

文章编号: 0258-0926(2017)04-0051-05; doi:10.13832/j.jnpe.2017.04.0051

# CPR1000 核电站机组负荷变化率算法研究

兰 兵, 孟庆军, 杨景利, 蔡亚伟

北京广利核系统工程有限公司, 北京, 100094

**摘要:** 在 CPR1000 核电厂的工艺控制中, 要求机组负荷变化率超过 200 MW/min 时, 疏水阀打开的响应时间应在 2~10 s 以内, 且需要抵抗 1~2 s 的扰动。在数字化仪控系统 (DCS) 中通常使用微分算法或周期迭代法根据实时及历史负荷值计算机组负荷变化率, 但无法实现以上工艺要求。对这 2 种常用算法进行了仿真和分析, 在此基础上提出一种优化的滑动平均值周期迭代法。该算法结合了滑动平均算法的抗扰特性以及周期迭代法计算变化率的功能, 可满足该特定工艺的控制要求, 已在 CPR1000 核电厂的 DCS 控制中获得应用。

**关键词:** 核电厂; 数字化仪控系统 (DCS); 机组负荷; 变化率; 滑动平均值; 周期迭代法

**中图分类号:** TP13 **文献标志码:** A

## Analysis and Application of Load Change Rate Algorithm For CPR1000 Nuclear Power Plant

Lan Bing, Meng Qingjun, Yang Jingli, Cai Yawei

China Techenergy Co. Ltd, Beijing, 100094, China

**Abstract:** According to the requirement of the controlling processing for CPR1000 nuclear power plant, the drain valve should be opened in 2~10 s, and could resist 1~2s interference. Generally, the differential algorithm or iteration algorithm can be used for the change rate calculation in DCS system, but they cannot meet the above requirement. Based on the simulation and analysis of these two algorithm, an optimized sliding average iteration algorithm for the calculation of unit load is presented. This algorithm combines the disturbance-rejection characteristics of sliding average algorithm and the change rate calculation function of cycle iteration algorithm, and meets the certain requirement. This algorithm has been applied in the DCS process control of CPR1000 several nuclear power plant.

**Key words:** Nuclear power plant, Digital Control System (DCS), Unit load, Change Rate, Sliding average algorithm, Iteration algorithm

## 0 引 言

近年来, 国内新建核电厂都采用数字化仪控系统 (DCS) 进行电厂的运行和控制。反应堆一般由 DCS 控制的功率控制系统, 应用非线性二次型最优控制<sup>[1]</sup>等理论来调节反应性, 实现负荷调节<sup>[2]</sup>。同时, DCS 实时采集机组负荷值, 在机组负荷快速变化时, DCS 需要及时准确地做出响应, 通过预先编制的逻辑程序触发设备动作, 以

达到稳定工况<sup>[3]</sup>, 避免跳堆、跳机事件的发生, 同时也通过一系列的设备连锁动作, 保护重要设备在极端工况下免受损坏<sup>[4]</sup>。例如机组负荷变化过大时, 汽-水分离再热器疏水阀应及时开启, 避免疏水箱水位过高引发跳机<sup>[5]</sup>。

机组负荷变化率由 DCS 根据当前负荷和历史负荷, 通过一定的算法计算得出, 一旦该值超过某一阈值, 将触发保护逻辑以及设备动作。对

于机组负荷变化率的计算，一般可使用微分法或周期迭代法实现。

在 CPR1000 核电厂的工艺控制中，要求机组变化率超过 200 MW/min 时，疏水阀打开的响应时间应在 2~10 s 以内，且需要抵抗 1~2 s 的扰动。以上 2 种算法无法满足该工艺的控制要求。本文使用这 2 种常用算法进行仿真计算，分析了无法满足控制要求的原因。在此基础上，综合滑动平均值的抗扰特性和周期迭代法计算变化率的功能，提出可满足控制要求的滑动平均值周期迭代算法。

### 1 常用算法分析

#### 1.1 微分法

在 DCS 中，微分法常用来计算某一输入在当前时刻的变化率<sup>[6]</sup>，其差分方程为：

$$A_V(K) = \frac{T_D [I_N(K) - I_N(K-1)] + \frac{T_D}{K_G} \times A_V(K-1)}{T_S + \frac{T_D}{K_G}} \quad (1)$$

