

# 智能电网用断路器智能操作算法及 在 DSP 上的定点仿真

刘 俊,段 超,方万良,马志瀛

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

**摘要:** 简要介绍了断路器智能操作对信号处理的要求,给出了断路器动作需要满足的强实时性条件。对额定电流采用改进的快速傅里叶变换进行算法仿真,减少了计算量。对短路电流采用递推最小二乘校正算法进行仿真,使迭代法可以在 DSP 上实现,缩短了其消耗的采样数据窗口,且其实时性仍可达到系统的要求。基于 Simulink 软件对系统从正常工作状态过渡到短路工作状态的过程建立仿真模型,生成了分别包含 2 种状态的全电流信号;然后基于 MATLAB 软件,先对短路电流的软件识别算法进行了仿真,再结合改进快速傅里叶变换、递推最小二乘校正算法对全电流信号进行了仿真,仿真结果证明算法可满足智能操作的强实时性要求。

**关键词:** 断路器; 智能操作; 傅里叶变换; 递推最小二乘校正; DSP; 仿真

**中图分类号:** TM 571.6

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.016

## 0 引言

在微机继电保护的算法中,用于计算系统短路电流的方法<sup>[1]</sup>主要有傅里叶变换法、小波变换法和最小二乘法。傅里叶变换是对周期函数进行相应的变换,对于含有非周期分量的故障电流信号,不能直接套用周期函数的计算式<sup>[2-3]</sup>。小波变换必须基于一定长度的特征波形,方可进行小波包分解或者多分辨率分析,也具有局限性。这就不能满足继电保护算法中智能操作在线状态的实时计算的严格要求。相对而言,最小二乘法对数据量要求比较灵活,具有较大的理论价值。然而受直流衰减分量和白噪声的影响,最小二乘法通常也需要比较长的采样窗口才能准确计算出短路电流基波与各次谐波分量的幅值和相位,因此需要进行迭代运算来改进算法的收敛速度和计算精度。

以往的研究多集中于对继电保护算法的软件实现<sup>[4-5]</sup>,也有一些智能控制在断路器方面的应用研究<sup>[6-9]</sup>。本文除了理论上对算法进行推导以外,还在 Dual-CPU 结构上设计并测试了智能电网保护用智能操作控制器,进行了硬件的定点仿真。

## 1 断路器智能操作对信号处理的要求

断路器的智能操作<sup>[6]</sup>,着眼于断路器分闸运动特性的自适应控制,通过智能操作控制器实时地识别出断路器的工作状态、调整好断路器的操动机构,使断路器处于最佳的分闸运动特性状态。

智能识别模块是智能操作控制器的核心,需要

从采集到的系统信号中识别出系统状态。本文先对智能识别模块涉及到的算法分别进行软件仿真,而后再通过对智能识别模块建模并进行了硬件实现,为断路器智能操作的实现提供理论和试验支撑。

在交流系统中,系统电流随着负载的变化而变化,根据负载的不同将系统状态分为短路故障工作状态和系统正常运行状态;电流则分别对应于短路电流和正常电流。在智能操作功能中,在系统正常工作状态下,断路器的操作无较强实时性要求;智能识别模块调用的算法可首先考虑精度的要求,其次考虑计算消耗时间的要求。

在系统短路状态下,断路器的动作必须满足较强实时性,必须保证预处理的时间应小于继电保护装置通过主控室发出的分闸命令,或两者间的时间差处于系统所能接受的程度,即式(1)。在高压系统中,继电保护时间  $t_{rel}$ <sup>[11]</sup>通常为 30~80 ms,取最严酷的条件  $t_{rel}=30$  ms;电磁开关的调节时间<sup>[7]</sup>即  $t_{adj}$  为 15 ms,因此,智能识别模块消耗的时间  $t_{iden}$  由短路电流识别耗时  $t_{s\_iden}$  和短路电流计算耗时  $t_{s\_cal}$  组成,在最严酷的条件下,不能超过 15 ms,即式(2)所示。

$$t_{iden} + t_{adj} \leq t_{rel} \quad (1)$$

$$\begin{cases} t_{s\_iden} + t_{s\_cal} = t_{iden} \leq t_{rel} - 15 \\ 30 \leq t_{rel} \leq 80 \end{cases} \quad (2)$$

## 2 额定电流的算法仿真

### 2.1 改进快速傅里叶变换算法的推导

在系统正常工作状态下,正常电流处于稳定状态,主要由正弦的基波和谐波组成。快速傅里叶变换(FFT)算法<sup>[8]</sup>对周期信号采样一个周期,可以计算出

