

# 基于 WLMS 算法的高压断路器可控开断故障电流研究

方春恩<sup>1</sup>, 林 蔓<sup>1</sup>, 李 伟<sup>1</sup>, 袁宇春<sup>1,2</sup>, 张彼德<sup>1</sup>

(1. 西华大学, 四川 成都 610039; 2. 成都府河电力自动化成套设备有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 可控开断故障电流能有效提高断路器的开断能力和延长其电寿命。断路器可控开断故障电流的关键是快速提取故障电流参数, 准确预测开断过程中电弧熄灭时的故障电流零点, 确定断路器触头最佳分离时刻。采用加权最小均方差算法 WLMS 实现对故障电流参数估计, 运用  $F_0$  假设检验方法提取故障电流初始相角, 并采用自适应算法改变采样数据窗, 从而快速预测故障电流零点。采用 MATLAB 建立高压断路器可控开断故障电流模型和故障录波数据, 并对提出算法的性能进行了测试验证, 测试结果表明, 提出算法能够在故障发生后 10 ms 内准确地预测出电流过零点, 并且估计的电流零点误差小于  $\pm 1$  ms。

**关键词:** 可控开断; 燃弧时间; 自适应检测算法

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0040-04

## Investigation on Controlled Fault Current Interruption of High Voltage Circuit Breaker Based on WLMS Algorithm

FANG Chun-en<sup>1</sup>, LIN Man<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, YUAN Yu-chun<sup>1,2</sup>, ZHANG Bi-de<sup>1</sup>

(1. Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Chengdu Fuhe Power Automation Complete Equipment Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Controlled interruption of fault currents can increase interrupting capacity and electrical lift of a high voltage circuit breaker. One of the most important issues for controlled interruption of fault current is to rapidly extract fault current parameters in order to predict the zero crossing of the fault currents as targets for synchronizing the opening command to the circuit breaker so as to achieve a pre-determined optimum arcing time. A quickly detecting approach based on weighed least mean squares (WLMS) for the fault current parameters is presented. And the  $F_0$  hypothesis test is used to detect the initial phase angle of the fault current, and the data sampling window size is changed adaptively. Numerical simulation tests of the proposed method are conducted using both artificial network data from the simulation of MATLAB and actual disturbance recording data. The results show that the proposed method can predict zeros of the fault current within half cycle after fault initiation, and its prediction errors are less than  $\pm 1$  ms.

**Key words:** controlled interruption; arcing time; adaptive self-checking algorithm

## 0 引言

随着电力系统的快速发展和输电容量的不断增加, 对电网安全、可靠稳定运行提出了更高要求。断路器作为电力系统中用于控制、保护的重要设备, 其故障电流开断能力和电寿命对于电力系统可靠运行至关重要。在电网中运行的高压断路器, 其触头结构和触头材料已经确定, 断路器的开断能力和电寿命主要受输入触头间隙电弧能量和触头电磨损的影

响。断路器开断过程中, 电弧能量  $W$  可表示为

$$W = \int_{t_s}^{t_{cz}} U_{arc}(t) \cdot i_f(t) dt \quad (1)$$

式(1)中,  $U_{arc}$  为电弧电压;  $i_f$  为开断故障电流;  $t_s$  为断路器触头分离时刻;  $t_{cz}$  为电弧熄灭时电流过零点。因此, 采用故障电流可控开断技术, 控制断路器触头分离时刻, 使得开断过程中电弧电流经过最佳燃弧时间(接近最小燃弧时间)过 0, 从而减少触头平均燃弧时间和峰值电弧电流, 有效提高断路器的开断能力, 减少触头烧损<sup>[1-4]</sup>。高压断路器可控开断故障电