式中， $A_V(K)$ 为  $k$  时刻变化率； $I_N(K)$ 为  $k$  时刻时的输入模拟量值； $T_D$  为微分时间； $K_G$  为微分增益； $T_S$  为运算周期<sup>[7]</sup>。

核电机组的 DCS 平台的控制器运算周期  $T_S$  一般为 20~100 ms，在此以  $T_S=50$  ms 为例计算。

$T_D$  反映的是  $A_V$  达到瞬时变化后，回归到稳定状态（稳定的速率状态）的影响时间。但是， $T_D$  并不表示波动到稳定的时间，只是影响回归时间的长短，并不直接等于回归的实际所需时间。

微分算法对于阶跃输入和匀速变化输入的响应曲线分别如图 1 和图 2 所示。

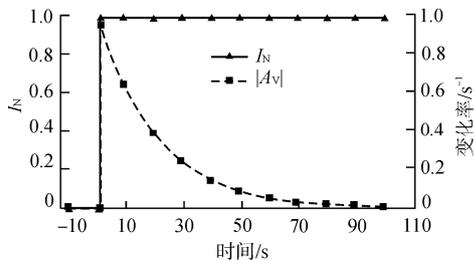


图 1 微分算法对阶跃输入的响应  
Fig. 1 Response Curve of Differential Algorithm with Step Input  
( $T_D=1$  s,  $T_S=0.05$  s,  $K_G=1$ )

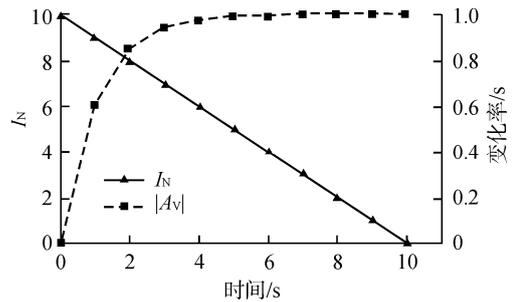


图 2 微分算法对匀速变化输入的响应  
Fig. 2 Response Curve of Differential Algorithm with Uniform Change Input  
( $T_D=1$  s,  $T_S=0.05$  s,  $K_G=1$ )

对于阶跃输入，微分的输出  $A_V$  最终会回归到 0。 $T_D$  越大，则回归时间越长； $T_D$  越小，则回归时间越短。

对于匀速变化，微分的输出  $A_V$  最终会回归到以  $T_D$  为单位的速率值，即匀速变化的变化速率。

#### 1.2 周期迭代法

周期迭代法是用当前时刻的输入值减去前  $T$  时刻的输入值，除以时间  $T$ ，则得到此前  $T$  时刻到当前时刻的输入速率变化。其差分方程为：

$$A_V(K) = \frac{1}{T} \left[ I_N(K) - I_N \left( K - \frac{T}{T_S} \right) \right] \quad (2)$$

式中， $T$  为固定时间间隔，该时间间隔为  $T_S$  的整数倍。

周期迭代法对于阶跃输入和匀速变化输入的响应曲线分别如图 3 和图 4 所示。

对于阶跃输入，迭代算法输出值  $A_V$  会跟随阶跃输入一同发生阶跃变化，持续固定时间间隔  $T$  后， $A_V$  值阶跃变化为 0。

对于匀速变化的输入，迭代算法输出值  $A_V$  以固定的速度增加到以  $T$  为单位的速率变化率，之后保持不变。

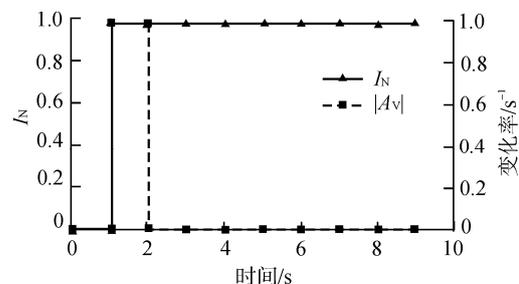


图 3 周期迭代法对阶跃输入的响应 ( $T=1$  s)  
Fig. 3 Response Curve of Iteration Algorithm with Step Input ( $T=1$  s)

