

文章编号:1671-251X(2020)06-0103-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020030074

一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法

于铄航^{1,2}, 荣相^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 魏礼鹏^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;
2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要: 现有短路电流过零点预测算法存在计算复杂、误差大等问题。针对煤矿供电系统三相短路故障,提出了一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法。该算法利用三相短路故障发生后1个基波周期内短路电流采样数据,通过累加和的方法计算短路电流的直流分量,可减小计算量、消除谐波干扰;将采样数据与直流分量相减,得到短路电流的交流分量;利用交流分量周期性的特点,可预测1个基波周期后任意采样时刻的交流分量;将1个基波周期后任意采样时刻的直流分量与交流分量相加,即可重构出任意采样时刻的短路电流,从而预测短路电流过零点。仿真和实验结果验证了该算法的准确性。

关键词: 煤矿供电; 相控开关; 过零点预测; 短路故障; 短路电流
中图分类号: TD611 文献标志码: A

A zero-crossing point prediction algorithm of short-circuit current for
mine-used phase-controlled switching

YU Shuohang^{1,2}, RONG Xiang^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, WEI Lipeng^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;
2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: The existing zero-crossing point prediction algorithms of short-circuit current have some problems, such as complex calculation and big error. For three-phase short-circuit fault of coal mine power supply system, a zero-crossing point prediction algorithm of short-circuit current for mine-used phase-controlled switching was proposed. In the algorithm, DC component of short-circuit current is calculated by summing short-circuit current sampling data in one fundamental wave period after occurrence of three-phase short-circuit fault, which can reduce calculation amount and eliminate harmonic interference. AC component of short-circuit current is obtained by subtracting the DC component from the sampling data. Using periodicity of the AC component, the AC component at any sampling time after one fundamental wave period can be predicted. By adding the DC and AC components at any sampling time after one fundamental wave period, short-circuit current at any sampling time can be reconstructed to predict zero-crossing point of short-circuit current. The simulation and experimental results verify accuracy of the algorithm.

Key words: coal mine power supply; phase-controlled switching; zero-crossing point prediction; short-circuit fault; short-circuit current

收稿日期:2020-03-26;修回日期:2020-06-14;责任编辑:盛男。
基金项目:中国煤炭科工集团双创基金资助项目(2018-TD-QN017)。
作者简介:于铄航(1986—),男,黑龙江大庆人,工程师,硕士,主要从事煤矿供电设备的嵌入式控制系统研发工作,E-mail:yushuohang@foxmail.com。
引用格式:于铄航,荣相,杨帆,等.一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法[J].工矿自动化,2020,46(6):103-107.
YU Shuohang,RONG Xiang,YANG Fan,et al. A zero-crossing point prediction algorithm of short-circuit current for mine-used phase-controlled switching[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(6):103-107.

0 引言

对煤矿供电系统造成危害最严重的是三相短路,三相短路电流的幅值可达额定运行电流的 10 倍以上。直接同时分断三相短路电流会对矿用相控开关产生严重的损害,在三相短路电流过零点进行分断是提高矿用相控开关使用寿命和分断能力的关键^[1-3]。由于矿用负载以感性负载为主,当短路发生时,电感中电流在突然短路瞬时不能突变,由此产生逐渐衰减的直流分量^[4-5]。受直流分量的影响,短路电流不能周期过零,需要研究相关算法来预测短路电流过零点。

文献[6-8]提出了半波傅氏算法,通过对短路后半半个基波周期的采样数据进行傅里叶变换,得到直流分量、基波和三次谐波等参数,该算法对含有奇次谐波的周期信号具有很好的处理效果,但在处理非周期过零的短路电流时误差较大。文献[9]利用自适应神经元提取短路电流参数,采用正交滤波器消除衰减直流分量和误差自相关估计自适应改变学习步长,但需要在线进行矩阵和除法运算,计算量大。文献[10]提出了基于故障早期检测的短路电流等比直流分量递推的故障电流预测算法,利用短路后半半个基波周期的采样数据来预测短路电流过零点,可消除奇次谐波带来的干扰,但对包含其他谐波成分的短路电流过零点预测误差较大。针对煤矿供电系统三相短路故障,本文提出了一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法,利用短路故障发生后 1 个基波周期的采样数据,可快速、准确预测包含各次谐波的短路电流过零点。

1 短路电流过零点预测算法

1.1 三相短路电流数学模型

供电系统发生三相短路故障时,其等效电路如图 1 所示。 u_a, u_b, u_c 分别为 a, b, c 相交流电源; U_m 为电源电压峰值; ω 为电源角频率; t 为时间; α 为电源电压初始相位角; i_a, i_b, i_c 分别为 a, b, c 相短路电流; R, L 分别为线路电阻与电感; R', L' 分别为负载电阻与电感。