收稿日期: 2009-06-25; 修回日期: 2009-08-16

基金项目: 四川省教育厅重点项目资助(07ZA1087、2005A119)。

作者简介: 方春恩(1975), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能化电器方面研究。

流原理见图1。

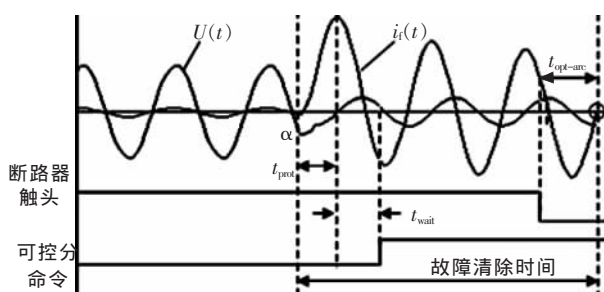


图1 可控开断故障电流原理

图1中,  $t_{prot}$  为继电保护装置响应时间;  $t_{opt-arc}$  为断路器最佳燃弧时间;  $t_{wait}$  为断路器延迟分闸时间;  $U(t)$  为电网电压;  $i_f(t)$  为开断故障电流;  $\alpha$  为故障初始相角。从图1可知, 系统发生短路故障后, 可控断路器系统首先预测一个目标电流零点, 在确认继电保护装置命令, 延迟等待  $t_{wait}$  后,  $t_{cz}$  控制断路器触头在特定时刻分离, 断路器在经过最佳燃弧时间后开断电路。为了保证电力系统尽快切除故障, 可控断路器系统必须在继电保护装置响应时间  $t_{prot}$  ( $t_{prot}$  通常小于 10 ms) 内完成故障电流零点预测; 但由于短路故障的多样性和直流衰减分量的影响, 故障电流不是周期性过 0, 增加了电流零点和触头最佳分离时刻确定的难度。如何快速准确估计故障电流的特征参数和预测故障电流零点是可控开断故障电流必须解决的核心问题之一。

文[5]提出了一种“安全点算法”用以预测故障电流零点, 该算法用于三相系统时做了很多保守的折中处理, 降低了可控开断的可靠性。笔者在前期研究工作基础上<sup>[6-9]</sup>, 采用改进的自适应 WLMS 算法并结合假设验证, 实现系统故障初始时刻检测, 故障电流特征参数的快速估计和电流零点的准确预测。仿真结果和电力系统故障录波数据验证了笔者提出的算法的有效性和快速性, 为故障电流可控开断提供了理论依据和实现基础。

## 1 自适应检测算法原理

### 1.1 故障电流参数估计

电力系统中故障电流主要由基波电流和衰减直流分量组成, 通常故障电流数学模型可表示为

$$\begin{cases} i_f(t) = I_F [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\alpha - \varphi) e^{(-t/\tau)}] + I_0 e^{(-t/\tau)} \\ \tau = \frac{L}{R} \\ \varphi = \arctan(\omega \cdot \tau) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $I_F$  是故障电流基波幅值;  $I_0$  是故障初始电流值;  $\omega$  是电网角频率;  $\alpha$  是故障初始电压相角;  $\tau$  是

直流分量衰减时间常数;  $L$  是系统电源至故障处的等效电感;  $R$  是系统电源至故障处的等效电阻。

在故障电流可控开断过程中, 为了预测电弧熄灭时电流过零点, 需要获得故障电流的几个主要特征参数  $I_F$ 、 $I_0$ 、 $\alpha$ 、 $\varphi$ 、 $\omega$  和  $\tau$ 。其中  $\omega$  由系统频率决定, 故障初始相位角  $\alpha$  和故障电流初始值  $I_0$  可以由故障初始时刻确定。式(2)中故障电流  $i_f(t)$  的衰减直流分量用泰勒级数表示

$$\begin{cases} I_{DC} \cdot e^{-t/\tau} = I_{DC} - I_{DC}/\tau + \sum_{n=2}^{\infty} I_{DC} \frac{1}{n!} \cdot \left(-\frac{t}{\tau}\right)^n \\ I_{DC} = I_F \sin(\alpha - \varphi) + I_0 \end{cases} \quad (3)$$

在工程计算中, 一般取衰减直流分量的前两项即可满足故障电流零点预测精度要求, 则故障电流可表示为

$$\begin{cases} i_f(t) = X_1 \cdot \sin(\omega t) + X_2 \cdot \cos(\omega t) - X_3 + X_4 \cdot t \\ X_1 = I_F \cos(\alpha - \varphi) \\ X_2 = I_F \sin(\alpha - \varphi) \\ X_3 = X_2 + I_0 \\ X_4 = \frac{X_3}{\tau} \end{cases} \quad (4)$$