正弦分量的幅值和相位。针对正常电流的实数值特性,可对 FFT 进行改进得到改进快速傅里叶变换 (IFFT)算法,减少其计算量。

FFT 利用蝶形因子,对离散傅里叶变换<sup>[9]</sup>进行快速运算,从而获得周期信号中各正弦分量的幅值和相位。考虑到正常电流的采样点均为实数,因此可以利用 FFT 的对称性进一步简化运算。设  $X(n)$  是 1 个  $N$  点实数序列,将其分解为  $N/2$  点奇、偶子序列  $X_o(n)$  和  $X_e(n)$  如式(3)所示,并按虚部和实部组合为复数序列  $g(n)$  如式(4)所示;则由式(5)可知  $X(n)$  可用  $X_o(n)$  和  $X_e(n)$  来表达。

$$\begin{cases} X_e(n)=[G(n)+G^*(N/2-n)]/2 \\ n=0,1,\dots,N/2-1 \\ X_o(n)=[G(n)+G^*(N/2-n)]/(2j) \\ n=0,1,\dots,N/2-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$g(n) \triangleq X_e(n)+jX_o(n) \quad n=0,1,\dots,N/2-1 \quad (4)$$

$$\begin{cases} X(n)=[G(n)(1+W_N^{n+N/4})+ \\ G^*(N/2-n)(1-W_N^{n+N/4})]/2 \\ X(n+N/2)=[G(n)(1-W_N^{n+N/4})+ \\ G^*(N/2-n)(1+W_N^{n+N/4})]/2 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $W_N e^{-j2\pi/N}$  为传统 FFT 蝶形因子;  $G$  为合成复数序列  $g(n)$  的 FFT,  $G^*$  为其共轭。

由于  $g(n)$  已是复数,不能再利用其实数特性,故  $X(n)$  的实数分解至此为止。因此,  $N$  点实数序列  $X(n)$  的 FFT 转换为  $N/2$  点的 FFT 来实现,即改进快速傅里叶变换算法。

### 2.2 改进快速傅里叶变换算法的验证

基于 MATLAB 软件,本节对如式(6)所示的信号  $i(t)$ ,采用改进快速傅里叶变换算法进行计算,得幅值和相位如图 1 所示。幅值以第 65 点轴对称(其中第 1 点与第 129 点对称),这与实数的 FFT 幅值对称性一致。

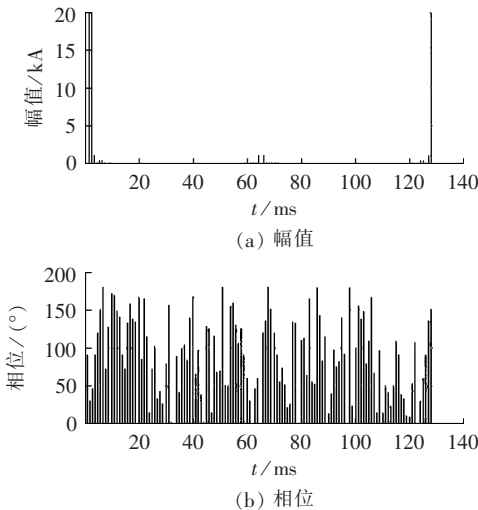


图 1 IFFT 计算的幅值和相位

Fig.1 Amplitude and phase calculated by IFFT

$$\begin{aligned} i(t) \triangleq & 20+20 \sin (\omega_0 t+\pi / 6)+1.0 \sin (2 \omega_0 t+\pi / 4)+ \\ & 0.1 \sin (3 \omega_0 t+\pi / 2)+0.4 \sin (4 \omega_0 t+2 \pi / 3)+ \\ & 0.3 \sin (5 \omega_0 t+5 \pi / 6)+0.01 \sin (6 \omega_0 t+\pi) \end{aligned} \quad (6)$$

取 0~6 次谐波的幅值和相位如表 1 所示,其中幅值误差取相对真值的百分数,0 次谐波为直流,其相位无物理意义。从表 1 中可以看出,谐波幅值的计算误差不超过 4.00%,谐波相位计算准确,从而验证了改进快速傅里叶变换处理不含故障分量电流信号的可行性。

表 1 验证结果  
Tab.1 Verification results

| 参数     | 谐波次数   |        |         |         |         |       |         |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-------|---------|
|        | 0      | 1      | 2       | 3       | 4       | 5     | 6       |
| 幅值/kA  | 20.000 | 19.976 | 0.995 2 | 0.098 9 | 0.392 3 | 0.291 | 0.009 6 |
| 幅值误差/% | 0      | 0.12   | 0.48    | 1.10    | 1.93    | 3.00  | 4.00    |
| 相位/(°) |        | 30     | 45      | 90      | 120     | 150   | 180     |

### 3 短路电流的算法仿真

#### 3.1 递推最小二乘算法的推导

在系统短路工作状态下,短路电流由包含衰减分量的正弦波向稳定的正弦波过渡。传统的最小二乘算法<sup>[10]</sup>,由于涉及到二维矩阵相乘导致计算量太大,在 DSP 上难以实现。本课题组所开发的递推最小二乘校正算法(RLSCA)<sup>[11]</sup>采用递推的方式进行计算,使算法在 DSP 上的实现成为可能,但算法本身消耗的采样数据窗口较长。RLSCA 在递推最小二乘(RLS)法的基础上进行校正,既保证了迭代法在 DSP 上实现,在同样信噪比条件下又缩短了其消耗的采样数据窗口,且其实时性仍可达到系统可接受的程度。

