基于电流变化率的短路故障快速检测原理分析

基于煤矿供电系统三相短路电流模型，理论分析了使用电流变化率代替电流值作为短路故障的判据原理。并深入分析了短路故障发生瞬间，不同电流初始角情况下的电流变化率；研究了电流初始角为零情况下电流变化率随时间变化的规律；并通过Matlab数值仿真进行了分析说明。提出了“零时刻可判断点”和“零相角可判断点”的概念，指出对应的短路故障判别“相角死区”和“时间死区”，为利用电流变化率作为短路故障判据提供了理论依据。最后介绍了利用数值微分三点公式实现电流变化率实时计算的方法。

王彦文　高　峰　赵永梅/中国矿业大学（北京）机电与信息工程学院

王彦文/教授

关键词/Keywords
电流变化率·
零时刻可判断点·
零相角可判断点·
相角死区·
时间死区·

短路故障是煤矿井下供电系统时常发生的严重电气故障之一。故障的快速检测、准确判断和及时切除对煤矿井下电网的安全稳定运行有着十分重要的意义。煤矿井下负载绝大多数呈感性，发生短路故障时短路电流需要经历一段暂态过渡过程才能达到稳定状态[1-2]。短路故障快速检测是基于短路电流的暂态特征，采用合适的检测技术提取暂态信号并进行判别，进而切除短路故障保障系统安全。

目前，应用于煤矿电网的短路故障检测判断方法主要有三种[3]：①基于短路电流瞬时值大小的判断方法，该方法以线路电流的有效值或者最大值作为检测量，采样时间长，至少需要半个工频周期；或者以线路电流的瞬时值作为检测量，取样时间较短，但是其可靠性差。②基于相敏原理的短路检测方法，该方法需要检测线路电流的大小和短路回路阻抗角的变化情况，在短路电流较小而功率因数较高的系统网络中，准确度较高，但是必须在短路电流的稳态下进行检测，并且不能判断变压器出口处发生的短路故障，存在一定的“死区”。③基于载频原理的短路检测方法，该方法可用于检测电压、电流值较小的短路故障，主要应用于井下煤电钻综合自动保护装置。但是其载频作为检测信号在电钻电缆芯线之间长期存在，当电缆芯线发生短路时，载频信号也被短接成为危险源；而且载频信号容易受煤矿井下外界环境干扰，特别是在短路暂态过程中，其稳定性和可靠性较低，难以实现快速检测。因此，现有的煤矿井下短路故障检测方法均不能满足短路电流快速检测的时间要求。鉴于此，本文提出利用短路电流变化率快速检测判断短路故障的方法。通过仿真实验验证了方案的可行性。

“十二五”国家科技支撑计划资助项目（2012BAK04B00）。

短路电流变化率

1. 短路暂态过程

三相短路时刻煤矿供电系统等效电路如图1所示。由于电路对称，只取一相讨论[4-6]。

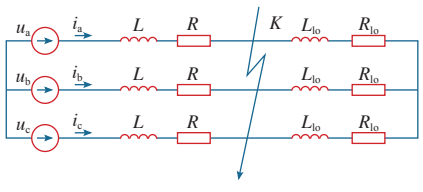

图1　煤矿供电系统等效电路

短路前后电路中的电流分别为i_0和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

i_1，各自表达式为

$$i_0 = I_{m0}\sin(\omega t+\theta-\varphi_0) \tag{1}$$

式中，$I_{m0}=\dfrac{U_m}{\sqrt{(R+R_{lo})^2+\omega^2(L+L_{lo})^2}}$；$U_m$为相电压幅值；$\theta$为电流初始角；$\varphi_0$为短路故障前回路阻抗角，$\varphi_0=\arctan\dfrac{\omega(L+L_{lo})}{R+R_{lo}}$。

$$\begin{aligned} i_1 = {} & I_{m1}\sin(\omega t+\theta-\varphi_1)+ \\ & [I_{m0}\sin(\theta-\varphi_0)-I_{m1}\sin(\theta-\varphi_1)]\exp(-t/T_1) \end{aligned} \tag{2}$$

式中，I_{m1}为周期分量峰值，$I_{m1}=\dfrac{U_m}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}$；$\varphi_1$为短路回路阻抗角，$\varphi_1=\arctan\dfrac{\omega L}{R}$；$T_1$为短路回路时间常数，$T_1=\dfrac{L}{R}=\dfrac{\tan\varphi_1}{\omega}$。