设可控断路器系统的采样周期为  $T_s$ , 采样频率为  $f_s$ , 则采样故障电流值满足关系

$$\begin{bmatrix} i_f(t_1) \\ i_f(t_2) \\ \dots \\ i_f(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \cdot \sin(\omega t_1) + X_2 \cdot \cos(\omega t_1) - X_3 + X_4 \cdot t_1 \\ X_1 \cdot \sin(\omega t_2) + X_2 \cdot \cos(\omega t_2) - X_3 + X_4 \cdot t_2 \\ \dots \\ X_1 \cdot \sin(\omega t_n) + X_2 \cdot \cos(\omega t_n) - X_3 + X_4 \cdot t_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, 故障电流采样时刻满足关系  $t_n = n \cdot T_s$ 。

对于式(5)采用 WLMS 算法, 可获得式(4)中表示故障电流模型的未知参数  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  为

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = W \cdot \begin{bmatrix} i_f(t_1) \\ i_f(t_2) \\ \dots \\ i_f(t_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中矩阵  $W$  为

$$W = \begin{bmatrix} \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) & -1 & t_1 \\ \sin(\omega t_2) & \cos(\omega t_2) & -1 & t_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin(\omega t_n) & \cos(\omega t_n) & -1 & t_n \end{bmatrix}^{\#L} \quad (7)$$

式(7)中,  $\#L$  为矩阵的左准逆阵运算<sup>[10]</sup>。由 WLMS 算法估计的参数可获得故障电流的特征参数  $I_F$ 、 $I_0$ 、 $\alpha$ 、 $\varphi$  和  $\tau$  的估计值, 从而可以获得故障电流模型。同时, 对估计的故障电流采用牛顿迭代算法预测可控开断中电弧熄灭时电流零点  $t_{cz}$ , 确定断路器触头最佳分离时刻。

### 1.2 故障初始相角的检测

故障电流可控开断需要解决的另一个关键问题

是故障初始相角的检测和估计电流模型与实际故障电流模型的一致性判断。笔者采用“ $F_0$ ”假设检验来进行故障初始角的检测,该判断条件可表示为<sup>[11]</sup>

$$F_0 = \frac{\left\{ \sum_{m=1}^n [\hat{i}_f(t_m) - \bar{i}_f]^2 \right\} / k}{\left\{ \sum_{m=1}^n [\hat{i}_f(t_m) - i_f(t_m)]^2 \right\} / (n-p)} \quad (8)$$

$$\bar{i}_f = \sum_{m=1}^n i_f(t_m) / n$$

式(8)中, $n$ 为故障电流采样数据的个数; $k$ 为未知变量 $X$ 的个数; $p$ 为系数矩阵的列数; $\hat{i}_f(t_m)$ 是故障电流的估计值; $\bar{i}_f$ 是故障电流采样值的平均值; $i_f(t_m)$ 是采样故障电流实际值。

根据概率统计理论可知,当系统线路发生短路故障时,故障相电流发生突变,导致估计电流模型与实际故障电流模型不一致,由式(8)计算得到的模型贴进度 $F_0$ 发生突变。因此,可控断路器系统可根据 $F_0$ 的突变来判断线路发生短路故障,并根据参考相电压 $U_{ref}$ 检测出故障电流初始角,同时将采样数据窗口复位为1/4工频周期,从而加快算法收敛速度。随着采样数据窗的扩展,估计的故障电流模型与实际线路故障电流模型一致,由式(8)得到的 $F_0$ 大于设定值,从而可由估计的故障电流模型预测断路器可控开断的目标电流零点,确定断路器触头最佳分离时刻。

## 2 算法性能验证

为验证提出的故障电流可控开断算法,采用仿真和电力系统实际故障录波数据进行算法性能验证。

### 2.1 算法性能仿真验证

为了评估故障初始相角 $\alpha$ ,直流分量衰减时间常数 $\tau$ ,环境白噪声和继电保护响应时间 $t_{prot}$ 对故障电流可控开断算法性能影响,在MATLAB平台下建立故障可控模型进行研究<sup>[12, 13]</sup>,建立的仿真电路模型见图2。

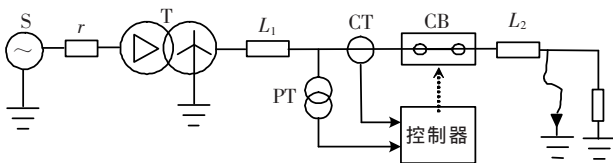


图2 故障可控开断仿真电路模型

故障初始相角 $\alpha$ 和衰减时间常数 $\tau$ 对故障电流波形有较大的影响。在仿真过程中,分别改变的直流衰减时间常数 $\tau$ 为10~150ms,故障初始相角 $\alpha$ 为0~180°进行仿真来验证。不同时间常数下预测