根据电力系统单相短路电流  $i_s(t)$  的表达式<sup>[12]</sup>,  $\omega_0$  取  $100 \pi$ ,  $t$  从短路发生时刻开始计时,  $\alpha$  是短路发生时刻的系统电压初相,  $Z$  是短路时系统回路的等效复阻抗,  $\varphi$  是  $Z$  的阻抗角,  $\tau$  是短路电流的衰减时间常数。为将式(7)简化,并考虑谐波的影响,由于短路通常历时较短,可将直流衰减量泰勒展开取前 2 项,将  $i_s(t)$  近似线性化为式(8)。由最小二乘拟合新目标式,  $\hat{i}_s(t)$  是拟合的短路电流,  $\hat{I}_a$ 、 $\hat{\tau}$ 、 $\hat{I}_{Rk}$ 、 $\hat{I}_{Lk}$  是拟合中的未知量,则  $I_k$ 、 $\theta_k$  可用  $\hat{I}_{Rk}$  和  $\hat{I}_{Lk}$  来近似表达,如式(9)所示。

$$i_s(t) \triangleq I_a e^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^m [I_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k)] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_s(t) \triangleq & \hat{I}_a - \hat{I}_a t / \hat{\tau} + \sum_{k=1}^m [\hat{I}_{Rk} \sin(k\omega_0 t)] + \\ & \sum_{k=1}^m [\hat{I}_{Lk} \cos(k\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} I_k \doteq \sqrt{\hat{I}_{Rk}^2 + \hat{I}_{Lk}^2} \\ \theta_k \doteq \arctan(\hat{I}_{Lk} / \hat{I}_{Rk}) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $I_a$  是直流衰减量值,  $m$  是需要考虑的最高次谐波的次数,  $I_k, \theta_k$  分别是  $k$  次谐波的幅值和相位。

对  $i_s(t)$  采样  $h$  点, 用  $m'$  替代  $m+1$ , 则有拟合矩阵如式(10)所示。  $\hat{I}_{h \times 1}$  为拟合采样值,  $\hat{X}_{2m' \times 1}$  为拟合未知量,  $A_{2m' \times h}$  可离线算出,  $I_{h \times 1}$  为采样值。根据最小二乘拟合准则, 可推得拟合未知量的表达式如式(11)所示, 此即为传统的最小二乘法。用迭代的方法求解实现, 即为 RLS 法。

$$\begin{cases} I_{h \times 1} = A_{2m' \times h}^T \hat{X}_{2m' \times 1} = I_{h \times 1} \\ \hat{I}_{h \times 1} \triangleq [\hat{i}_s(t_1) \quad \cdots \quad \hat{i}_s(t_h)]^T \\ A_{2m' \times h} \triangleq \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin(\omega_0 t_1) & \cos(\omega_0 t_1) & \cdots & \sin(m\omega_0 t_1) & \cos(m\omega_0 t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_h & \sin(\omega_0 t_h) & \cos(\omega_0 t_h) & \cdots & \sin(m\omega_0 t_h) & \cos(m\omega_0 t_h) \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \hat{X}_{2m' \times 1} \triangleq [\hat{I}_a \quad -\hat{I}_a/\tau \quad \hat{I}_{R1} \quad \hat{I}_{I1} \quad \cdots \quad \hat{I}_{Rm} \quad \hat{I}_{Im}]^T \\ I_{h \times 1} \triangleq [i_s(t_1) \quad \cdots \quad i_s(t_h)]^T \\ \min \{ [I_{h \times 1} \quad -A_{2m' \times h}^T \hat{X}_{2m' \times 1}]^T [I_{h \times 1} \quad -A_{2m' \times h}^T \hat{X}_{2m' \times 1}] \} \Rightarrow \hat{X}_{2m' \times 1} = (A_{2m' \times h} A_{2m' \times h}^T)^{-1} A_{2m' \times h} I_{h \times 1} \end{cases} \quad (11)$$

在 RLS 法的基础上可推得 RLSCA。将最小二乘拟合的目标式定为式(12),  $\hat{I}_{Rk}, \hat{I}_{Ik}$  是拟合中的未知量, 其真值对应为  $I_{Rk}$  和  $I_{Ik}$ 。

$$\hat{i}_s(t) \triangleq \sum_{k=1}^m [\hat{I}_{Rk} \sin(k\omega_0 t)] + \sum_{k=1}^m [\hat{I}_{Ik} \cos(k\omega_0 t)] \quad (12)$$

拟合值  $\hat{I}_{Rk}, \hat{I}_{Ik}$  和真值  $I_{Rk}, I_{Ik}$  之间存在误差  $K_{Rk}, K_{Ik}$ , 分别以  $t_1, t_2, t_3$  为起点, 以  $t_l, t_{l+1}, t_{l+2}$  为终点, 对应的拟合变量分别为  $\hat{I}'_{Rk}$  和  $\hat{I}'_{Ik}, \hat{I}''_{Rk}$  和  $\hat{I}''_{Ik}$  和  $\hat{I}'''_{Rk}$  和  $\hat{I}'''_{Ik}$ , 可推导得以  $t_1$  为起点、 $t_l$  为终点的  $K'_{Rk}, K'_{Ik}$  的计算式, 即得到以  $t_1$  为起点、 $t_l$  为终点的  $I'_{Rk}, I'_{Ik}$  的表达式见式(13)。

$$\begin{cases} I'_{Rk} = \hat{I}'_{Rk} - K'_{Rk} \\ I'_{Ik} = \hat{I}'_{Ik} - K'_{Ik} \end{cases} \quad (13)$$