根据电路的对称性,取 a 相进行分析,a 相短路电流满足如下微分方程^[11-12]:

$$L \frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

由式(1)可得

$$i_a(t) = C \exp(-t/T_a) + I_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

式中: C 为积分常数,其值为短路电流直流分量初始值; T_a 为直流分量衰减时间常数, $T_a = L/R$; I_m 为

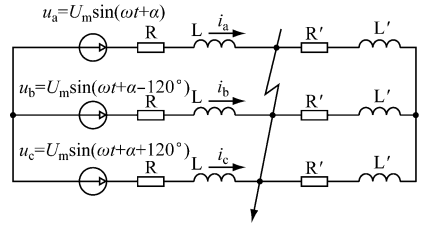


图 1 供电系统三相短路等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of three-phase short-circuit of power supply system

短路电流峰值; ϕ 为短路电流的初始相位角。

由式(2)可推导出单相短路电流表达式:

$$i(t) = C \exp(-t/T_a) + \sum_{k=1}^M I_{km} \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (3)$$

式中: M 为短路电流所包含的最高次谐波次数, $M \in \mathbf{N}$; k 为谐波次数; I_{km} 为各次谐波峰值; ϕ_k 为各次谐波初始相位角。

1.2 直流分量计算

由式(3)可知,短路电流由直流分量、基波周期分量及高次谐波分量组成。各次谐波的周期 $T_k = T/k$ (T 为 50 Hz 基波周期),即基波周期等于任意次谐波周期的整数倍。因此,叠加了各次谐波的交流分量的累加和等于零,利用该性质可消除任意次谐波的影响,同时可简化直流分量计算过程。

将式(1)离散化,在 1 个基波周期内对短路电流信号进行 N 次等间隔采样,则离散化短路电流表达式为

$$i(n) = C \exp\left(-\frac{n}{NfT_a}\right) + \sum_{k=1}^M I_{km} \sin\left(\frac{2\pi kn}{N} + \phi_k\right) \quad (4)$$

式中: n 为采样点序号; f 为基波分量的频率。

设 $\bar{i}(n)$ 为短路电流直流分量, $\tilde{i}(n)$ 为短路电流交流分量,则

$$i(n) = \bar{i}(n) + \tilde{i}(n) \quad (5)$$

其中交流分量的期望为零,即

$$E(\tilde{i}(n)) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^M I_{km} \sin\left(\frac{2\pi kn}{N} + \phi_k\right) = 0 \quad (6)$$

对各采样点进行求和,可得

$$\sum_{n=1}^N i(n) = \sum_{n=1}^N \bar{i}(n) + NE(\tilde{i}(n)) = \sum_{n=1}^N \bar{i}(n) \quad (7)$$

设 $S(N) = \sum_{n=1}^N i(n) = \sum_{n=1}^N \bar{i}(n)$, 则

$$S(N) = C \left\{ 1 + \exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right) + \left[\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)\right]^2 + \cdots + \left[\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)\right]^N \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知, $S(N)$ 是以 C 为首项、 $\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)$ 为公比的等比数列的和,则

$$S(N)=C\frac{1-\left[\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)\right]^N}{1-\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)}=C\frac{1-\exp\left(-\frac{T}{T_a}\right)}{1-\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)}$$

(9)

利用泰勒展开式(保留前三项)将式(9)展开:

$$S(N)=C\frac{1-\exp\left(-\frac{T}{T_a}\right)}{1-\exp\left(-\frac{T}{NT_a}\right)}\approx C\frac{1-\left(1-\frac{T}{T_a}+\frac{T^2}{2T_a^2}\right)}{1-\left[1-\frac{1}{N}\frac{T}{T_a}+\frac{1}{2T_a^2}\left(\frac{T}{N}\right)^2\right]}$$

(10)

由式(10)可得

$$T_a\approx\frac{S(N)T-CN^2T}{2S(N)-2CN}$$

(11)

由于连续的直流分量方程曲线在时间轴上的投影面积(式(12))与离散化后的直流分量方程曲线在时间轴上的投影面积(式(13))近似相等,则

$$S=\int_0^T C\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right)dt$$

(12)

$$S\approx\frac{T}{N}\sum_{n=1}^N\bar{i}(n)=\frac{T}{N}S(N)$$

(13)

$$\frac{T}{N}\sum_{n=1}^N\bar{i}(n)\approx\int_0^T C\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right)dt$$

