

# 电力系统短路故障快速检测方案研究

吴浩伟, 周 樑, 孙朝晖, 徐正喜

(武汉第二船舶设计研究院, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 常规断路器主要通过电流幅值判断电力系统中的短路故障, 存在检测速度较慢的缺点。利用短路故障时电压跌落、电流增大的特征, 提出了一种通过实时检测电网电压幅值和瞬时有功功率来判断短路故障的快速检测方案。详细说明了电压幅值和瞬时有功功率的快速计算方法, 并提出了可以反应出短路电流变化的虚拟功率。在 Matlab 下完成了仿真研究, 利用 DSP 芯片 TMS2407A 研制出试验装置并完成相关试验。仿真和试验结果证明了该方案可以快速、有效地检测出短路故障, 具有良好的适应性。

**关键词:** 电力系统; 短路故障; 快速检测; 短路电流; 瞬时有功功率

## Study on fast detecting scheme of power system short-circuit fault

WU Hao-wei, ZHOU Liang, SUN Zhao-hui, XU Zheng-xi

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Conventional circuit breakers detect power system short circuit by measuring current magnitude and have disadvantages such as slow response speed. According to the feature of voltage falling and current rising when short-circuit fault occurs, a fast detecting scheme is proposed, which estimates short circuit by detecting the magnitude of voltage and instantaneous active power in real-time. The fast algorithm of voltage magnitude and instantaneous active power is demonstrated in detail and virtual power is put forward to identify the characteristic of short-circuit current. Matlab simulation and an experiment prototype based on DSP TMS320F2407 have been finished. The results verify that the proposed scheme is quick and feasible and it has a wide application range.

**Key words:** power system; short-circuit fault; fast detection; short-circuit current; instantaneous active power

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0088-05

## 0 引言

目前, 国内低压供配电网中所采用的断路器, 其短路保护原理主要是利用短路电流所产生的电磁力或者热效应使断路器保护跳闸, 存在响应速度较慢的缺点, 在某些场合已经不能满足现代电力系统的发展需求。

随着计算机和数字信号处理技术的飞速发展, 基于微控制器的断路器智能脱扣器迅速成为研究热点<sup>[1-3]</sup>。此类智能脱扣器虽然采用了现代数字检测和处理技术, 但其检测原理依然主要是利用检测电流幅值来判定短路故障是否发生。此外, 由于短路电流中不仅存在快速衰减的非周期分量, 而且动态变化范围大, 加之检测环节存在互感器磁饱和等多种因素的影响, 直接对短路电流的幅值进行准确检测十分困难, 因此此类方法通常要求短路电流远大于

额定值时才能准确地做出短路故障判断。由于受到线路阻抗、短路初始状态的影响, 短路故障初期的电流上升速度可能较慢, 达到判断阈值需要较长的时间。因此, 此类检测方法速度较慢。

对于三相三线不接地的电力系统, 在发生单相接地故障时, 系统的线电压仍然保持对称, 故障电流也较小, 系统仍可以运行较长时间。而当发生两相短路和三相短路故障时, 电流短路电流通常很大, 此时需要尽快切除故障支路。因此对于严重危害电网的安全运行的短路故障而言, 需要快速的故障检测方案。

对于三相三线不接地小容量电网、尤其是舰船电网, 由于电网的线缆长度短, 线路阻抗低, 发生恶性短路故障时电压跌落、电流增大的特征明显。利用这一特征状态, 本文提出了一种通过同时实时检测电网电压和功率的异常变化来检测电网中短路

故障的快速检测方案。该方案通过对两个判据进行综合判断, 其检测响应速度将快于传统单一的电流检测法。

## 1 电压快速检测算法

在交流电压幅值检测算法上, 常用的方法有: 周期积分法、快速 FFT 算法、d/q 算法等。周期积分法和快速 FFT 算法至少需要半周波的有效信息<sup>[4]</sup>, d/q 算法一般更适用于三相对称系统, 而对于单相系统或者三相系统的非三相同时短路故障, 通常不能直接运用<sup>[5]</sup>。