给定 3 个相同初值, 分别从第 1、2、3 点递推到第  $h-2, h-1, h$  点, 每次递推后都计算出当次  $I'_{Rk}, I'_{Ik}$ , 再根据前后 2 次误差进行判断, 若不满足条件则继续递推, 若满足条件则递推截止, 即为 RLSCA。

### 3.2 短路电流算法的验证比较

基于 MATLAB 软件, 本节对式(14)所示信号  $i_s(t)$ , 分别用 RLS 法、RLSCA 进行计算。

$$\begin{aligned} i_s(t) \triangleq & [-20e^{-t/\tau} + 20\sin(\omega_0 t + \pi/6) + \\ & 1.0\sin(2\omega_0 t + \pi/4) + 0.1\sin(3\omega_0 t + \pi/2) + \\ & 0.4\sin(4\omega_0 t + 2\pi/3) + 0.3\sin(5\omega_0 t + 5\pi/6) + \\ & 0.01\sin(6\omega_0 t + \pi)] \times [1 + \text{randn}(t) \times 10^{(-\text{SNR}/20)}] \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $\text{randn}(t)$  为叠加的随机噪声, SNR 表示信噪比的数值。

对各种参数取经典值, 分别用 2 种算法计算短路电流。噪音取 50 dB, 衰减时间常数  $\tau$  取 0.045 s, 每个周期采样 128 个点, 取 1 个周期采样窗口, 误差取真值的 5%; 本着观察的目的不作截止判断, 连续计算 100 次, 图 2 和图 3 分别为 2 种算法算出的基波的实部平均值  $\bar{R}_e$ 、虚部平均值  $\bar{I}_m$  和正确率  $r$ 。

从图 2 和图 3 看出: 随着递推点数增加, 2 种算法的结果均逐步趋近真值; RLS 法需 16 ms 才能计

知量,  $A_{2m' \times h}$  可离线算出,  $I_{h \times 1}$  为采样值。根据最小二乘拟合准则, 可推得拟合未知量的表达式如式(11)所示, 此即为传统的最小二乘法。用迭代的方法求解实现, 即为 RLS 法。

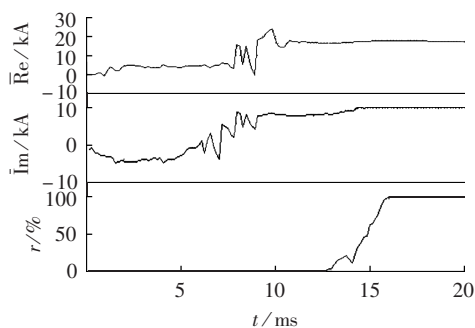


图 2 RLS 算法计算出的基波实部、虚部平均值和正确率  
Fig.2 Averages of fundamental wave real and imaginary parts calculated by RLS algorithm and correctness rate

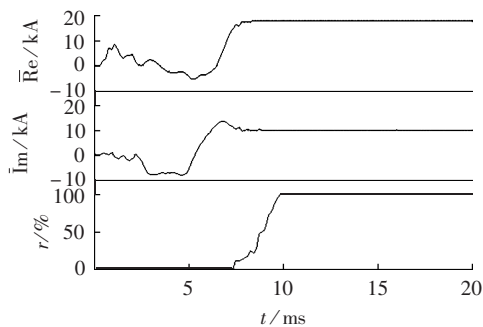


图 3 RLSCA 算出的基波实部、虚部平均值和正确率  
Fig.3 Averages of fundamental wave real and imaginary parts calculated by RLSCA and correctness rate

算出正确的结果, RLSCA 仅需 10 ms 即可计算出 100% 正确的结果, 故后者优于前者。

测试方法不变, 改变算法影响参数即 SNR 和  $\tau$ , 分别计算短路电流得表 2。从表 2 可以看出: 在  $\tau$  相同时, 随着 SNR 的降低, 2 种算法耗时均延长; 在 SNR 相同时, 随着  $\tau$  缩短, RLS 法耗时延长, 并且当  $\tau$  取 10 ms 时算法已不再稳定, 而 RLSCA 耗时则近似不变; 在  $\tau$  和 SNR 均相同时, RLSCA 耗时明显短于 RLS 法, 故本文的 RLSCA 计算短路电流较优。

由于实际计算短路电流时只计算 1 次, 在此采用连续 5 点判断的方法对式(14)用 RLSCA 计算 1

表 2 不同 SNR 和  $\tau$  下 2 种算法收敛的耗时  
Tab.2 Convergence time under different SNRs and  $\tau$ s for two algorithms

| SNR/dB | $\tau$ /ms | 耗时/ms |       |
|--------|------------|-------|-------|
|        |            | RLS   | RLSCA |
| 30     | 10         | >20.0 | 14.5  |
|        | 45         | 18.2  | 14.8  |
|        | 100        | 17.4  | 15.1  |
| 40     | 10         | >20.0 | 12.1  |
|        | 45         | 17.2  | 12.3  |
|        | 100        | 17.4  | 12.3  |
| 50     | 10         | >20.0 | 9.4   |
|        | 45         | 16.2  | 10.0  |
|        | 100        | 16.2  | 10.0  |