目标电流零点误差 $\Delta t_{cz}$ 见表1。不同初始相角下预测目标电流零点误差 $\Delta t_{cz}$ 见表2。

表1 不同时间常数下预测目标电流零点误差 $\Delta t_{cz}$

时间常数 $\tau$ /ms	目标零点最大误差值/ms		
	0白噪声	10%白噪声	20%噪声
30	0.10	0.30	0.50
45	0.10	0.10	0.40
60	0.40	0.70	-0.30
75	0.30	0.70	0.33
120	0.50	0.20	0.30
150	0.40	0.30	0.50

表2 不同初始相角下预测目标电流零点误差 $\Delta t_{cz}$

初始相角 $\alpha$ /°	目标零点最大误差值/ms		
	0白噪声	10%白噪声	20%噪声
0	0.30	0.40	0.40
30	0.08	0.50	0.40
60	0.25	0.10	0.20
90	0.90	0.80	0.80
120	0.50	0.10	0.20
150	0.70	0.25	0.30
180	0.30	0.09	0.10

由表1、2仿真结果可知,笔者提出的故障电流可控开断算法在不同的直流分量衰减时间常数 $\tau$ 和故障初始相角 $\alpha$ 下,均能较好预测可控开断的目标电流零点,并且预测的过零点最大误差值均在燃弧裕量 $\pm 1$ ms内,衰减时间常数和故障初始相角对算法的影响很小。同时可控开断算法对环境白噪声也具有较好的抗干扰能力。

另一方面,为了考察继电保护响应时间对可控开断算法性能的影响,对不同继电保护响应时间下目标零点误差进行了仿真研究。图3为衰减时间常数 $\tau=75$ ms,分别在0噪声和20%噪声下不同的继保响应时间内算法响应速度分析曲线。

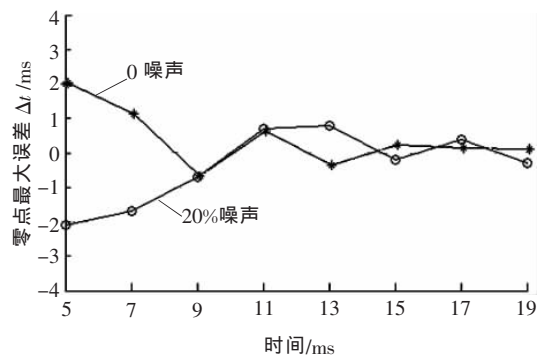


图3 算法响应速度分析曲线

由图3仿真结果可知,算法在7ms后,预测的目标零点最大误差值均小于 $\pm 1$ ms。另一方面从仿真结果可知,故障电流采样值中包含较高的白噪声对于算法收敛速度有一定影响,对于电力系统中的超快速保护(继电保护响应时间 $t_{prot} < 5$ ms)可以通过FPGA实现FIR滤波器对采样故障电流信号进行预

处理,从而提高算法性能。因此,本算法具有较好的响应速度和预测精度,能够满足故障电流可控开断实用性的要求。

## 2.2 故障录波数据算法性能验证

为了验证算法对电网中实际的故障电流处理性能,将采样频率为 1 kHz 的故障录波器录取的 220 kV 电网的 21 个故障录波数据样本通过算法处理。图 4 所示为随机提取其中一组故障录波数据利用故障电流可控开断算法估算目标电流零点。