(14)

由式(14)可得

$$T_a\approx\frac{CNT}{2NC-2S(N)}$$

(15)

联合式(11)、式(15)可得

$$C\approx\frac{S(N)}{N-1}$$

(16)

至此,可根据1个基波周期内的采样数据累加和、采样点数及基波周期来获取直流分量衰减时间常数 T_a 和直流分量初始值 C ,进而得到直流分量。

1.3 误差校正

由于计算直流分量衰减时间常数和直流分量初始值时采用保留前三项的泰勒级数展开式与投影面积近似计算,并且等间隔采样短路电流信号时会产生采样误差,所以计算得到的直流分量存在误差。直流分量初始值计算误差对短路电流过零点预测结果精度影响较小,而直流分量衰减时间常数计算误差的影响较大,因此需要对直流分量衰减时间常数计算结果进行误差校正。

由式(3)可知 $i(n)$ 的直流分量时域表达式:

$$\bar{i}(t)=C\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right)$$

(17)

设 $i(n+N)$ 的直流分量衰减时间常数为 T_{aj} ,则 $i(n+N)$ 的直流分量时域表达式为

$$\bar{i}_j(t)=C\exp\left(-\frac{t}{T_{aj}}\right)$$

(18)

由式(17)、式(18)可得经过校正的直流分量衰减时间常数:

$$T'_a=\frac{-t}{\ln\left[\exp\left(-\frac{t}{T_{aj}}\right)-\frac{\bar{i}_j(t)-\bar{i}(t)}{C}\right]}$$

(19)

1.4 短路电流预测

由式(5)可得

$$\bar{i}(n)=i(n)-\bar{i}(n)$$

(20)

煤矿供电系统可视作无限大功率电源供电网络,其发生三相短路故障时交流分量不会衰减,利用交流分量周期性特点可预测1个基波周期后任意采样时刻的交流分量:

$$\bar{i}(n+N)=\bar{i}(n)$$

(21)

将1个基波周期后任意采样时刻的直流分量与交流分量相加,即可预测短路电流:

$$i(n+N)=\bar{i}(n+N)+\bar{i}(n+N)=\bar{i}(n+N)+\bar{i}(n)=\bar{i}(n+N)-\bar{i}(n)+i(n)$$

(22)

2 算法验证

2.1 仿真验证

利用 Matlab/Simulink^[13] 建立供电网络仿真模型,如图2所示。三相电源的短路容量为100 MVA;升压变压器额定容量为7.5 MVA, Y/D₁₁ 联结,变比为10/35,阻抗电压百分比为7.5%;降压变压器额定容量为3.2 MVA, Y/D₁₁ 联结,变比为35/6.3,阻抗电压百分比为7%;线路长度为50 km,线路单位电抗为0.274 Ω/km。

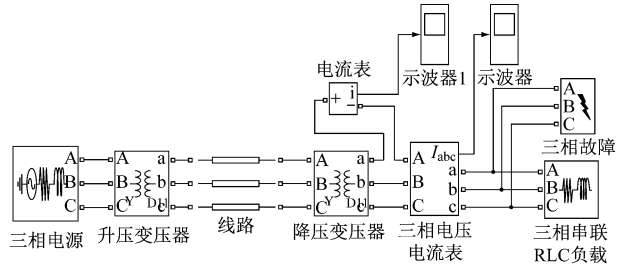


图2 供电网络仿真模型

Fig. 2 Simulation model of power supply network

供电网络发生三相短路故障时电流波形如图3所示。

从短路故障发生时刻开始,以3.2 kHz的采样频率对一个基波周期内的波形进行等间隔采样,短路电流预测仿真结果如图4所示(时间轴以短路发生瞬间为零点)。可看出预测电流波形与原始电流波形几乎重合,表明预测算法可准确预测短路电流过零点。