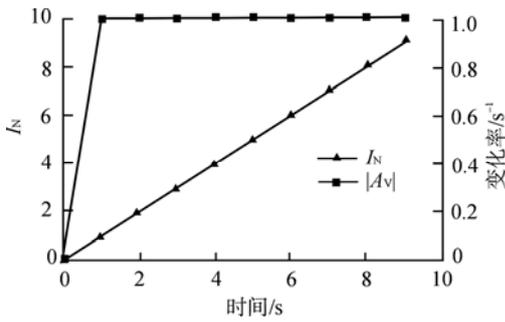


图 4 周期迭代法对匀速变化的响应( $T=1$  s)  
Fig. 4 Response Curve of Iteration Algorithm with Uniform Change Input ( $T=1$  s)

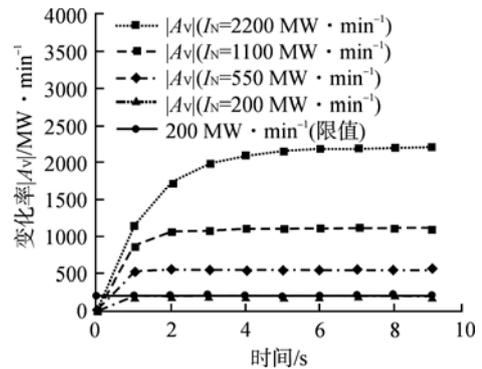


图 6  $T_D=1$  s 时, 不同变化率的响应曲线  
Fig. 6 Response Curve of Differential Algorithm with Different Change Rate Inputs while  $T_D=1$  s

## 2 微分法和周期迭代法的仿真分析

在 DCS 组态软件中, 分别使用 2 种算法进行仿真计算。施加速度为 200、550、1100、2200 MW/min 的输入, 观察算法的输出曲线以及对于限值 200 MW/min 的越限判断时间, 以确定算法是否满足前述的工艺控制要求。此处的 200 MW/min 越限判断时间即为工艺需求中的响应时间。

### 2.1 微分法

使用微分算法计算变化率时, 对于恒定变化率的输入, 微分时间越短, 响应时间越小, 如图 5 所示。对于同一微分时间, 输入的变化速率越大, 响应时间越小, 如图 6 所示。

图 5 中,  $|Δv|$  曲线为算法的输出曲线, 横线为限值 200 MW/min, 曲线与横线的相交点为越限判断点, 该点对应的的时间即为响应时间。

从以上仿真结果可以看出, 要满足工艺要求,

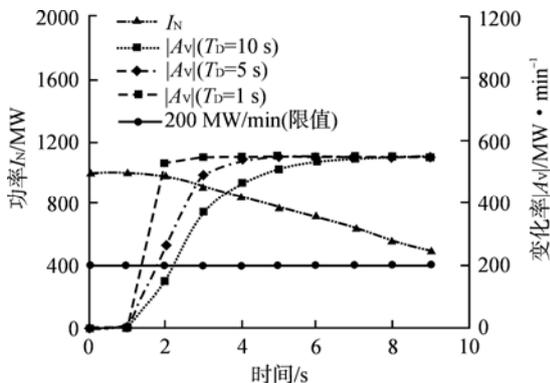


图 5 固定变化率为 550 MW/min 时不同微分时间的微分算法响应曲线  
Fig. 5 Response Curve of Derivative Time Differential Algorithms with Uniform Change Rate Input 550 MW/min

必须确定出一个最优的微分时间。通过极值法可求出可用的最大微分时间  $T_{D,max}$  和最小微分时间  $T_{D,min}$ , 只要  $T_{D,min} < T_D < T_{D,max}$  即可满足要求。

根据工艺要求, 极值法的计算方式如下:

$T_{D,max}$ :  $I_N$  变化率为 200 MW/min, 响应时间为 10 s, 此时的  $T_D$  即为最大微分时间。

$T_{D,min}$ :  $I_N$  变化率为 200 MW/min, 响应时间为 2 s, 此时的  $T_D$  即为最小微分时间。

使用逼近法求得  $T_{D,max}=1.1$  s,  $T_{D,min}=18.5$  s, 由于  $T_{D,min} > T_{D,max}$ , 无法求得合适的微分时间  $T_D$  来同时满足响应在 200~2200 MW/min 的速率区间, 响应时间为 2~10 s 的要求。