次,其基波实部 Re、虚部 Im 和判断正确标志如图 4 所示,标志位用前后误差 5% 判断。用连续 5 点判断得其最终耗时 10.16 ms。

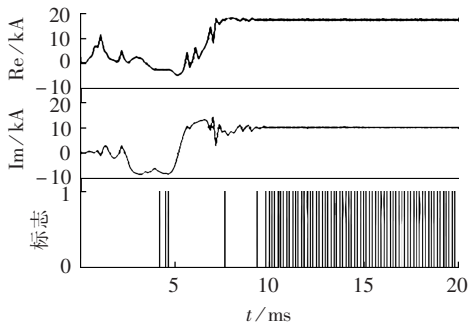


图 4 RLSA 计算出的基波实部、虚部和判断标志  
Fig.4 Real and imaginary parts of fundamental wave calculated by RLSA and judgment sign

4 智能操作控制器的系统定点仿真

前文分别对正常电流和短路电流计算算法进行软件验证后,本节再基于 Simulink 软件对系统从正常工作状态过渡到短路工作状态的过程建立仿真模型,生成了分别包含 2 种状态的全电流信号;然后基于 MATLAB 软件,先对短路电流的软件识别算法进行了仿真,而后结合改进快速傅里叶变换、RLSCA 对全电流信号进行了系统仿真,结果可被系统接受,从而为智能操作的实现提供了算法支持。

4.1 系统模型的建立与分析

为分析方便,将电力系统视为由一个无穷大功率电源和三相对称的电阻、电感组成。当发生三相对称短路时,为保持前后分析一致,取其单相电路图如图 5 所示。衰减时间常数取 0.045 s;短路电流稳态如式(14)中的正弦量所示,则电压源分别按式(15)计算。断路器导通电阻、绝缘电阻分别取  $10^{-5}$ 、 $10^9 \Omega$ ,断路器的通断时序取为  $[(0 \ 0.06 \ 0.10), (0 \ 1 \ 1)]$ ;仿真参数设置中,最大可变步长取  $(0.02/128)/100$ ,即隔 100 点抽样,解法器取 ode15 s(stiff/NDF),解法相对精度取  $10^{-5}$ ;仿真时间取  $[0, 1.0]$ s。

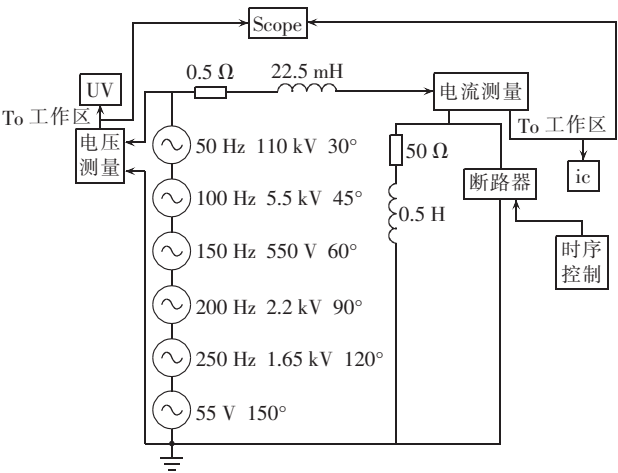


图 5 三相对称短路状态下单相电路图  
Fig.5 Single-phase circuit of three-phase symmetry short circuit

$$U = (R_s + jk\omega_0 L_s)I_s \quad k=1, 2, \dots, 6 \tag{15}$$

其中,  $I_s$  为对应正弦量的相量,  $R_s$ 、 $L_s$  分别为短路时的电阻、电感。

基于 Simulink 对图 5 进行仿真,取短路电流  $i_d$  在  $[0, 0.4]$  s 间的波形如图 6 所示,与文献[14]所分析的短路电流波形一致。

采用改进快速傅里叶变换,分别对式(16)、(17)信号  $i_t$  取 1,即  $i_d$  的正常电流、短路稳态电流各取 1 个周期采样窗口进行计算。结果取前 6 次谐波,如表 3 和表 4 所示,与式(14)基本吻合。

$$i_t = i_d(j) \quad j=1, 2, \dots, 128 \tag{16}$$

$$i_t = i_d(49N+j) \quad N=128; j=1, 2, \dots, 128 \tag{17}$$

用 RLSCA 对式(18)所示信号  $i_t$ ,即  $i_d$  的短路电流取 1 个周期采样窗口进行计算。计算结果为:计算耗时 7.8 ms;衰减因子  $e^{-T_s/\tau}$  为 0.9965,  $T_s$  为采样周期;基波实部为 17.4140 kA,基波虚部为 9.8348 kA,

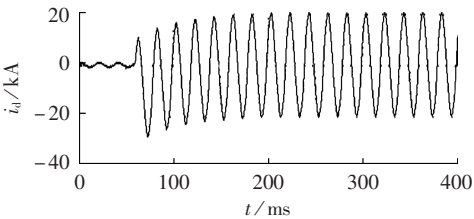


图 6 三相对称短路状态下单相短路电流波形  
Fig.6 Single-phase current of three-phase symmetry short circuit

表 3 正常电流的谐波分析结果  
Tab.3 Harmonic analysis results of normal current

| 参数       | 谐波次数    |         |        |        |        |        |
|----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
|          | 1       | 2       | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 基波实部/kA  | 0.5638  | 0.0334  | 0.0042 | 0.0140 | 0.0057 | 0      |
| 基波虚部/kA  | -0.6017 | -0.0262 | 0.0004 | 0.0094 | 0.0112 | 0.0004 |
| 谐波幅值/kA  | 0.8246  | 0.0424  | 0.0042 | 0.0169 | 0.0125 | 0.0004 |
| 谐波相位/(°) | 43.14   | 51.89   | 94.76  | 123.73 | 153.14 | 177.23 |