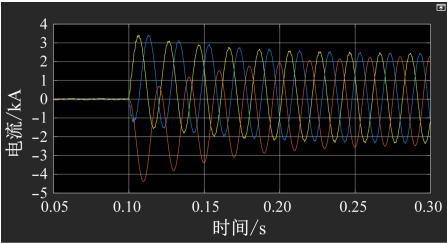
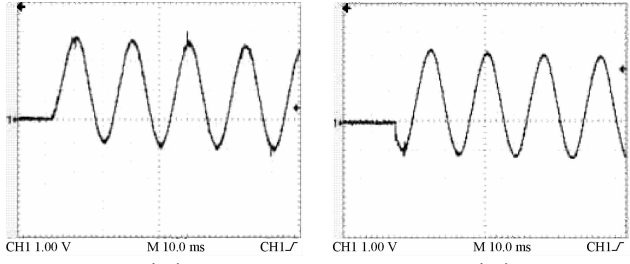
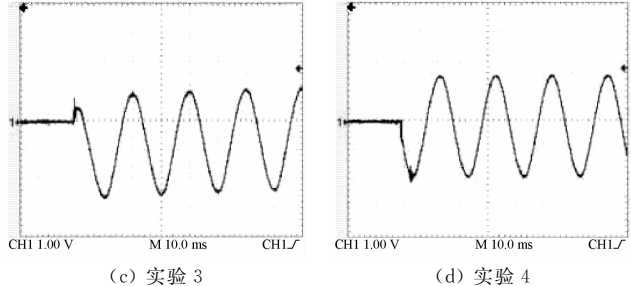


图 3 短路电流仿真波形



(a) 实验 1

(b) 实验 2

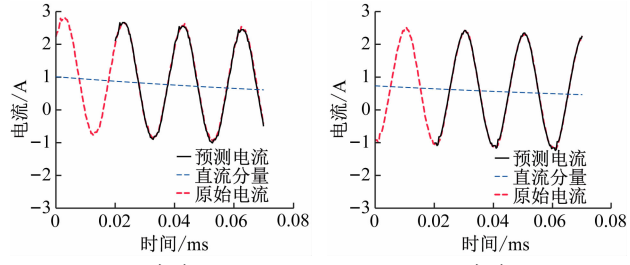


(c) 实验 3

(d) 实验 4

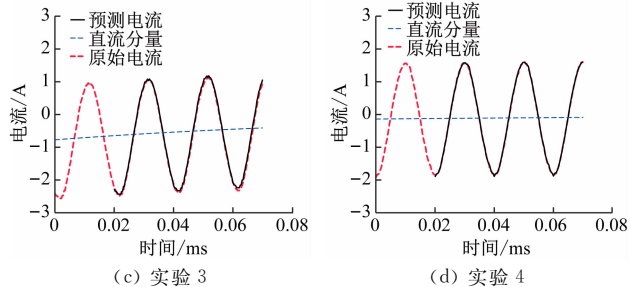
图 6 短路电流实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of short-circuit current



(a) 实验 1

(b) 实验 2



(c) 实验 3

(d) 实验 4

图 7 短路电流预测实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms of predicted short-circuit current

法可准确预测短路电流过零点。

3 结语

提出了一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法。利用三相短路故障发生后 1 个基波周期内短路电流采样数据,通过累加和的方法计算短路电流的直流分量,可减小计算量、消除谐波干扰;将采样数据与直流分量相减,得到短路电流的交流分量;利用交流分量周期性的特点,可预测 1 个基波周期后任意采样时刻的交流分量;将 1 个基波周期后任意采样时刻的直流分量与交流分量相加,即可重构出任意采样时刻的短路电流,从而预测短路电流过零点。

Fig. 3 Simulation waveform of short-circuit current

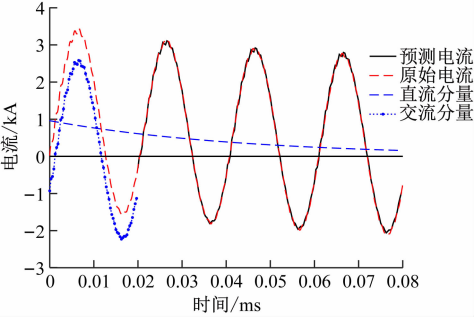
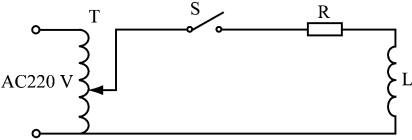


图 4 短路电流预测仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of predicted short-circuit current

2.2 实验验证

短路电流模拟电路如图 5 所示(T 为调压器;S 为接触器开关)。当 S 闭合时,实验回路中通过含有直流分量的短路电流。



(a) 原理



(b) 实物

图 5 短路电流模拟电路

Fig. 5 Short-circuit current analog circuit

利用短路电流模拟电路进行多次实验,利用 TDS2024C 示波器采集短路电流波形,选取其中 4 次具有不同初相位、直流分量初始值的短路电流波形(图 6),并利用示波器的数据存储功能获取波形中的采样数据。

对示波器中获得的采样数据进行插值处理,按 3.2 kHz 的采样频率对采样数据重新采样。短路电流预测实验结果如图 7 所示(为消除 S 闭合瞬间造成的抖动干扰,实验舍弃了模拟短路初始阶段的部分数据,采样数据时间轴经过平移处理)。可看出预测电流波形与原始电流波形基本重合,表明预测算

