

RPN 中间量程电流量程切换问题的研究

李 飞, 赖厚晶, 张国庆, 张黎明, 时维立

(中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要:针对核仪表系统(RPN)中间量程电流量程切换过程容易出现尖峰电流触发意外停堆的问题,提出了一种软件解决方案。大量的工厂测试及现场测试表明,优化后的软件可以有效避免量程切换过程出现电流尖峰,量程切换过渡平滑稳定,系统稳定性显著提高。该方案已在多台核电机组实施,中间量程在不同的堆芯状态均能实现稳定输出,有效避免了尖峰电流触发反应堆意外停堆给电厂带来的经济损失。

关键词:RPN; 中间量程; 量程切换; 软件参数

中图分类号:TP311

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2014)S1-1068-05

doi:10.7538/yzk.2014.48.S1.1068

Research for RPN Intermediate Range Current Range Switch Problem

LI Fei, LAI Hou-jing, ZHANG Guo-qing, ZHANG Li-ming, SHI Wei-li

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

Abstract: One software solution was presented to solve the unexpected reactor trip problem, which was caused by peak current generated during current range switch of intermediate range of nuclear instrument system (RPN). A lot of tests were performed in factory and on site. The results show that the peak current can be avoided effectively using this software solution, the current range can be switched smoothly and the system stability is improved significantly. Furthermore, this software solution was applied in many nuclear power plants, a stable output can be achieved by intermediate range at different core status, and consequently the economic loss caused by unexpected reactor trip can be avoided.

Key words: RPN; intermediate range; rang switch; software parameter

核仪表系统^[1](RPN)用分布于反应堆压力容器外的一系列中子探测器来测量反应堆的功率、功率变化率以及功率的径向和轴向分布等,是直接关系到反应堆安全的重要系统之一。许多涉及反应堆保护的信号从RPN发出,所以RPN可靠、稳定运行是反应堆安全、稳定运

行的前提。RPN中间量程电流变化横跨9个数量级,电流量程的切换始终是薄弱环节,切换过程中输出电流容易出现尖峰超过保护定值从而触发停堆保护。本文以某核电机组在调试启动期间RPN中间量程出现尖峰电流,触发中子通量高报警并达到停堆保护阈值,造成反应

堆停堆为例,对电流量程切换的软件处理机制进行详细分析,结合停堆过程集散控制系统(DCS)^[2]记录及现场的测试数据,找到量程切换出现尖峰电流的原因,并给出一种通过修改软件时序来平滑电流输出的解决方案。

1 RPN 中间量程电流处理机制

RPN 中间量程电流信号跨越 9 个数量级(量程范围为 $10^{-11} \sim 10^{-3}$ A),为保证数字板卡处理的精度和线性度,软件处理设置了 7 个自动切换量程。每个量程工作在一定的范围内,随着电流的增加或减小,电流量程自动切换。电流采用分段计算原理,将中间量程的电流信号分为 U 、 R 两部分进行传输,然后根据式(1)计算得到电流值。

$$I = U \times 10^{R-11} \quad (1)$$

其中: I 为中间量程电流,A; U 为当前量程对应的模拟量信号,V; R 为量程编码,为三位二进

制编码,编码对照列于表 1。

RPN 中间量程信号传输和处理流程如图 1 所示:从 RPN 中间量程探头出来的电流信号通过电缆传输到微电流放大板,将微电流信号转换为 $0 \sim 10$ V 的电压信号和量程信号, $0 \sim 10$ V 的电压信号送模拟信号采集卡,量程信号等数字量送数字信号采集卡,模拟信号采集卡和数字信号采集卡输出的信号均送入中央处理器进行计算,计算结果通过模拟量输出卡输出 $4 \sim 20$ mA 的电流信号和中间量程倍增时间信号到全厂 DCS、ATWT^[3]及 CORETEST^[4]。

参与中间量程电流计算的模拟量及数字量列于表 2。正常情况下,在 RPN 探测器输出电流在有效范围内、量程切换彻底完成、量程编码稳定、偶校验位正确、信号无效标志位为 1 时,表明微电流放大板送入 CPU 的电流信号及量程信号真实有效,CPU 会读取电流及量程信息进行计算。

表 1 中间量程编码对照表

Table 1 Reference list of intermediate range code

奇偶校验位	量程编码 (A2A1A0)	电流/A		
		对应 0.1 V 输入	对应 1 V 输入	对应 10 V 输入
1	001	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}
1	010	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}
0	011	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}
1	100	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
0	101	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}
0	110	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
1	111	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}

