(A_{112})R(A_{113}) \quad (2)$$

同理可得，其他任意单元串联子系统的可靠性数学模型为：

$$R(A_{in}) = R(A_{in1})R(A_{in2}) \cdots R(A_{inm}) = \prod_{k=1}^m R(A_{in,k}) \quad (3)$$

式中， $n$  为各单元串联子系统个数； $k$  为第  $k$  个串联子系统； $R(A_{in,k})$  为第  $i$  个单元第  $k$  个串联子系统可靠性。

### 3.2 PF 整流器可靠性计算

根据 ITER 初步设计的技术要求，将电气元器件的失效率  $\lambda(t)$  近似看成常数，故选用指数函数可以用来估算各产品的可靠性。元器件的可靠性可表示为：

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} (t \geq 0) \quad (4)$$

如果组件发生故障，那么组件的平均失效间隔

(MTBF)为：

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

下面以整流柜中晶闸管可靠性计算过程为例，晶闸管失效率函数<sup>[4]</sup>为：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E \times 10^{-6} h^{-1} \quad (6)$$

式中各参数值及意义列于表 2 中。

将表 2 中的数值代入式(6)得到整流柜晶闸管失效率和平均失效间隔时间： $\lambda_p = 2.486 \times 10^{-6} h^{-1}$ ；

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = 402252.61 h = 45 y。$$

平均维修时间  $MTTR = 2904 h$ 。其中， $MTTR$  为设备发生故障后，综合考虑运输、更换及维修时间为 4 个月(2904h)。以此方法可计算出部分产品的可靠性，主要器件的  $MTBF$  和  $MTTR$  值列于表 3 中。

### 3.3 PF 整流器可靠性模型

根据系统的工作原理，建立可靠性模型<sup>[5]</sup>如图 4 所示。其中，交流降压是由 2 组整流变压器实现的，整流变压器是 PF 电源关键设备，不允许单台运行，如果 1 台发生故障，系统需要停机维修。从可靠性角度出发，变压器系统属于串联关系。

每组变压器连接 1 个整流柜，每组整流柜中含有 2 组晶闸管桥，每个晶闸管桥由 6 个晶闸管桥臂组成<sup>[6]</sup>。每个桥臂由 11 个晶闸管支路并联形成，每个晶闸管支路又包括触发板、晶闸管、RC 缓冲器、水冷装置和熔丝，如图 5 所示。

表 2 晶闸管可靠性计算参数值

参数名称	$\lambda_b$ 基本失效率	$\pi_T$ 温度系数	$\pi_R$ 电流系数	$\pi_S$ 电压系数	$\pi_Q$ 质量系数	$\pi_E$ 环境系数
数值	0.0022	3.9000	30.0000	9.660	1.0000	1.0000

表 3 主要器件的  $MTBF$  和  $MTTR$  值

功能	器件	$MTBF/h$	$\lambda/10^{-6} h^{-1}$	$MTTR/h$
使线路或设备与电源隔离	交流隔离开关	5000000	0.200	2904
将 66KV 降到 1KV	整流变压器	333333	3.000	2904
变流	整流柜晶闸管	402253	2.486	2904
对晶闸管过电流保护	整流柜熔丝	1960784	0.510	2904
对晶闸管过电压保护	RC 缓冲电路	2000000	0.500	2904
平衡直流电流、抑制环流	环流电抗器	8620690	0.116	2904
保护故障电路	旁通晶闸管	282485	3.540	2904
使线路或设备与电源隔离	直流隔离开关	5000000	0.200	2904