参考文献(References):

- [1] 陈明帆,段雄英,黄智慧,等.真空开关动作时间的自适应控制[J].中国电机工程学报,2010,30(36):22-26.
CHEN Mingfan,DUAN Xiongying,HUANG Zhihui, et al. Adaptive control for operating time of vacuum switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36): 22-26.
- [2] 舒胜文,阮江军,黄道春,等.相控真空断路器的最佳燃弧区间研究[J].高压电器,2012,48(8):1-6.
SHU Shengwen,RUAN Jiangjun,HUANG Daochun, et al. Optimal arcing interval of phase-controlled vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(8):1-6.
- [3] 朱军,李波,阮江军,等.基于人工过零技术的直流真空分断过程分析及验证[J].电机与控制学报,2019,23(1):63-72.
ZHU Jun,LI Bo,RUAN Jiangjun,et al. Analysis and test for the DC vacuum interruption process based on the artificial current zero technology [J]. Electric Machines and Control,2019,23(1):63-72.
- [4] 荣文帅,蔡志远.断路器同步分断短路电流零点预测方法研究[J].电工技术学报,2019,34(15):3167-3174.
RONG Wenshuai,CAI Zhiyuan. Research on zero prediction method of synchronous breaking short circuit current of breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(15):3167-3174.
- [5] 胥杰,张永健,曹旭,等.基于小波变换提取暂态直流分量故障选相原理的研究[J].华东电力,2011,39(2):262-265.
XU Jie,ZHANG Yongjian,CAO Xu,et al. Research of fault phase selection based on transient DC component extraction by wavelet transformation[J]. East China Electric Power,2011,39(2):262-265.
- [6] 袁召,罗楚军,方春恩,等.基于半波 Fourier 算法的故障选相控制系统的设计[J].高电压技术,2013,39(4):869-875.
YUAN Zhao,LUO Chujun,FANG Chun'en,et al. Design of control system for controlled fault interruption based on half-wave Fourier algorithm [J]. High Voltage Engineering,2013,39(4):869-875.
- [7] 周美兰,王一磊,王健.改进傅氏算法在输电线路微机保护中的应用研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2010,27(6):783-787.
ZHOU Meilan,WANG Yilei,WANG Jian. Research on the algorithm of the improved Fourier in transmission line computer-based protection relay[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University,2010,27(6):783-787.
- [8] 罗楚军,袁召,尹小根,等.基于改进半波傅氏算法的故障电流相控开断零点预测研究[J].高压电器,2012,48(6):1-6.
LUO Chujun,YUAN Zhao,YIN Xiaogen,et al. Zero-cross point prediction of short circuit current for phase controlled interruption based on improved half-wave Fourier algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(6):1-6.
- [9] 于潇,侯春光,曹云东.基于自适应神经元的短路故障电流参数预测[C]//第十三届沈阳科学学术年会论文集(理工农医),沈阳,2016:589-593.
YU Xiao, HOU Chunguang, CAO Yundong. Prediction of fault current parameters based on adaptive neurons [C]//Proceedings of the 13th Shenyang Scientific Annual Conference (Science, Industry, Agriculture and Medicine), Shenyang, 2016:589-593.
- [10] 吴巧玲,缪希仁,许火炬,等.相控开关的早期故障检测及过零预测方法研究[J].电气技术,2016(7):24-30.
WU Qiaoling, MIAO Xiren, XU Huoju, et al. Research on phase switch early fault detection and zero prediction method [J]. Electrical Engineering, 2016(7):24-30.
- [11] 王彦文,赵铁英.含电感型故障限流器的煤矿电网短路暂态过程研究[J].煤炭学报,2013,38(7):1293-1298.
WANG Yanwen, ZHAO Tieying. Research on coalmine power grid short-circuit transient process with inductive type fault current limiter[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(7):1293-1298.
- [12] 方万良,李建华,王建华.电力系统暂态分析[M].4版.北京:中国电力出版社,2017.
FANG Wanliang, LI Jianhua, WANG Jianxue. Transient analysis of power system [M]. 4th ed. Beijing:China Electric Power Press,2017.
- [13] 王希平,李文才,李燕,等.基于 Simulink 配电变压器模型的建立及仿真[J].自动化技术与应用,2009,28(9):124-126.
WANG Xiping,LI Wencai,LI Yan,et al. The building and emulation of distribution transformer model based on Simulink [J]. Techniques of Automation and Applications,2009,28(9):124-126.