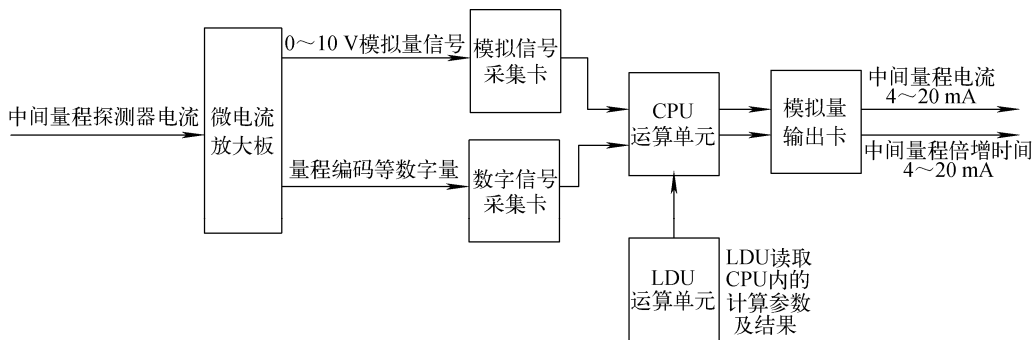


图 1 RPN 中间量程电流传输和处理示意图

Fig. 1 Transfer and process diagram of RPN intermediate current

表 2 参与中间量程电流计算的模拟量及数字量

Table 2 Analog and digital variable involved in intermediate current calculation

变量名	信号组成	来源板件	额定值	送往板件	电气量程/V	物理量程/A
AI1001	探头信号	微电流放大板	0.1 V	模拟信号采集卡	0~10	$10^{-11} \sim 10^{-3}$
BI1001	量程编码 A0	微电流放大板	1	数字信号采集卡		
BI1002	量程编码 A1	微电流放大板	0	数字信号采集卡		
BI1003	量程编码 A2	微电流放大板	0	数字信号采集卡		
BI1004	偶校验位	微电流放大板	1	数字信号采集卡		
BI1005	信号无效标志位	微电流放大板	1	数字信号采集卡		

参与中间量程电流及倍增时间计算的软件参数共有 13 个。PAR001 为动态滤波^[5-6]参数 LAMMA, PAR002 为动态滤波参数 TPS_MAX, PAR003 为动态滤波参数 LAMBDA, PAR004 为量程切换延时参数(缺省值 0.01 s), PAR005、PAR006 为一阶滤波常数 ζ_1 和 ζ_2 , PAR007 为量程 1 切换额外延时参数(缺省值 1.5 s), PAR008 为量程 2 切换额外延时参数(缺省值 0.3 s), PAR009 为量程 3 切换额外延时参数(缺省值 0.03 s), PAR010~PAR013 为量程 4~7 切换额外延时参数(缺省值 0 s)。其中, PAR001~PAR003 为倍增周期计算参数, 不参与中间量程电流计算。在每次量程切换时, 信号无效参数“INVALIDITY(BI1005)”会变为 0, 在此信号重新变为 1 的上升沿, 会触发对应量程切换额外延时参数, 因此, 整个量程切换持续时长为 INVALIDITY 为 0 的时长+PAR004+额外延时参数(PAR007~PAR013), 在整个量程切换期间, “Change_in_progress”信号置 1。

2 量程切换过程中出现尖峰电流问题研究

现场测试数据表明, RPN 系统各通道绝缘

良好、连续性无异常, 因此重点分析信号处理环节。采用记录仪、电流发生器进行测试, 在微电流放大板输入端口接入电流发生器, 在其输出端子接入记录仪。测试框图如图 2 所示, 让电流发生器连续产生如图 3 所示的上升序列及下降序列波形, 波形周期为 2 s, 持续 10 min, 让电流放大板频繁进行量程切换, 观察记录仪。

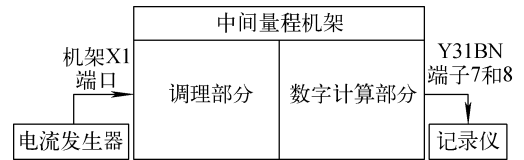


图 2 测试框图

Fig. 2 Test block diagram

在量程切换点附近观察到尖峰电流, 而非量程切换点信号则正常输出。测试结果列于表 3。在持续 10 min、600 次的上升波形测试中, 从量程 3 切换到量程 4 共观察到 7 次电流尖峰, 在 600 次的下降波形测试中, 从量程 4 切换到量程 3 共出现 3 次电流尖峰。

