

消除谐波对电流上升率保护影响的算法

王晓红,李群湛,陈小川

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:详细分析了地铁馈线短路电流中存在的谐波成分对电流上升率保护的影响,在此基础上,利用地铁馈线短路时暂态电流中的直流部分可近似表示为指数形式的特点和交流分量做一周积分为零的原理,提出了一种采样数据处理算法来消除谐波影响。通过利用 Labview/CVI 仿真,证明该算法能使短路波形得到平滑,且引起的误差很小。

关键词:地铁牵引供电; 电流上升率保护; 算法

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0023-03

1 引言

地铁牵引变电所要采用整流变压器—整流机组来完成降压,把三相交流电变为多相交流并转换为直流电能。由谐波分析知,直流负载从整流器得到的电压中除了有一直流分量外,还含有频率为脉动整数倍的交流谐波电压。直流电压中出现的谐波分量势必在负载中产生相应频率的谐波电流,即实际整流器输出的电流是脉动的,含有12整数倍的高次谐波。此外,由于整流变压器三相阻抗的不平衡以及机车车辆整流、逆变的影响,直流侧的电流中还含有3、5、6等低次谐波。由于现今研制的地铁直流馈线保护多为微机保护,而直流馈线保护大多采用电流上升率保护^[2]做主保护,这些谐波的存在势必对电流上升率保护的可靠性影响很大,特别是在电流上升率很低时。所以当电流上升率低时,对电流进行谐波处理是必要的。

2 谐波对电流上升率保护的影响

输入信号电流上升率较高时,只有靠电流增量决定保护是否动作,而此时电流增量较大,谐波对其的影响小得多。当电流上升率很低时,主要是通过延时保护来区分是故障还是正常的负荷状态。由保护特性分析知,延时保护的依据是当时间 t 达到延时时间时,判别是否电流变化率 di/dt 约为0,电流增量 I 是否大于延时保护的 I 整定值,故谐波对电流上升率较低时的影响较大。下面以某一短路电流为例分析谐波对电流上升率保护的影响,设该电流150 Hz谐波含量为直流稳态值的3%,250 Hz谐波的含量为2%,300 Hz谐波含量为5%,则该电流可表示为:

$$i = 5000(1 - e^{-\frac{t}{75}}) + 150 \sin(2 \times 0.15 \times t) + 100 \sin(2 \times 0.25 \times t) + 250 \sin(2 \times 0.3 \times t)$$

其波形见图1所示。

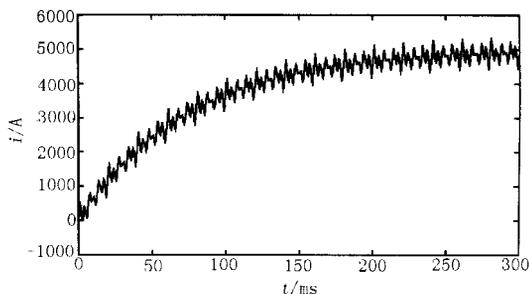


图1 某短路电流波形

Fig. 1 The wave of some short-circuit current

由图1可见,谐波的影响有以下三个方面:

- (1) 由于电流增量本身值不是很大,谐波引起的电流增量值的误读,使电流增量与延时保护的电流增量整定值的比较误差变大,使保护灵敏度降低。
- (2) 谐波的存在,可能会使中远端的故障电流在未达到稳态以前,就出现电流变化率 di/dt 约为0的情况,从而干扰了电流的持续时间与延时时间的比较,有可能引起保护的误动。
- (3) 谐波使初始电流上升率抬高,特别在末端故障时,很可能当作近端故障处理,从而使保护拒动。

3 采样数据的处理算法

3.1 算法介绍

地铁馈线短路时暂态电流中的直流部分可近似表示为指数形式,故本算法主要利用交流分量做一周积分为零的原理,根据短路电流的近似数学模型,求出所需的指数形式电流的稳态值及其时间常数。通过后面的仿真验证,该算法能有效地除去谐

波含量,且计算量因多为简单的加减乘除而相对要小得多。下面详细说明该算法。

设输入电流信号为

$$i(t) = I(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \sum_{n=1}^m I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

式中: I 为达到稳态的直流电流值; T 为时间常数; I_n 为 n 次谐波的电流峰值; φ_n 为 n 次谐波的初相位。

第 k 次电流采样值为:

$$i_k = I(1 - e^{-\frac{kT_s}{T}}) + \sum_{n=1}^m I_n \sin(nkT_s + \varphi_n) = I(1 - r^k) + i_{ka}$$