为考虑一般性, 对任意交流信号  $u(t) = U \sin(\omega t + \theta)$ , 在采样频率为  $\omega_s$  下的连续三次数字采样信号为:

$$u(k) = U \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$u(k-1) = U \sin(\omega t + \theta - \omega_s T) \quad (2)$$

$$u(k-2) = U \sin(\omega t + \theta - 2\omega_s T) \quad (3)$$

根据式 (1) ~ (3) 可推导:

$$U \cos(\omega t + \theta - \omega_s T) = \frac{u(k) - u(k-2)}{2 \sin(\omega_s T)} \quad (4)$$

通过式 (2) 和式 (4) 可得:

$$U = \sqrt{u^2(k-1) + \frac{1}{4 \sin^2(\frac{2\pi}{N})} (u(k) - u(k-2))^2} \quad (5)$$

式 (5) 中,  $N$  为一个工频周波内的采样次数。

由式 (5) 可以看到, 对于任意正弦信号只需要三点连续的数字采样信号就可以计算出信号的峰值, 进而得到信号的幅值。该算法简单快速、适应面广。由于实际电压波形中往往有大量谐波成分存在, 以及算法本身会放大高频噪声, 因此该算法的计算结果在实际使用中需要数字滤波器进行滤波处理。

## 2 功率快速检测算法

根据传统功率理论, 功率是系统单位时间内的做功量, 是一个平均值概念, 因此即使通过快速 FFT 计算也需要一个周波才能得到功率信息, 这样的检测速度不能满足某些特殊领域内快速检测和快速保护的要求。

1983 年, 日本学者 Akagi 提出了瞬时无功功率理论<sup>[6]</sup>, 该理论有效解决了在三相系统中当电压及电流不对称或畸变时的三相瞬时有功功率及无功功率的计算问题。

在一个三相系统中, 可以将各相电压和电流从三相 abc 系统通过数学变换转换到  $\alpha\beta$  系统。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  和  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分别是电压矢量  $u$  和电流矢量  $i$  在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴上的投影。在  $\alpha-\beta$  平面上, 系统总的瞬时有功功率为:

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta \quad (8)$$

将式 (7) 代入, 可得

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (9)$$

对于三相无中线系统, 由于  $u_a + u_b + u_c = 0$ ,  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 式 (9) 可进一步化简为:

$$p = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c \quad (10)$$

文献[7]将传统功率理论的有功功率和无功功率推广到瞬时值概念, 建立了三相电路瞬时无功理论与传统理论的统一数学描述, 说明瞬时功率理论与传统功率理论实际上是内在统一的。

对于舰船电网和许多处于系统末端的低压电网而言, 由于电网规模通常较小, 电缆的阻抗值也较小, 当系统中出现直接金属短路故障时, 短路状态下测量点的电压幅值可能会降到几乎为 0。如果直接用当前电流和当前电压通过式 (10) 来计算功率, 可能会造成计算结果接近于 0, 从而失去判断意义。

本方案在进行功率检测时, 所用的电流值是当前的采样值, 而电压值则是上一个周波对应时刻的电压采样值。这样计算出的功率虽然是虚拟的, 但当电网正常运行时, 电网电压周期性的重复, 上一周波的电压与当前周波的电压基本一致, 计算的“虚拟功率”与实际功率基本相同; 而当短路故障发生时, 由于算法中所用的电压值并不会立即发生变化, 而只有电流值发生变化, 此时虚拟功率的变化情况则完全对应着短路电流的变化, 因此可以用检测功率代替检测电流来判断短路故障是否发生。

通过上述处理后, 对于一个工频周波采用样点数为  $N$  的数字采样系统, 在第  $k$  拍采样过程中, 式 (10) 对应的数字表达式为:

$$p(k) = u_{ab}(k-N) i_a(k) + u_{cb}(k-N) i_c(k) \quad (11)$$

## 3 数字滤波算法

常见的数字滤波器可分为 FIR 和 IIR 滤波器。

IIR 滤波器的离散形式一般表达为

$$H(z) = \sum_{r=0}^M b_r Z^{-r} / (1 + \sum_{k=0}^N a_k Z^{-k})$$

比的有理分式形式来逼近所需的频率特性，可以用较低的阶数来获得高的选频特性。在高采样率和高阶数下，IIR 的系数容易出现接近于 0 的小数，在用定点 DSP 实现时量化误差、舍入误差都会对其性能造成一定的影响。FIR 的离散形式为