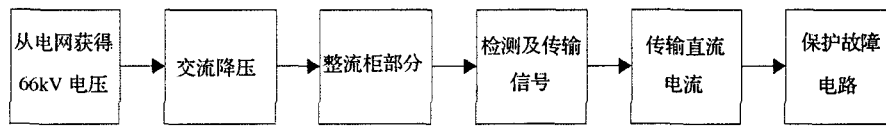


图 4 极向场 PF 整流器可靠性框图

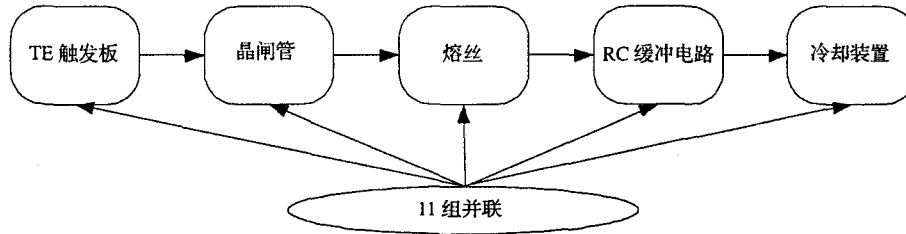


图 5 晶闸管桥臂可靠性框图

对于并联系统，其可靠性计算式<sup>[7]</sup>为：

$$R(T) = 1 - [1 - R(T_1)][1 - R(T_2)] \cdots [1 - R(T_{11})] \quad (7)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^{11} [1 - R(T_i)]$$

式中， $R(T_i)$  为第  $i$  个晶闸管支路可靠性； $R(T)$  为晶闸管桥臂可靠性。

由环流电抗器、直流母排、母排支撑、绝缘体及直流隔离开关组成传输及稳定直流电流单元，如图 6 所示。

旁通单元在整流器系统故障情况下提供旁通路径，即保护故障电路。旁通单元由 2 组晶闸管组成，每组晶闸管含有 10 个晶闸管、水冷和触发板并联支路。

根据各部件的可靠性和维修性数据，通过 Blocksim 软件，输入各组件的失效率  $\lambda$ 、任务结束时间及仿真结束时间，即可仿真出 PF 整流器系统的可靠性和可用性初始值，其值列于表 4 中。

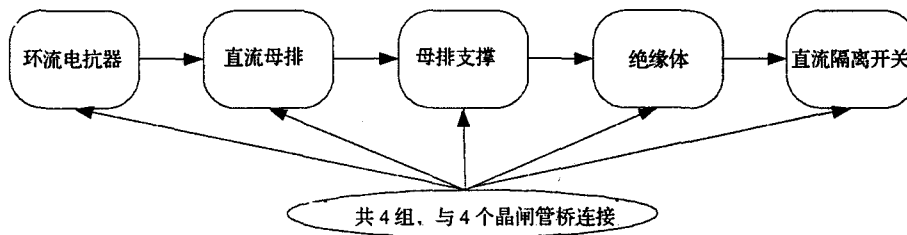


图 6 传输直流电流可靠性框图

表 4 PF 整流器系统可靠性和可用性初始值

装置	可用性/%	仿真结束时间/h	可靠性/%	MTBF/h	$\lambda/10^{-6}$	任务结束时间/h
PF	91.58	11520	98.54	17747.87	56.3448	264

ITER 对单台 PF 整流器可用性的要求是 98%，从表 4 中可以看出，系统的可靠性较高，但可用性却不能满足要求，所以整流器必须提高其可用性。

用平均无故障时间  $MTTF$  来计算可用性，可知：

$$MTTF = MTBF - MTTR \quad (8)$$

由式(8)可知，提高系统可用性的途径有：(1)

提高系统的可靠性 MTBF; (2) 降低系统的维修及等待时间 *MTTR*。

由于所选用产品都具有较高的可靠性, 故主要是降低维修及等待时间, 对主要器件采取的措施<sup>[7]</sup>列于表 5 中。

根据改进措施再次建立系统可靠性模型, 例如

在整流柜晶闸管桥臂中并联冗余晶闸管以降低系统维修时间, 如图 7 所示。最后, 得到系统可靠性及可用性期望值, 列于表 6 中。此时的系统同时具有较高的可靠性和可用性, 已经达到了初步设计阶段的指标。