分析 RPN 中间量程电流处理机制, 特别是量程切换环节, 可以初步确定产生尖峰电流

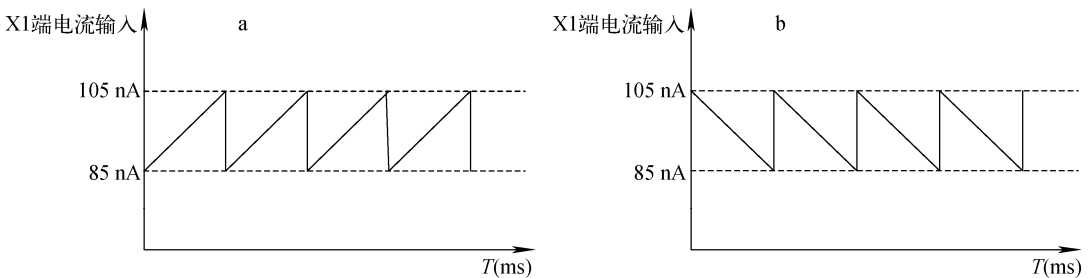


图 3 上升波形序列(a)和下降波形序列(b)

Fig. 3 Rise sequence (a) and down sequence (b) of wave form

的原因因为量程编码变化不同步:从量程 3 到 4 或量程 4 到 3 的切换过程中,由于二进制翻转的速度不同,会产生一个中间的暂态过程量程 7,如表 4 所列。同时,可从图 4 的变量时序图^[7]看到产生电流尖峰的原因。此暂态存在时间十分短暂,小于 CPU 采集周期。如暂态恰好被 CPU 采集到,则有尖峰电流出现;如暂态未被 CPU 采集到,则量程可稳定切换。从测试结果可看到,在上升波形 600 次的测量中,共观察到 7 次电流尖峰,在下降波形 600 次的测量中,共观察到 3 次电流尖峰,两次测量电流尖峰出现的次数并不相等,证明尖峰的出现具有随机性,与 CPU 的采样周期和量程切换过程各变量的变化时序相关。案例中停堆保护动作触发时中间量程电流为 8.66×10^{-8} A,恰好是量程 4 到量程 3 的切换点,从侧面验证了电流尖峰出现在量程切换点附近。

表 3 测试结果
Table 3 Test result

波形	持续时间/ min	量程 3 和 4 的切换次数	电流 尖峰次数
上升波形	10	600	7
下降波形	10	600	3

表 4 电流切换的暂态
Table 4 Range switch transient

量程	量程编码	电流/A
3→4	011→100	$8.66 \times 10^{-8} \rightarrow 0.866 \times 10^{-7}$
7(暂态)	111	0.866×10^{-3}
4→3	100→011	$0.866 \times 10^{-7} \rightarrow 8.66 \times 10^{-8}$

3 解决方案

分析软件中各变量的时序,结合测试结果,找到了出现尖峰电流的根本原因。通过分析软件中中间量程电流计算的实现方法,可采取优化软件的办法来解决此问题。在软件设计中已预留延时参数 PAR007~PAR0013,用来确保量程切换彻底完成,量程编码稳定后,CPU 才开始读取量程参数。原始的软件参数设置中,量程 4 到量程 7 的范围内,额外延时参数的缺省值为 0。

通过 LDU(就地显示单元)和专用软件参数修改工具,对额外延时参数 PAR00~PAR013 进行修改,将量程 4~7 的量程切换额外延时参数改为 0.01 s,即在原来的基础上增加 0.01 s 的延时,待量程切换彻底完成且量程编码稳定后,CPU 才开始读取量程参数信息。修改参数后各参数的时序图如图 5 所示。

在完成参数修改后进行了大量测试。在工厂内进行了 600 次测试,在现场利用搭建的测试平台进行了 1 000 次测试,测试结果列于表 5。两次大规模测试均未观察到电流尖峰脉冲,表明此问题得到圆满解决。

4 总结

通过现场测试及软件分析,找到了中间量程闪发电流尖峰的根本原因。通过研究 RPN 中间量程电流软件算法实现找到了解决方案。方案在工厂及核电现场进行了大量的测试,验证了解决方案的可靠性。目前在核电机组批量化建设的背景下,此方案可向同类型的核电机