表 4 短路稳态电流的谐波分析结果  
Tab.4 Harmonic analysis results of short circuit current

| 参数       | 谐波次数     |         |         |        |        |        |
|----------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4      | 5      | 6      |
| 基波实部/kA  | 9.8232   | 0.6903  | 0.0989  | 0.3469 | 0.1572 | 0.0005 |
| 基波虚部/kA  | -17.3930 | -0.7169 | -0.0028 | 0.1833 | 0.2449 | 0.0096 |
| 谐波幅值/kA  | 19.9752  | 0.9952  | 0.0989  | 0.3923 | 0.2910 | 0.0096 |
| 谐波相位/(°) | 29.46    | 43.92   | 88.38   | 117.84 | 147.30 | 176.76 |

基波幅值为 19.7819 kA,基波相位为 29.46°。该结果与式(14)及表 3、4 的结果相一致。

$$i_t=i_d(3N+j) \quad N=128;j=2,3,\cdots,N+1 \quad (18)$$

4.2 短路电流的软件识别

在系统短路工作状态下,短路电流由包含衰减分量的正弦波向稳定的正弦波过渡。文献[15]分别用软件实现和硬件实现的方法对短路电流进行识别,得出软件实现耗时更短的结论。考虑到软件实现的方法不易受环境参数和元器件参数的影响,并且当采样速度提高时其消耗的时间会更短,因此本节采用软件实现的方法进行短路电流的识别,在此进行推导和验证。

短路电流软件识别通常采用相电流差突变法<sup>[17]</sup>,即当满足式(19)时,认为电力系统存在短路; $N$ 为一个周期的采样点数, $I_{th}$ 为电流阈值,常取额定相电流幅值的 3~10 倍。为防止由于干扰引起的误动作,在此采用 3 点连续判断满足上述判据的条件,以确认短路的发生。

$$\Delta i_k=i_k-i_{k-N}\geq I_{th} \quad (19)$$

电流阈值  $I_{th}$  取 4 倍的正常电流基波幅值(本例中为 4.85 倍), $N$  取 128;基于 Simulink 对图 5 进行仿真,仿真时间取  $[0,0.1]$ s,从  $-180^\circ\sim 180^\circ$  改变系统电压基波的初相角,得短路电流  $i_d$ ;取信号  $i_t$  如式(20)所示,SNR 取 50 dB,对其采用 3 点连续相电流差突变法进行识别,可以得到短路识别耗时曲线如图 7 所示。

$$i_t=i_d(j)\times[1+\text{randn}(t)\times 10^{(-50/20)}] \quad j=1,2,\cdots,4N \quad (20)$$

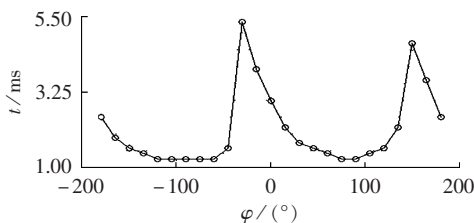


图 7 单相短路电流识别耗时曲线  
Fig.7 Identification time of single-phase short circuit current

结合图 5、7 得出如下分析: $\varphi$  为  $\arctan(0.045\omega_0)$  即  $86^\circ$  时,当  $\alpha-\varphi=\pm 90^\circ$  时,直流衰减分量最大,短路电流小半波影响最大,短路识别耗时最长,约 5.5 ms;

当  $\alpha-\varphi$  趋近  $\pm 90^\circ$  时,直流衰减分量逐步增大,短路电流小半波影响逐步增大,短路识别耗时亦渐渐延长;当  $\alpha-\varphi=0^\circ$  或  $-180^\circ$  时,直流衰减分量几乎为零,短路电流小半波近似消除,短路识别耗时亦最短,约 1.3 ms;当  $\alpha-\varphi$  趋近  $0^\circ$  或  $-180^\circ$  时,直流衰减分量逐步减小,短路电流小半波影响减小,短路识别耗时亦渐渐缩短。

4.3 系统在 DSP 的定点仿真

改进快速傅里叶变换每采样一个周期正常电流数据计算一次,短路电流软件识别算法耗时易受系统电压基波初相的影响,RLSCA 耗时易受 SNR 的影响,综合考虑以上因素,先后调用 3 种算法,对全电流信号进行系统仿真。