式中: $r = e^{-\frac{T_s}{T}}$, i_{ka} 为谐波分量的总和。

设 N 为 20 ms 内的采样点数,则 $N = 20/T_s$ 。

由于交流分量作一周积分时值为零,与矩形积分近似,有

$$\sum_{k=1}^N i_k T_s = \sum_{k=1}^N I(1 - r^k) T_s + \sum_{k=1}^N i_{ka} T_s = \sum_{k=1}^N I(1 - r^k) T_s$$

即:
$$\sum_{k=1}^N i_k = \sum_{k=1}^N I(1 - r^k) \quad (1)$$

经一个采样间隔后,有:

$$\sum_{k=2}^{N+1} i_k T_s = \sum_{k=2}^{N+1} I(1 - r^k) T_s + \sum_{k=2}^{N+1} i_{ka} T_s = \sum_{k=2}^{N+1} I(1 - r^k) T_s$$

即:
$$\sum_{k=2}^{N+1} i_k = \sum_{k=2}^{N+1} I(1 - r^k) \quad (2)$$

由于:

$$\sum_{k=2}^{N+1} i_k = \sum_{k=1}^N i_k + i_{N+1} - i_1 \quad (3)$$

$$\sum_{k=2}^{N+1} I(1 - r^k) = \sum_{k=1}^N I(1 - r^k) + I(1 - r^{N+1}) - I(1 - r) \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)得:

$$\sum_{k=1}^N i_k + i_{N+1} - i_1 = \sum_{k=1}^N I(1 - r^k) + I(1 - r^{N+1}) - I(1 - r) \quad (5)$$

将式(1)代入式(5)得:

$$i_{N+1} - i_1 = I(1 - r^{N+1}) - I(1 - r) = I(1 - r^N) r \quad (6)$$

同理可得:

$$i_{N+2} - i_2 = I(1 - r^N) r^2 \quad (7)$$

由式(7)/式(6)得:

$$r = \frac{i_{N+2} - i_2}{i_{N+1} - i_1}$$

由式(6)得:

$$I = \frac{i_{N+1} - i_1}{r(1 - r^N)} \quad (8)$$

因此第 k 次采样值所含的指数电流值为

$$i_{kd} = I(1 - r^k) \quad (9)$$

3.2 运算处理

由于式(8)、(9)中的 r^N 、 r^k 属于指数运算,运算量较大,为减小运算量可利用指数函数的泰勒展开公式采用下面的近似运算。

$$r^N = e^{-\frac{NT_s}{T}} = 1 - \frac{NT_s}{T} + \frac{N^2 T_s^2}{2 T^2} - \frac{N^3 T_s^3}{6 T^3} + K + \frac{N^n T_s^n}{n! T^n}$$

因地铁馈线短路时的时间常数 T 一般为几十毫秒, T_s 为十分之一毫秒级,故可认为 $\frac{N^3 T_s^3}{6 T^3}$ 、 K 、

$\frac{T_s^n}{n! T^n}$ 均约为 0,这样便可得

$$r^N \approx 1 - \frac{NT_s}{T} + \frac{N^2 T_s^2}{2 T^2}$$

对于 r^k 的计算,由于 k 的大小不定,故无法预先确定其近似的公式,但可用软件控制使 $\left(\frac{kT_s}{T}\right)^{m+1}/(m+1)! < 0.001$, 求出 m 的值,从而得到

$$r^k = e^{-\frac{kT_s}{T}} = 1 - \frac{kT_s}{T} + \frac{k^2 T_s^2}{2 T^2} - \frac{k^3 T_s^3}{6 T^3} + K + \frac{\left(-\frac{kT_s}{T}\right)^m}{m!} \quad (10)$$

对于指数函数,当 $T=3$ 时,函数值基本为零,故 $\frac{kT_s}{T}$ 最大约为 3,若 $\frac{kT_s}{T} = 3$,则当 $n = 12$ 时, $\frac{3^{12}}{12!} = 0.0007 < 0.001$,即式(10)中 $m = 11$ 。因此,采用近似的计算后,次幂运算最多为 11,从而大大地减少了运算量,且计算误差小到 0.001 级。

4 算法验证

下面利用 Labwindows/CVI,对提出的谐波处理算法进行仿真。设某短路电流为

$$i = 5000(1 - e^{-\frac{t}{75}}) + 150 \sin(2 \times 0.15 \times t) + 80 \cos(2 \times 0.15 \times t) + 100 \sin(2 \times 0.25 \times t) + 60 \cos(2 \times 0.25 \times t) + 250 \sin(2 \times 0.3 \times t) + 50 \sin(2 \times 0.6 \times t)$$