因此, 使用微分法无法满足前述的工艺控制要求。

### 2.2 周期迭代法

周期迭代法对于响应时间可以很精确地进行控制, 只要设置固定的时间间隔为需要的响应时间即可。按照工艺要求, 设置固定间隔时间为 10 s, 该算法对于不同匀速率变化的输入响应曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 当时间间隔为 10 s 时, 周期迭代法对于 200 MW/min 输入的响应时间为 10 s; 但对于 2200 MW/min 的输入, 响应时间略小于 1 s, 不能满足工艺控制要求中响应时间为 2~10 s 的要求。

因此, 周期迭代法也无法满足前述的工艺控制要求。

### 2.3 结果对比分析

由仿真结果分析可以看出, 对于微分算法, 没有合适的微分时间来满足工艺要求, 且微分时间越小, 对于扰动的抵抗能力越差<sup>[8]</sup>。

周期迭代法虽然可以将响应时间控制在 1~10 s 内, 基本满足响应时间的要求, 但由于周期迭代法的输出和输入是纯线性的关系, 输出会跟随输入以相同的频率变化, 没有任何抗干扰能力。对输入使用滤波算法处理后再使用周期迭代法也可基本满足工艺控制的要求。

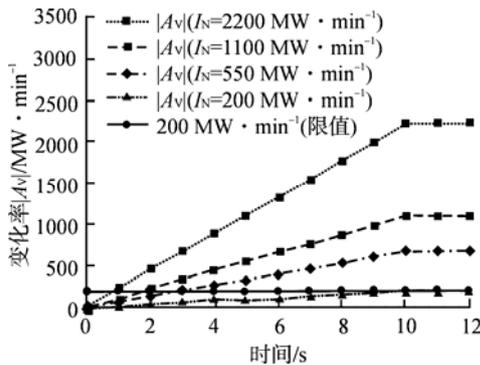


图 7 不同匀速率输入的周期迭代法仿真结果 (T=10 s)  
Fig. 7 Response Curve of Iteration Algorithm with Different Uniform Change Rate Inputs(T=10 s)

### 3 滑动平均值周期迭代法

周期迭代法在计算变化率上比较直观, 易于理解, 便于工程调试, 但不具备抗干扰的能力。工程使用中, 对输入信号进行滑动平均值的计算后, 将该平均值作为周期迭代法的输入进行计算, 解决了抗干扰的问题。其差分方程见式 (3) 和式 (4)。

$$A_{VR}(K) = \frac{T_S}{T} \left[ I_N(K) + I_N(K-1) + \dots + I_N\left(K - \frac{T}{T_S}\right) \right] \quad (3)$$

$$A_V(K) = \frac{1}{T} \left[ A_{VR}(K) - A_{VR}\left(K - \frac{T}{T_S}\right) \right] \quad (4)$$

式中,  $A_{VR}(K)$  为  $k$  时刻, 往前  $T$  时间段内的速率平均值。

#### 3.1 滑动平均周期迭代法仿真分析

分别使用周期迭代法和滑动平均值周期迭代法进行仿真, 并在输入数据中插入一个周期的扰动, 观察抗扰动情况, 仿真结果见图 8。

由图 8 可以看出, 滑动平均周期迭代法比周期迭代法抗扰动能力要强, 但响应时间为周期迭代法的 2 倍, 为了满足该问题的需求, 还需要调整固定时间间隔, 以达到较好的效果。