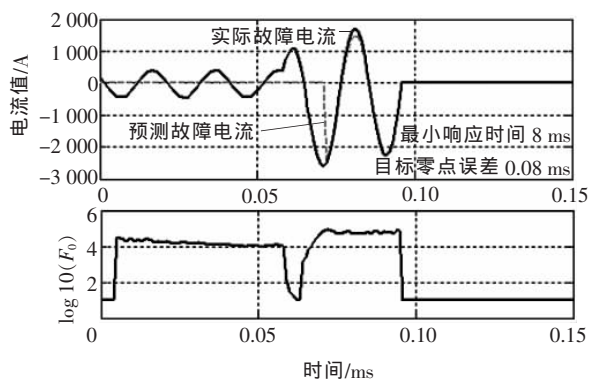


图 4 50 Hz、220 kV 电网故障电流仿真实例

由图 4 可知,在系统未发生故障时, $F_0$  假设检验值远远大于设定阈值,当系统发生故障时, $F_0$  假设检验值突降,并且由于算法估计电流模型与实际短路电流的不匹配,使  $F_0$  值在故障发生后的一段时间内持续下降。可由  $F_0$  假设检验值的突变及其变化趋势,判定故障发生,进而控制采样数据窗口的复位,利用算法处理采样数据,当  $F_0$  假设检验值大于设定阈值时,即可根据估计短路电流参数预测可控开断的目标燃弧零点。

同时,笔者分别在继电保护响应时间为 10 ms、15 ms 和 20 ms 时,对所得故障录波数据样本进行目标电流零点误差预测,预测结果见图 5。

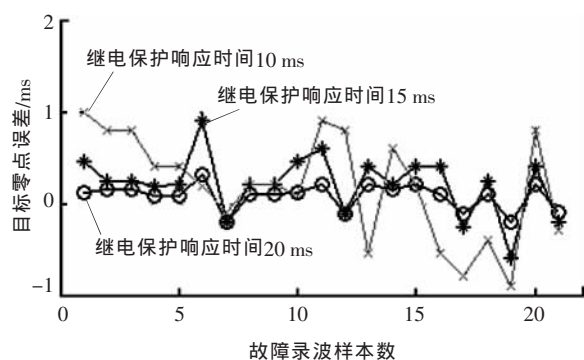


图 5 220 kV 电网故障电流预测零点误差

从图 5 可知,对于电网实际的故障录波数据采用自适应检测算法处理,在故障发生后 10 ms 内就

能获得理想的目标零点估算值,且目标电流零点误差小于 0.5 ms。分析 COMTRADE 格式的故障录波文件<sup>[14]</sup>,此电网实际运行中,继电保护装置在故障发生后 20 ms 给高压断路器发分闸命令。因此,如果采用故障电流可控开断,当继电保护发出分闸命令时,预测的目标零点误差小于 0.2 ms。因此,电网实际故障录波数据验证了提出可控开断算法的有效性和采用的故障电流数学模型的合理性。

## 3 结语

提出的故障电流可控开断算法能够在 10 ms 内较快实现对故障电流特征参数的估计,预测短路电流可控开断过程中电弧熄灭的目标电流零点,确定断路器触头最佳分离时刻,为高压断路器可控开断故障电流提供了保证,具有一定的理论和工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit-breakers-guide for Application Part 1; ELECTRA[C].CIGRE,1999.
- [2] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit-breakers-planning, Specification and Testiong of Controlled Switching Systems, ELECTRA[C].CIGRE, 2001.
- [3] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit-breakers-benefits of Controlled Switching[C].CIGRE, 2004.
- [4] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit-breakers-guidance for Further Application Including Unloaded Transformer Switching, Load and Fault Interruption and Circuit-breaker Uprating[C].CIGRE, 1999.
- [5] PÖRTL A, FRÖHLICH K. 2003. A New Algorithm Enabling Controlled Short Circuit Interruption[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2003, 18(3): 802-808.
- [6] THOMAS R. Self-checking Algorithm for Controlled Fault Interruption[J]. IEEE Trans. International Conference on Power Systems, 2005(7): 19-23.
- [7] 钱家骊. 高压线路中短路电流零点延迟条件的讨论[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 192-193.
- [8] 方春恩, 段雄鹰, 邹积岩. 基于自适应神经元的短路电流参数提取[J]. 中国机电工程学报, 2003, 23(8): 115-118.
- [9] 方春恩, 周承鸣, 邹积岩. 同步断路器的统计特性分析及自适应控制[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 183.
- [10] 杨明, 刘先忠. 矩阵论[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [11] 肖云茹. 概率统计计算方法[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [12] 吴天明, 谢小竹, 彭彬. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [13] 飞思科技产品研发中心. MATLAB7 基础与提高[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [14] 张杰, 涂东明, 张克元. 基于 COMTRADE 标准的故障录波的分析与再现[J]. 继电器, 2000(11): 20-22.