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k Z^{-k}$$

要求的频率特性。FIR 滤波器结构形式简单，没有反馈递归环节，对高频成分的衰减速度快。虽然 FIR 滤波器通常需要更多的存储单元，但对于现代数字信号处理器而言，一般具有足够的存储空间。

对功率和电压的快速算法均采用属于 FIR 滤波器的 8 点滑窗平均滤波法，其数字表达式如式 (12) 所示。

$$H(z) = \frac{1}{8} \sum_{k=0}^7 z^{-k} \quad (12)$$

该滤波算法结构形式简单，不含有小数项系数，整个计算过程仅通过数组求和和移位就可完成，便于定点 DSP 的实现。该滤波器的波特图如图 1 所示，滤波器的低通带宽约为 170 Hz，在 350 Hz 时已可提供约 -20 dB 的衰减，其衰减速度快于常规的二阶 BUTTERWORTH IIR 滤波器。

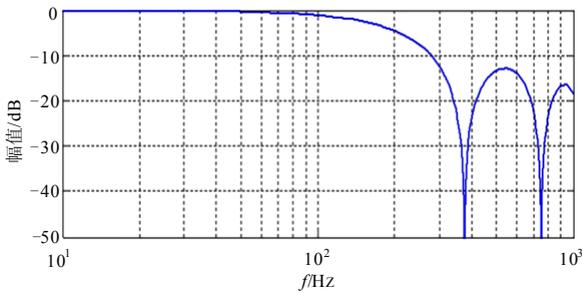


图 1 数字滤波器的波特图  
Fig.1 Bode diagram of digital filter

#### 4 算法仿真研究

利用数学仿真软件 Matlab 对上述快速检测算法的性能进行分析，仿真模型如图 2 所示，为和试验过程保持一致，采用定步长仿真，仿真步长取位 1/3000 s。

##### 4.1 突加 10 kW 有功功率

在仿真时间 0.1 s 时突加 10 kW 阻性负载，由图 3 可见，快速检测算法 2.5 ms 后已经能够准确地计算出功率的变化。

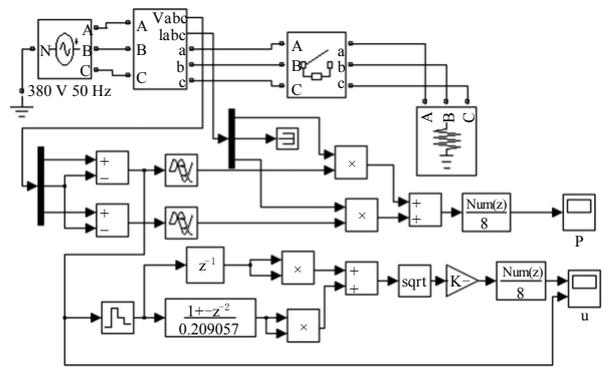


图 2 Matlab 仿真模型  
Fig.2 Matlab simulation model

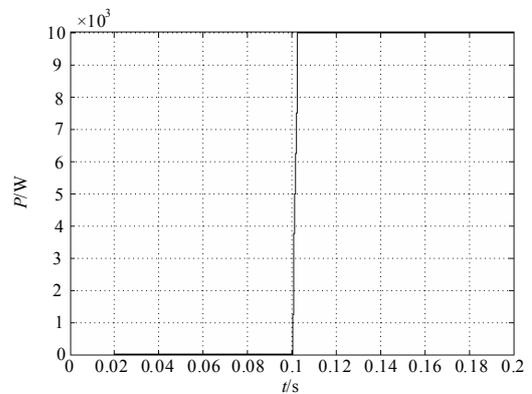


图 3 突加 10 kW 有功功率检测仿真  
Fig.3 Detection simulation of 10 kW active power abruptly increasing