通过设置不同的间隔时间对各变化率进行仿真, 得到表 1 数据。

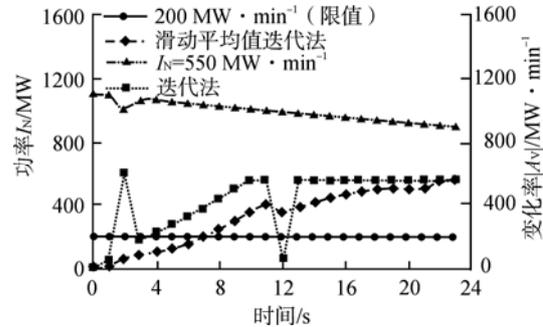


图 8 加入一周期波动的周期迭代法及滑动平均值迭代法仿真结果 ( $I_N$  变化率为 550 MW/min,  $T=10$  s)  
Fig. 8 Response Curve of iteration algorithm and sliding average iteration algorithm( Change Rate of  $I_N$  550 MW/min,  $T=10$  s)

表 1 各匀速率下滑动平均迭代法的理论数值响应时间

Table 1 Theoretical Response Time of Sliding Average Iteration Algorithm with Different Uniform Speed Inputs

变化率/ MW · min <sup>-1</sup>	响应时间/s	
	时间间隔 10 s	时间间隔 5 s
200	20	10
550	9	4
1100	6	3
2200	4	2

由表 1 看出, 当滑动平均迭代法的固定间隔周期为 5 s 时, 其正好符合本问题的要求。但固定间隔周期越短, 其对抗扰动也就越敏感, 固定间隔周期可以在现场调试期间视实际运行情况进行调整。

另外, 由于该方法需要使用 2 组数组来进行数据的暂存, 需要耗费的控制站的资源也较多, 增加固定间隔周期, 则要相应的增加数组的长度。如果固定间隔的时间太长, 则会超出控制站可用的资源, 在实际使用过程中必须注意。

#### 3.2 工程实现方式

由以上分析可以看出, 使用滑动平均周期迭代法来计算核电机组的功率变化率可满足前述的工艺控制要求, 实际工程上解决该问题需要通过组态的方式实现。在 DCS 的软件组态中, 可使用 ST 语言编制自定义功能块, 再在程序组态中调用实现。程序流程图如图 9 所示。

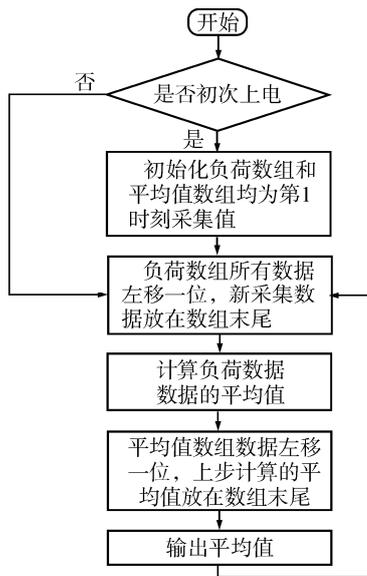


图9 滑动平均值周期迭代法 DCS 程序流程图

Fig. 9 Flow Chart for DCS Program of Sliding Average Iteration Algorithm

#### 4 结束语

CPR1000 核电厂机组负荷率在 200~2200 MW/min 之间变化时, 工艺系统对要求响应时间为 2~10 s, 常用的微分法和周期迭代法均无法满足要求。文中提出的滑动平均值周期迭代法满足

工艺要求, 且具备一定的抗干扰能力, 易于在 DCS 系统中实现。该算法可应用于所有 CPR1000 的核电机组。

目前该算法已在部分 CPR1000 核电厂的 DCS 系统中进行了实际应用, 取得了良好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 赵福宇. 压水反应堆负荷跟踪的最优控制[J]. 核科学与工程, 2000, 20(3): 282-288.
- [2] 施希. 压水堆核电厂负荷跟踪系统设计与特性研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(6): 102-105.
- [3] 余文奇. 压水堆核电机组负荷跟踪能力综述[J]. 中国能源, 2011, 33(3): 38-40.
- [4] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社, 2004.
- [5] 张磊磊. 汽水分离再热器设计[J]. 热力透平, 2015, 44(4): 280-283.
- [6] 胡友森. CPR1000 核电机组核功率变化率保护通道研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(6): 88-91.
- [7] 王积伟. 控制理论与控制工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [8] 赖海龙. 压水堆负荷跟踪建模及其功率控制系统的优化与仿真[D]. 上海: 上海电力学院学位论文, 2014.

(责任编辑: 张明军)