定义k为短路系数，表征短路电流与正常工作电流的比值，即$k=I_{m1}/I_{m0}$。短路系数可以根据供电系统图计算获得。

将式（2）改写为

$$\begin{aligned} i_1 = {} & kI_{m0}\sin(\omega t+\theta-\varphi_1)+ \\ & I_{m0}[\sin(\theta-\varphi_0)-k\sin(\theta-\varphi_1)]\exp(-t/T_1) \end{aligned} \tag{3}$$

从式（2）可看出短路电流由两部分叠加而成：一部分是短路电流的周期分量$i_{pe}=I_{m1}\sin(\omega t+\theta-\varphi_1)$；另一部分是非周期分量$i_{ap}=[I_{m0}\sin(\theta-\varphi_0)-I_{m1}\sin(\theta-\varphi_1)]\exp(-t/T_1)$，它是逐渐衰减的，也称为暂态分量，其具体波形如图2所示。

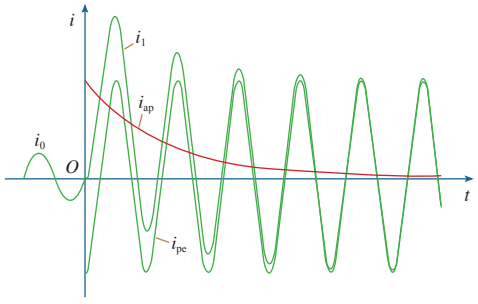

图2　短路电流波形

从图2可以看出，短路瞬间，短路电流产生较大跃变，短路电流变化率di/dt在数值上也将会很大，容易与正常电流变化率区分开来。因此，可以通过检测电流变化率来区分正常电流与短路电流。

2. 电流变化率

将正常工作电流i_0和短路电流i_1求一阶导数得

$$\frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t}=\omega I_{m0}\cos(\omega t+\theta-\varphi_0) \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = {} & \omega I_{m1}\cos(\omega t+\theta-\varphi_1)-\frac{1}{T_1}[I_{m0}\sin(\theta-\varphi_0)- \\ & I_{m1}\sin(\theta-\varphi_1)]\exp(-t/T_1) \end{aligned} \tag{5}$$

将$k=I_{m1}/I_{m0}$代入式（5）得

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = {} & \omega kI_{m0}\cos(\omega t+\theta-\varphi_1)-\frac{I_{m0}}{T_1}[\sin(\theta-\varphi_0)- \\ & k\sin(\theta-\varphi_1)]\exp(-t/T_1) \end{aligned} \tag{6}$$

如果直接利用式（1）和式（3）的电流瞬时值作为短路故障的判据依据，则短路前后二者相差$k-1$倍，k值越大，二者之间差别越大。

如果利用式（4）和式（6）的电流变化率作为短路故障的判据依据，则短路前后二者相差$\omega(k-1)$。由此可见，电流变化率之间的差值经ω放大了，因此故障电流更容易被识别。

更重要的是，利用电流变化率作为短路故障判据，相对于利用电流瞬时值作判据，能够提前进行判断，且更快速。

3. 电流变化率分析

利用电流变化率作为短路故障判据依据，当$\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}>kI_{m0}$时，认为发生短路故障。假设短路故障发生在线路最远端时，短路前电流幅值$I_{m0}=40$ A，短路前回路阻抗角$\varphi_0=18.19°$（功率因数为0.95），短路后回路阻抗角$\varphi_0=88°$（功率因数为0.03）。利用Matlab/Simulink进行数值仿真[7]，当短路系数$k=1.0$、$k=1.5$、$k=3.0$、$k=5.0$和$k=15.0$时，短路发生瞬间某相电流变化率与原电流初始相位角θ间的关系如图3所示。