##### 4.2 380 V 电压幅值突降 30%

在仿真时间 0.1 s 时电压幅值突降 30%，由图 4 可见，快速检测算法在 3 ms 后便检测出电压幅值从 380 V 降低为 266 V。

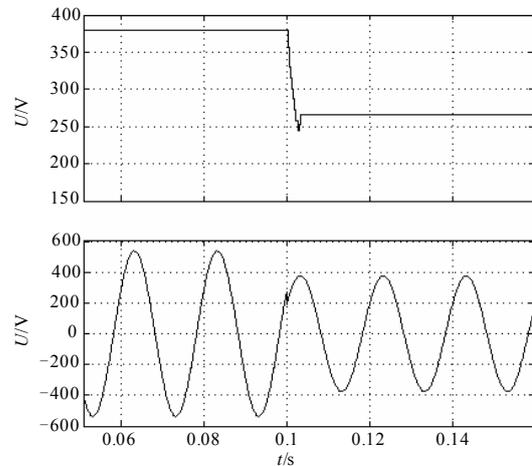


图 4 380 V 电压幅值突降 30%检测仿真  
Fig.4 Detection simulation of voltage magnitude abruptly decreasing 30%

### 4.3 快速检测算法适应性分析

对图 2 所示的仿真模型, 考虑实际电网中电参数可能出现的变化情况, 仿真研究了电压频率出现  $\pm 5\%$  波动、电网电压 THD 恶化到 5% 两种情况下, 快速检测算法的计算偏差和适应性。仿真结果分别见表 1 和表 2 所示。

表 1 频率漂移  $\pm 5\%$  时算法适应研究

Tab.1 Algorithm adaptability when frequency shifts  $\pm 5\%$

	检测值	理论值	误差率/%
电压快速检测算法	362~398	380	0~4.7
功率快速检测算法	9 510	10 000	4.9

表 2 电压波形 THD=5% 时算法适应研究

Tab.2 Algorithm adaptability when voltage wave THD=5%

	检测值	理论值	误差率/%
电压快速检测算法	350~420	399	0~12.5
功率快速检测算法	9 600~10 660	11 025	3.3~12.9

由表 1 和表 2 的结果可见, 快速检测算法对电网品质的波动变化情况有较好的适应性。

相对于短路状态下电压和功率的巨大变化, 快速算法的偏差值不会对检测判断的准确性产生较大影响, 并且偏差值不会随着时间累积, 只要适当的加强软件滤波算法就能降低最大偏差。

## 5 试验结果

基于本文所提出的快速检测方案, 研制了一台短路故障快速检测装置, 并利用我所的电力系统动态模拟试验室完成相关试验研究。短路故障检测装置采用 TI 公司数字信号处理器 TMS320F2407A 做为主控芯片, 配合 12 位的 A/D 芯片 AD7864 以及通用电压电流互感器 DVDI-01 组成数字检测系统。DSP 芯片 TMS320F2407A 具有 40MIPS 的高速运算能力, 能实现数据快速运算和实时处理, 其软件算法的流程图如图 5 所示。为了保证实时检测和同步测量的要求, 采样和故障检测过程均在周期中断中完成, 周期中断频率为 3 kHz。

图 6 和图 7 为快速检测三相和相间短路故障的试验结果,  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ca}$  分别为三相线电压波形,  $I_a$  为 A 相电流, 曲线 S 为本装置检测到短路故障后发出的保护信号。短路电流的峰值较大, 超出了记录范围, 因而电流波形出现了一定的削顶现象。保护信号 S 为 12 V 的直流电平信号, 为了能够和电压电流波形在同一窗口内清晰地观察, 在记录时将其幅值适当放大。