将各种参数取经典值,对全电流信号进行系统仿真。基于 Simulink 对图 5 进行仿真,仿真时间取  $[0,0.1]$ ms,得短路电流  $i_d$ ;取信号  $i_t$  如式(21)所示,SNR 取 50 dB。可得系统仿真中,改进快速傅里叶变换的计算结果与表 3 相同;短路电流软件识别算法耗时 1.4 ms;RLSCA 算出的基波实部、虚部和判断标志如图 8 所示,标志位用前后误差不超过 5% 判断,用连续 5 点判断其耗时 9.5 ms,计算得短路基波幅值为 20.00 kA,在 0.06 s 处的相位为 29.46°。图 8 中的基波实部、虚部波形与图 4 在稳态值上差别较大,这是因为图 4 中短路电流的起点相位为  $30^\circ$ ,即实部、虚部真值分别为 17.32 kA 和 10.00 kA,而图 8 中的起点相位随短路识别耗时的不同而变化。此时,系统仿真的结果与前面的分析一致,其短路识别与计算总耗时 10.94 ms,式(2)成立,即可满足智能操作的强实时性要求。

$$i_t=i_d(j)\times[1+\text{randn}(t)\times 10^{(-\text{SNR}/20)}] \quad j=1,2,\cdots,5N \quad (21)$$

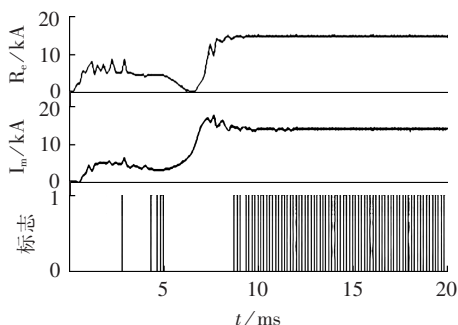


图 8 定点仿真中 RLSCA 的基波实部、虚部和判断标志  
Fig.8 Real and imaginary parts of fundamental wave calculated by RLSCA and judgment sign in fixed-point simulation

测试方法不变,改变算法敏感参数即系统电压基波初相和 SNR,对全电流信号进行系统仿真得表 5。其中,由图 7 可知,相位为  $-30^\circ$  时短路识别耗时

表 5 不同 SNR 和相位下的短路电流识别耗时  
Tab.5 Identification time of short circuit current under different SNRs and phases

| SNR/dB | 相位/(°) | 处理耗时/ms |       |      |
|--------|--------|---------|-------|------|
|        |        | 短路识别    | RLSCA | 合计   |
| 30     | -30    | 5.3     | 13.1  | 18.4 |
|        | 30     | 1.7     | 13.1  | 14.8 |
|        | 90     | 1.3     | 13.3  | 14.4 |
| 40     | -30    | 5.3     | 11.2  | 16.5 |
|        | 30     | 1.7     | 11.6  | 13.3 |
|        | 90     | 1.3     | 11.7  | 13.0 |
| 50     | -30    | 5.3     | 10.0  | 15.3 |
|        | 30     | 1.7     | 9.8   | 11.5 |
|        | 90     | 1.3     | 9.2   | 10.5 |

最长,相位为 90° 时短路识别耗时最短,另外取 30° 作为中间值;SNR 的取值与表 2 同。

针对表 5,结合表 2 和图 7 分析如下:相同相位不同 SNR 的条件下,短路识别耗时相同,结果与图 7 一致,这是因为短路识别误差不可累积;相同 SNR 不同相位的条件下,RLSCA 耗时的误差不超过 5 个采样间隔,且结果与表 2 一致,误差较小证明 RLSCA 不易受相位影响,误差存在是因为此处只计算 1 次而 RLSCA 易受噪音影响,结果一致则证明计算正确;短路处理总耗时由短路识别耗时和 RLSCA 耗时相加而得,在不同 SNR 不同相位条件下可得图 9。

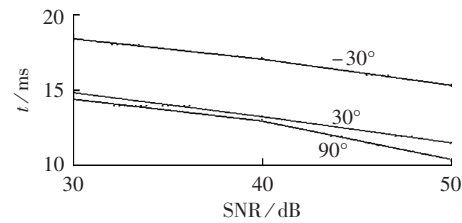


图 9 不同 SNR 和相位下的短路电流识别总耗时  
Fig.9 Total identification time of short circuit current under different SNRs and phases

由图 9 可知,相同 SNR 时相位越接近 90°(即  $\alpha-\varphi$  越接近 0°)短路处理总耗时越短,相同相位时 SNR 越大短路处理总耗时越短;在 SNR 为 30 dB、相位为 30° 时耗时最长为 18.4 ms,在 SNR 为 50 dB 和相位为 90° 时耗时最短为 10.5 ms。结合式(2)知,系统仿真的结果处在系统尚能接受的程度。

5 结论

智能操作控制器需要在继电保护装置的分析时间内,利用自身的算法快速获取当前断路器状态参数及线路参数。本文推导得到了开断正常电流的改进快速傅里叶变换算法,开断故障电流的 RLSCA,从而为智能操作的实现提供了算法支持;在双 CPU 硬件架构上,基于系统仿真模型产生的信号,对改进快速傅里叶变换、RLSCA 以及短路电流的软件识别算

法分别进行定点仿真,仿真结果验证了断路器的智能操作算法在软件和硬件上的快速性、准确性与有效性。

参考文献:

[1] 肖雁鸿,毛筱,周靖林,等. 电力系统谐波测量方法综述[J]. 电网技术,2002,26(6):61-64.  
XIAO Yanhong,MAO Xiao,ZHOU Jinglin,et al. A survey on measuring method for harmonics in power system[J]. Power System Technology,2002,26(6):61-64.

[2] 李永丽,贺家李,陈超英. 一种在线计算衰减直流分量的继电保护快速算法[J]. 电工技术学报,1997,12(3):63-64.  
LI Yongli,HE Jiali,CHEN Chaoying. An on-line fast algorithm of protective relays to calculate the decaying DC component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1997,12(3):63-64.