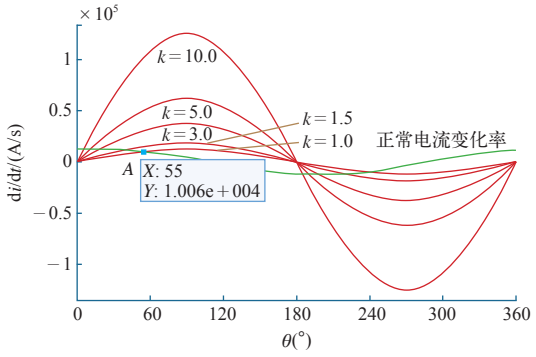

图3　短路瞬间某相电流变化率与原电流初始相位角间的关系

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

短路瞬间，短路电流变化率曲线和正常电流变化率曲线的交点定义为“零时刻可判断点”。从图3可以看出，在原电流初始相位角$\theta\in[0,180°]$范围内，随着短路系数k的增加，零时刻可判断点向y轴靠近。也就是说，对于某一支路上的某短路故障点，其原电流初始相位决定了该点在短路瞬间通过电流变化率不能进行短路故障识别的“相角死区”大小；并且k值越大，该死区越小。图3中，A点是短路系数$k=1.0$时短路电流变化率与正常电流变化率的交点。当该故障支路原电流初始相位大于55°（A点横坐标）小于180°时，短路故障在发生瞬间就能被识别；否则会产生延时，避开“死区”，而且k值越大，延时时间越短。

由图3可知，无论R取何值，在短路瞬间，当原电流初始相位$\theta=0°$时，与零时刻可判断点的距离最远。因此，对应某一k值，原电流初始相位$\theta=0°$的延时时间最长。图4为原电流初始相位$\theta=0°$时，短路系数k分别为1.0、1.5、3.0、5.0和10.0情况下，短路电流随时间变化的曲线。

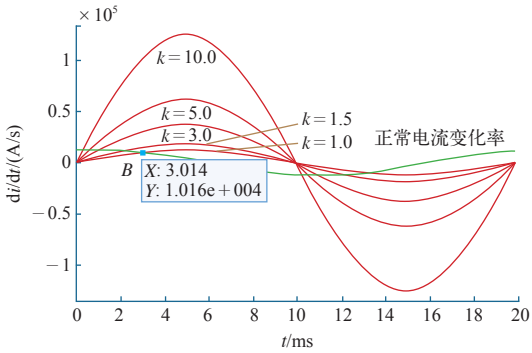

图4　$\theta=0°$时短路电流变化率随时间变化曲线

当原电流初始角$\theta=0°$时，短路电流变化率曲线和正常电流变化率曲线的交点定义为“零相角可判断点”。由图4可以看出，在短路故障发生后的前半个周期范围内，随着短路系数k的增加，零相角可判断点向Y轴靠近。$\theta=0°$且$k=1.0$是故障判断最不利的情况，因为此时延时时间最长。图4中，此时必须在短路故障发生3.014 ms（B点横坐标）以后避开“时间死区”，故障才能被判断识别。但是随着短路系数k的增加，该延时时间迅速减小，如当$k=3.0$时，其延时时间明显小于2 ms。

如果直接使用短路电流作为判据依据，考虑当原电流初始角$\theta=0°$时，短路电流随时间变化的曲线如图5所示。此时短路系数$k=1.0$依旧是故障判断最不利的情况，图5中，此时必须在短路故障发生6.050 ms（C点横坐标）以后才能被判断识别；虽然随着短路系数k的增加，该延时时间也迅速减小，但是其延时时间远远大于利用电流变化率作判据的情况。如当$k=3.0$时，其延时时间明显大于2 ms。

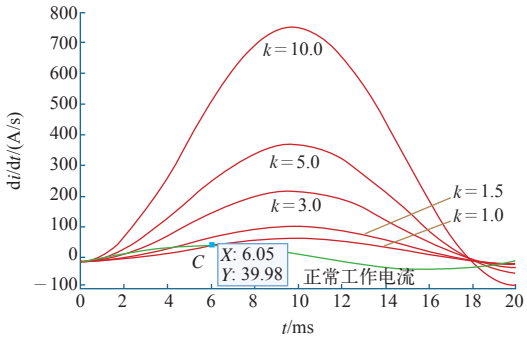

图5　$\theta=0°$时短路电流随时间变化曲线

对于原电流初始相位角$\theta\in[0,180°]$的短路故障，通过电流变化率能够准确快速判断；对于原电流初始相角$\theta\in[180°,360°]$的情况，可以采用全波整流的方式将波形以横轴镜像翻转后按照相同的方法处理即可。