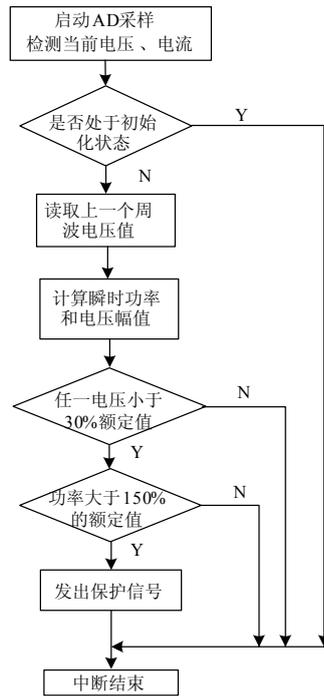


图 5 快速检测算法流程图

Fig.5 Flow chart of fast detecting scheme

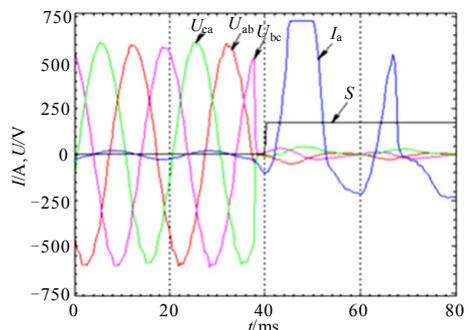


图 6 三相短路故障检测试验

Fig.6 Experiment result of power system three-phase short circuit

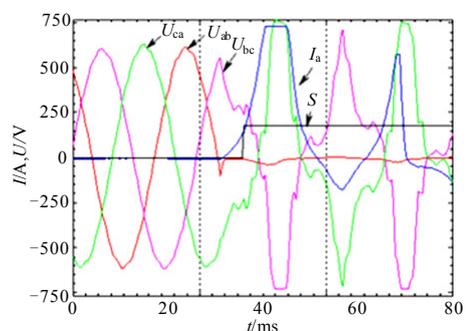


图 7 相间短路故障检测试验

Fig.7 Experiment result of power system phase to phase short circuit

由试验结果可见,不论是三相还是相间短路故障,本检测方案均可以在短路电流远未上升到峰值之前做出判断,其检测判断时间仅为 2~4 ms,相比与常规的短路电流检测方案,其检测速度大大提高。

由于试验装置的电流互感器并未采用高饱和倍数的专用互感器,仅采用了常规测量用的普通电流互感器,从实验波形中也可以看到,检测到的互感器二次侧电流出现磁饱和现象。但即便如此,快速检测装置依然能够准确地判断出短路故障,体现出本方案出对检测器件具有良好的适应性。

## 6 结束语

针对常规断路器通过电流幅值判断短路故障、检测速度较慢的问题,本文提出了实时检测电网电压幅值和瞬时有功功率,通过对电压的异常跌落和功率的异常变化进行综合判断来识别短路故障的快速检测方案。

相关仿真研究和试验结果表明,本方案能够快速、有效地检测出电力系统中短路故障,并且对电流互感器的饱和倍数没有特殊要求,具有良好的适用性。

## 参考文献

[1] 刘俊, 马志瀛, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 65-70.  
LIU Jun, MA Zhi-ying, et al. Online real-time calculation of short-circuit current based on improved gradient estimation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (10): 65-70.

[2] 夏天伟, 任继武, 李海波. 智能脱扣器的研究[J]. 电工技术杂志, 2001, (4): 23-25.  
XIA Tian-wei, REN Ji-wu, LI Hai-bo. The research of intelligent release[J]. Electrotechnical Journal, 2001, (4): 23-25.

[3] 张吉, 林鹤云. 基于 DSP 的智能化断路器及其主算法的实现[J]. 电气传动, 2004, 23 (7): 69-71.  
ZHANG Ji, LIN He-yun. Intelligent circuit breaker based

on DSP and the realization of the main algorithm[J]. Electrical Transmission, 2004, 23 (7): 69-71.

[4] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 14 (1): 24-27.  
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Power quality disturbance identification using dq conversion-based neural classifier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 14 (1): 24-27.

[5] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无延时的改进 d-q 变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 23 (7): 69-71.  
ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of improved d-q transform without time delay in dynamic disturbance identification[J]. Power System Technology, 2004, 23 (7): 69-71.

[6] Akagi N A, et al. Instantaneous reactive power components comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on IA, 1984, 20 (3): 625-630.

[7] 刘进军, 王兆安. 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义[J]. 电工技术学报, 1998, 13 (6): 6-11.  
LIU Jin-jun, WANG Zhao-an. Uniform mathematical description of instantaneous reactive power theory and conventional power theory and its physical meaning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13 (6): 6-11.

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-05-20

### 作者简介:

吴浩伟 (1981-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电能检测与变换技术; E-mail: cos\_wu@163.com

周 樑 (1980-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统监控与测量;

孙朝晖 (1978-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中运用。

(上接第 70 页 continued from page 70)

收稿日期: 2009-12-31; 修回日期: 2010-01-25

### 作者简介:

王 昕 (1977-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电网事故分析, 电网、发电厂继电保护现场调试工作;

E-mail: Wangxin\_brave@yahoo.com.cn

井雨刚 (1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电网事故分析, 电网、发电厂继电保护现场调试工作;

王大鹏 (1970-), 女, 教授, 硕士研究生, 主要从事继电保护及自动化研究工作。