[3] 潘文,钱俞寿,周鄂. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(Ⅱ) 双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报,1994,9(2):53-56.  
PAN Wen,QIAN Yushou,ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(Ⅱ) dual interpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1994,9(2):53-56.

[4] 潘立冬,王飞. 一种减小频谱泄漏的采样频率自适应算法仿真研究[J]. 华北电力大学学报,2005,32(6):5-8.  
PAN Lidong,WANG Fei. Simulation of software sampling frequency adaptive algorithm for reducing spectrum leakage [J]. Journal of North China Electric Power University,2005,32(6):5-8.

[5] 黄景光,董兰兰,吕艳萍. 基于 Matlab 的计算机距离保护微分方程算法仿真与研究[J]. 继电器,2006,34(5):13-16.  
HUANG Jingguang,DONG Lanlan,LÜ Yanping. Simulating and studying differential equation algorithms of the digital computer distance relaying protection based on Matlab[J]. Relay,2006,34(5):13-16.

[6] 刘幼林,姬劳. 基于 DSP+CPLD 的断路器智能控制单元设计[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):69-72.  
LIU Youlin,JI Lao. Design of intelligent controller of breakers based on DSP+CPLD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(11):69-72.

[7] 李娟,焦邵华. 基于 DSP 的高压断路器状态在线监测装置[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):44-47.  
LI Juan,JIAO Shaohua. Online monitoring device for high voltage circuit breaker based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(8):44-47.

[8] 柳懿,王向军,稽斗. 基于双 DSP 的断路器机械特性检测装置[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):112-116.  
LIU Yi,WANG Xiangjun,JI Dou. Circuit breaker mechanical characteristic tester based on dual-DSP[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):112-116.

[9] 胡晓光,孙来军. SF<sub>6</sub> 断路器在线绝缘监测方法研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):1-3.  
HU Xiaoguang,SUN Laijun. Research on insulation monitoring of SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(4):1-3.

[10] 马志瀛,陈晓宁,徐黎明,等. 超高压 SF<sub>6</sub> 断路器智能操作[J].

- 中国电机工程学报,1999,19(7):11-13,71.
- MA Zhiying, CHEN Xiaoning, XU Liming, et al. The intelligent operation of EHV SF<sub>6</sub> circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 11-13, 71.
- [11] 孙弋, 马志瀛, 金立军. 应用电磁开关阀实现断路器智能操作分闸速度调节[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 17-20.
- SUN Yi, MA Zhiying, JIN Lijun. Adjustment to opening velocity of intelligent operation of circuit breaker by electromagnetic on-off valves[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 17-20.
- [12] IFEACHOR E C, JERVIS B W. Digital signal processing[M]. 2nd Ed. New York, USA: Pearson Education Limited, 2002: 77-78.
- [13] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S, HAMID N S. Signals and systems[M]. 2nd Ed. Beijing, China: Pub House of Electronics Industry, 2002: 161-168.
- [14] 陈德树, 张哲, 尹项根. 微机继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 88-99.
- [15] 郑清水, 马志瀛. 短路电流实时计算的递推最小二乘校正算法[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 241-244.
- ZHENG Qingshui, MA Zhiying. Recursive least square correction algorithm for short-circuit current real-time calculation[J].

High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 241-244.

- [16] 陈慈萱, 马志瀛. 高压电器[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 9-13.

#### 作者简介:

刘俊(1982-), 男, 湖北襄阳人, 讲师, 博士, 主要从事电力系统运行分析和控制、可再生能源并网、HVDC 和 FACTS 技术、谐波分析、电力系统自动化等方面的研究工作(E-mail: jliu1912@gmail.com);

段超(1989-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行分析与控制、FACTS 协调控制、大系统理论等方面的研究工作;

方万良(1958-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统运行分析与控制、FACTS、HVDC、人工智能在电力系统的应用、分布式发电、智能电网等方面的研究工作;

马志瀛(1937-), 男, 浙江德清人, 教授, 博士研究生导师, 从事电器智能化、电弧理论、高低压开关电器、熔断器等方面的研究工作。

## Fixed-point simulation of intelligent operation algorithms on DSP for intelligent operation of breaker

LIU Jun, DUAN Chao, FANG Wanliang, MA Zhiying

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The requirements of intelligent breaker operation for signal processing are briefly introduced and the strong real-time conditions required by the intelligent breaker operation are given. IFFT(Improved Fast Fourier Transform) is applied in the algorithm simulation of rated current to reduce the calculation load. RLSCA(Recursive Least Square Corrective Algorithm) is applied to simulate the short circuit current, which enables the iteration method to be implemented on DSP with shortened sampling data window and meets the requirements of system for real time performance. A model is built with Simulink to simulate the process from normal working state to short circuit state and the total current signals are generated for two states respectively. Based on MATLAB, the short circuit current identification algorithm is simulated and, combined with IFFT and RLSCA, the total current signals are then simulated. Simulative results show that, the proposed algorithm meets the requirements of intelligent breaker operation for strong real-time performance.

**Key words:** electric circuit breakers; intelligent operation; Fourier transform; recursive least square correction; DSP; computer simulation