通过以上分析可知，利用电流变化率作为短路故障判据，故障判别速度较快，而且短路电流越大，电流变化率反应越快，越利于缩短短路故障判别时间。

工程应用

按照插值理论，可以用插值多项式作为函数导数的近似值。假设采用等距采样，步长为h，采样时间点分别为t_0、t_1和t_2（$h=t_2-t_1=t_1-t_0$），对应的采样电流数值分别为$i(t_0)$、$i(t_1)$和$i(t_2)$。则数值微分三点公式如下[8]

$$i'(t_0)=\frac{1}{2h}[-3i(t_0)+4i(t_1)-i(t_2)]+\frac{h^2}{3}i''(\xi) \quad (7)$$

$$i'(t_1)=\frac{1}{2h}[-i(t_0)+i(t_2)]-\frac{h^2}{6}i''(\xi) \quad (8)$$

$$i'(t_2)=\frac{1}{2h}[i(t_0)-4i(t_1)+3i(t_2)]+\frac{h^2}{3}i''(\xi) \quad (9)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分别舍去截断误差有

$$i'(t_0)=\frac{1}{2h}[-3i(t_0)+4i(t_1)-i(t_2)] \quad (10)$$

$$i'(t_1)=\frac{1}{2h}[-i(t_0)+i(t_2)] \quad (11)$$

$$i'(t_2)=\frac{1}{2h}[i(t_0)-4i(t_1)+3i(t_2)] \quad (12)$$

式中，$t_0<\xi<t_2$。

实际应用中，在t_0、t_1和t_2时刻连续采集电流值$i(t_0)$、$i(t_1)$和$i(t_2)$，即可根据式（10）～式（12）求得对应的电流变化率$i'(t_0)$、$i'(t_1)$和$i'(t_2)$。假设任意时刻的正常工作电流变化率为$i'(t)$，该时刻经过数据采集、计算后获得的电流变化率为$i'(t)$，若$i_0'(t)>ni_0'(t)$，则判定线路发生短路故障。其中，$i'(t)$为通过事先校准，系统采集计算获得的正常工作电流变化率；n为为了提高判断可靠性人为设定的数值，一般可取短路系数k的1.0～1.7倍。

具体程序流程如图6所示。

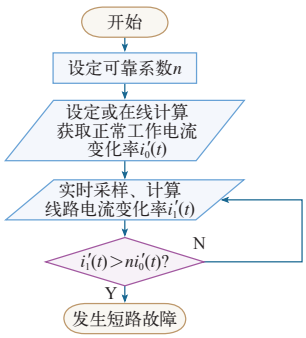

图6　程序流程

正常工作电流变化率$i_0'(t)$可以通过人为设定或者在线采集、计算获得。其目的是为短路电流变化率建立正常的工作电流变化率参考值。程序实时采用实测获得的电流变化率$i'(t)$和设定的该周期时刻$ni_0'(t)$值进行比较，而不是采用$i'(t)$与某一固定数值进行比较，若某一时刻$i'(t)>ni_0'(t)$，则判定发生短路故障。

结束语

与仅仅利用短路电流值作为短路故障判据相比，短路电流变化率能够更快反映短路故障，而且故障越严重，反映越及时。因此利用短路电流变化率作为短路故障判据，可以大大缩短故障检测时间，提高保护动作速度。利用数值微分三点式能够实时计算电流变化率，计算速度快，准确度较高，有利于短路故障的快速判别。

参考文献

[1] 赖昌干．矿山电工学 [M]．北京：煤炭工业出版社，2006：136-140．

[2] 王彦文，高彦．煤矿供电技术 [M]．徐州：中国矿业大学出版社，2013：92-100．

[3] 赵铁英．基于SSCB的煤矿下井电缆快速故障限流器研究 [D]．北京：中国矿业大学（北京），2013：82-83．

[4] 赵敏．基于电流变化率的电网短路保护原理 [J]．电网技术，2008，32 (4)：105-108．

[5] 庞元俊，吉增权．基于电流变化率的短路检测保护技术研究 [J]．煤矿安全，2008 (9)：17-20．

[6] 高彦，李海洪，牛耕．基于电流变化率的矿井电缆短路电流检测的研究 [J]．煤炭工程，2013 (9)：103-106．

[7] 于群，曹娜．MATLAB/Simulink电力系统建模与仿真 [M]．北京：机械工业出版社，2011．

[8] 王兵团，张作泉，赵平福．数值分析简明教程 [M]．北京：清华大学出版社，2012：158-163．

（收稿日期：2015－04－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net