表 5 提高可用性措施表

器件	措施	降低维修时间 <i>MTTR/h</i>	
		初始值	期望值
交流隔离开关	增加检查次数	2904	24
整流变压器	现在备用维修零件	2904	24
整流柜晶闸管	并联冗余晶闸管	2904	24
整流柜熔丝	现在备用维修零件	2904	24
RC 缓冲电路	现在备用维修零件	2904	24
环流电抗器	现在备用维修零件	2904	96
旁通晶闸管	现在备用维修零件	2904	24
直流隔离开关	增加检查次数	2904	24

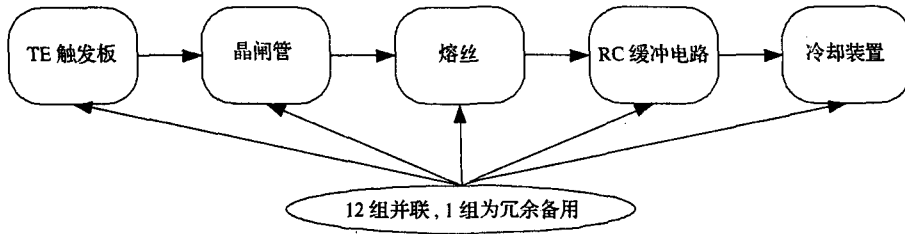


图 7 并联冗余晶闸管可靠性框图

表 6 PF 整流器系统可靠性和可用性期望值

装置	可用性/%	仿真结束时间/h	可靠性/%	<i>MTBF/h</i>	$\lambda/10^{-6}$	任务结束时间/h
PF	99.88	11520	98.54	17747.87	56.3448	264

### 4 结论

在 ITER PF 整流器可靠性分析中采用 RAMI 分析的方法可以方便整流器设计者在设计之初寻找整流器系统可靠性薄弱环节, 从而有针对性地提出改进措施, 提高系统可靠性及可用性, 使之满足 ITER 装置需求。通过 RAMI 分析可以知道:

a. 极向场整流器系统可靠性薄弱环节是整流柜及旁通部分, 通过冗余及现场备用维修零件的方法可提高其可用性。

b. 对系统建立模型并仿真出可靠性及可用性具体数值, 将抽象的可靠性具体化, 为设计和运行

人员提供了准确的设计参数。

### 参考文献:

- [1] 赵君煜. 国际热核聚变实验堆(ITER)计划 [J]. 物理, 2004(4): 257-258.
- [2] Didier V H. ITER RAMI analysis programme [R]. Hefei: Institute of Plasma Physics of CAS, 2012.
- [3] 唐士洲, 陆瑞建, 王瑞宁. UPS 系统可靠性分析 [J]. 通信电源技术, 2011, 6(11): 58.
- [4] GJB\_Z299B, 电子设备可靠性预计手册 [S].
- [5] ZHANG Li-jun. RBD report on PF converter [R]. Hefei: Institute of Plasma Physics of CAS, 2012.
- [6] SHENG Shi-cai. RAMI analysis and preliminary spare part list [R]. Hefei: Institute of Plasma Physics of CAS,

2012.

连海事大学, 2011, (S1): 25-33.

[7] 翟玉杰. 并联冗余通信电源系统可靠性的研究 [J]. 大

## Analysis of ITER poloidal field converter reliability

LIU Di<sup>1</sup>, DU Shao-wu<sup>1</sup>, JIANG Li<sup>2</sup>

(1. School of Electric and Automatic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

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

**Abstract:** The poloidal field (PF) converter belongs to the critical systems of ITER, thus its reliability and availability should maintain a high state through the two decades operation life of ITER. This paper is aiming at improving these two abilities with the RAMI (Reliability, Availability, Maintainability and Inspectability) analysis method. The system functional breakdown is performed at first, then the reliability model is established based on it. The initial reliability and availability of the PF converter is obtained by analysing this model. Finally, by improving the reliability and availability of subsystems, the scheme of the PF converter satisfied the requirements of ITER.

**Key words:** Poloidal field; Converter; RAMI Analysis; Reliability; Availability