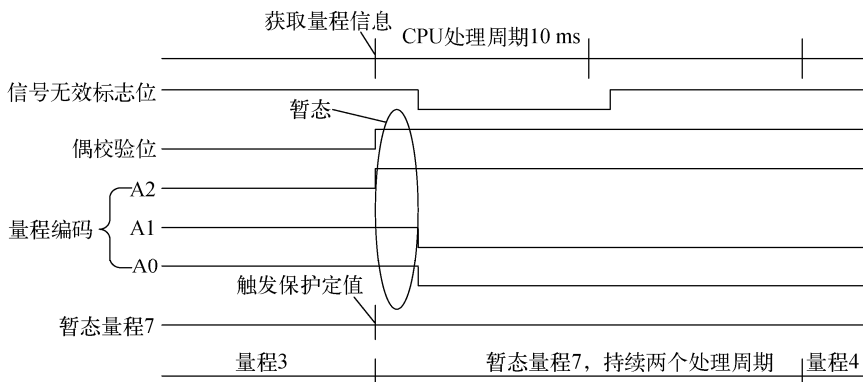


图 4 从量程 3 到量程 4 切换的变量时序图

Fig. 4 Sequence chart of rang switch from 3 to 4

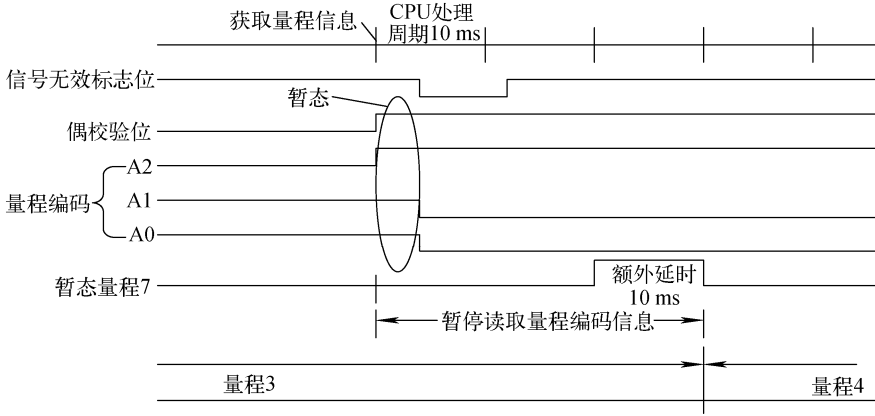


图5 修改参数后量程3到4切换的时序图

Fig. 5 Sequence chart of rang switch from 3 to 4 after modification

组进行推广,可有效避免其他核电机组由于RPN出现电流尖峰造成非计划停堆,为电厂挽回不必要的经济损失,为机组的安全稳定运行提供保障。

表5 改进后的测试结果

Table 5 Test result after improvement

波形	持续时间/ min	量程3和4 的切换次数	电流 尖峰次数
上升波形	10	600(工厂内)	0
下降波形	10	600(工厂内)	0
上升波形	10	1 000(现场)	0
下降波形	10	1 000(现场)	0

参考文献:

- [1] 贺禹,濮继龙,高立刚,等. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社,2004: 255-267.
- [2] 范新举. DCS系统在核电站中的应用[J]. 机电信息,2010(24):191-192.
FAN Xinju. The application of DCS in nuclear power plant[J]. Mechanical and Electrical Information, 2010(24): 191-192(in Chinese).
- [3] 郭城. 大亚湾及岭澳核电站 ATWT 保护失电风险[J]. 核动力工程,2010,31(4):61-65.
GUO Cheng. ATWT power loss risk analysis of Da Ya Bay and Ling Ao nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineer, 2010, 31(4): 61-65(in Chinese).
- [4] 姚则悟,季华祥,陈志成,等. 压水堆零功率装置

上的堆物理和物理启动模拟实验[J]. 核动力工程,1995,16(1):46-50.

YAO Zewu, JI Huaxiang, CHEN Zhicheng, et al. Reactor physics and start up simulation experiment on zero power PWR[J]. Nuclear Power Engineer, 1995, 16(1): 46-50(in Chinese).

- [5] 郭文琪,刘冬林,赵玛璐. 重水型研究堆的堆功率和周期实时监测研究[J]. 原子能科学技术,1996,30(6):497-500.

GUO Wenqi, LIU Donglin, ZHAO Manao. A study on real-time monitoring of power and period for heavy water research reactor (HWRR) [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1996, 30(6): 497-500(in Chinese).

- [6] 熊华胜,李铎,张良驹,等. 数字化核测量系统反应堆倍周期计算的敏感性分析[J]. 原子能科学技术,2012,46(增刊):417-420.

XIONG Huasheng, LI Duo, ZHANG Liangju, et al. Sensitivity analysis of nuclear reactor doubling time calculation in digital nuclear neutron monitoring system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(Suppl.): 417-420(in Chinese).

- [7] 刘育明,刘德民. 数字逻辑电路真值表和时序图测量方法的研究[J]. 西北纺织工学院学报,1991(4):90-95.

LIU Yuming, LIU Demin. Research for the truth table and sequence diagram of digital logic circuit[J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology, 1991(4): 90-95 (in Chinese).