经谐波处理后波形与原电流中直流部分波形比较见图 2 所示。

由图 2 的波形可看出,经谐波处理算法后,波形平滑不再含有谐波,且波形与原短路电流中所含指数形式的直流电流波形基本重合,故该算法能满足要求,引起的误差很小。

5 结论

由文中分析知,地铁馈线短路电流中存在 3、5、6 等低次谐波以及 12 整数倍的高次谐波,这些谐波

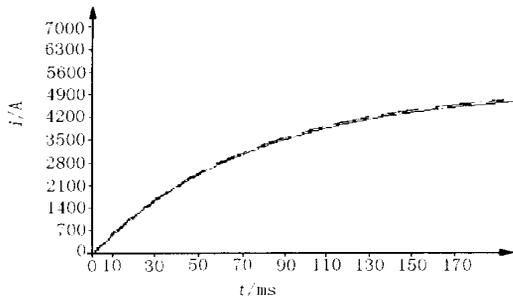


图2 某短路电流直流部分波形与谐波处理后的波形比较

Fig.2 The comparison between the wave of DC component and the current wave after handled by algorithm

影响了地铁馈线保护中的电流上升率保护的可靠性和灵敏度。针对这种情况,文中提出了一种消除谐波的算法,通过验证,该算法能满足要求。这样在地铁微机馈线保护软件实现时,当电流上升率很高时,不进行谐波处理,当电流上升率低时,利用该算法对

采样数据进行处理,从而保证了电流上升率保护的可靠动作。

参考文献:

- [1] 丘玉容. 广州地铁一号线谐波的测量及分析[J]. 地铁与轻轨, 2000, (4): 46-48.
- [2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

收稿日期: 2002-05-21

改回日期: 2002-09-19

作者简介:

王晓红(1977-), 博士研究生, 研究方向为微机保护及变电所综合自动化;

李群湛(1957-), 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、牵引供电理论及系统的综合补偿与优化设计等方面的教学和科研工作;

陈小川(1963-), 教授, 从事微机保护及变电所综合自动化方面的教学和科研工作。

An algorithm for eliminating the influence of harmonic waves to the rate-of-rise protection

WANG Xiao-hong, LI Qun-zhan, CHEN Xiao-chuan

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The thesis details the influence of harmonic waves in the short-circuit current to the rate-of-rise protection. On the base of it, an algorithm is presented to handle the sample date for eliminating the influence of harmonic waves, at the same time considering the characteristics that DC component in transient short-circuit current of subway can be shown with exponential form and the principle that the integral result of AC component for a cycle is zero. By simulation with Labwindows/CVI, it is proved that the algorithm can smooth the transient electric current wave and the error is very small.

Key words: subway traction power supply; the rate-of-rise protection; algorithm

世界最大水利工程“南水北调”总投资五千亿元

南水北调工程 2002 年 12 月 27 日上午正式开工建设。开工典礼在北京人民大会堂和江苏省、山东省施工现场同时举行。这标志着南水北调工程进入实施阶段。国家主席江泽民为工程开工发来贺信。国务院总理朱 基在人民大会堂主会场宣布工程正式开工, 中共中央政治局常委、国务院副总理温家宝发表讲话。中共中央政治局委员、北京市委书记、市长刘淇出席开工典礼。中共中央政治局委员、国家计委主任曾培炎在北京人民大会堂主持开工典礼, 并宣读国家主席江泽民的贺信。

经党中央、国务院批准, 南水北调正式立项的单项工程有三项, 即东线一期工程的江苏段三阳河、潼河、宝应站工程及山东段济平干渠工程, 中线一期工程的丹江口水库大坝加高工程, 其中江苏段三阳河、潼河、宝应站工程和山东段济平干渠工程 27 日正式开工。南水北调东线第一期工程和中线第一期工程建成后, 将使北方受水地区增加 134 亿立方米供水能力。南水北调东线第一期工程和中线第一期工程主体工程投资 1240 亿元, 其中东线第一期工程静态投资 320 亿元, 中线第一期工程投资 920 亿元。

南水北调工程的实施, 对缓解北方地区水资源严重短缺局面, 实现长江、淮河、黄河、海河四大流域水资源的合理配置, 促进经济、社会和生态的协调发展, 具有重大意义, 该工程被认为是全面建设小康社会的重要基础设施, 是实现中国可持续发展战略的重大举措, 并将有力地推进中国社会主义现代化建设进程。