

线路单相接地故障熄弧时刻捕捉算法*

李娜¹, 江亚群¹, 黄纯¹, 高云鹏¹, 江辉²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 深圳大学光电工程学院 深圳 518060)

摘要:针对带并联电抗器的电力线路瞬时性单相接地故障,为确保自适应重合闸成功并最大限度缩短非全相运行时间,提出了一种基于单频信号全相位快速傅里叶变换(apFFT)相位谱平坦特性的熄弧时刻捕捉算法。对故障相端电压信号进行全相位FFT计算,分析二次电弧熄弧前后故障相端电压信号的全相位FFT频谱特征,在二次电弧熄弧前,由于过渡电阻的高度非线性,故障相端电压中有剧烈变化的高频信号,其全相位FFT相位谱不具平坦性;二次电弧熄灭后,过渡电阻消失进入恢复电压阶段,高频信号平稳变化,其全相位FFT相位谱较平坦。通过分析高次谐波相位谱平坦特性的变化,可准确捕捉二次电弧熄弧时刻。ATP-EMTP仿真结果表明,该方法计算简单,受故障位置、过渡电阻、功角等因素影响小。实际故障录波数据的分析结果验证了所提方法的有效性。

关键词:输电线路;自适应重合闸;全相位快速傅里叶变换;高频暂态分量;熄弧时间

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Approach to detect arc extinction time of single-phase transient fault in transmission lines

Li Na¹, Jiang Yaqun¹, Huang Chun¹, Gao Yunpeng¹, Jiang Hui²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In order to improve the success rate of adaptive reclosure and minimize the incomplete phase operative time, a method based on flatness characteristics of all-phase FFT (apFFT) spectrum is presented to detect the arc extinction time for transient single-phase earth faults in transmission lines with shunt reactors. The apFFT spectrum of the terminal voltage of faulty phase is analyzed. It is found that, before the secondary arc extinguishes, the apFFT phase spectrum is not smooth, because of outstanding variation of high-frequency components caused by the highly non-linear transition resistances. After the secondary arc extinguishes, the apFFT phase spectrum is flat, because the transition resistance disappears and high-frequency signals change smoothly. Utilizing the difference of the flatness characteristic in high-order harmonic apFFT phase spectrum before and after the secondary arc extinguishes, a reliable method is proposed to identify the arc extinction time accurately and effectively. Simulations using ATP-EMTP verify the correctness and effectiveness of the proposed method. The proposed method is almost insusceptible to fault location, transition resistance and power angle. The validity of the method is verified by the analysis of the actual wave data.

Keywords: transmission; line; adaptive reclosure; all-phase fast Fourier transformation (apFFT); high frequency transient component; arc extinction time

1 引言

超高压电力输电线路起着输送电能、联络系统的重

要作用。由于电力线路多架设在户外,易受周围环境的影响,故障率较高。电力系统运行经验表明,输电线路故障80%~90%是单相瞬时性接地故障。单相自动重合闸在瞬时性故障电弧熄灭后自动恢复供电,能有效提高

电力系统运行的可靠性和稳定性,因此被广泛地应用于超高压输电线路。但现有自动重合闸技术是在断路器跳开后达到预先设定的重合闸时间后重合,具有一定盲目性,一旦重合于永久性故障或者瞬时性故障未熄弧阶段,重合失败,系统将再一次受到短路电流的冲击,对系统和电力设备造成更严重的破坏。针对这一问题,研究学者提出了自适应单相重合闸技术。

近年来,国内外对自适应重合闸技术开展了深入研究,取得了较大突破。目前自适应重合闸的研究集中在两个方面:1)识别故障性质;2)捕捉二次电弧熄弧时刻^[1]。针对不带并联电抗器的输电线路,文献[2]利用熄弧后恢复电压出现直流偏移现象判断二次电弧熄弧时刻,但推导未涉及过渡电阻的影响;文献[3]提出了一种基于电压补偿原理的故障性质识别判据;文献[4]利用故障相电压与两健全相电压之和的计算值沿线变化规律的相似程度来判断故障性质,但算法受到负荷电流的影响,运行方式的变化会影响算法的准确性。在超、特高压线路中大多会装设并联电抗器限制潜供电流,针对于带并联电抗器的输电线路,故障识别方法主要有基于恢复电压拍频特性的方法^[5-7]、模量参数识别法^[8]、利用流过并联电抗器故障相电流与中性点电抗电流幅值比的判别法^[9]等。瞬时性故障时故障点存在非线性电弧,故障相端电压中出现高频暂态分量,文献[10]据此提出了基于小波包系数近似熵的衰减系数累加和的故障性质识别方法,分析结果依赖于小波基的选择,小波基不同分析结果也不尽相同;基于二次电弧特性的研究,文献[11]利用电弧非线性特征识别故障类型并确认二次电弧熄弧时刻,文献[12]根据熄弧后故障点电压谐波含量急剧减少的原理捕捉二次电弧熄弧时刻,但在过渡电阻较大的永久性故障下,容易出现误判。

本文利用 ATP-EMTP 仿真软件建立带并联电抗器的输电线路故障电弧模型,详细分析了二次电弧阶段和恢复电压拍频阶段故障相端电压信号的频谱分布特征,对不同故障阶段进行全相位快速傅里叶变换(all-phase fast Fourier transformation, apFFT)频谱分析^[13-15],利用 apFFT 特有的“相位不变特性”构造二次电弧熄弧时刻捕捉判据,仿真分析及故障录波数据分析结果均验证了该方法的可行性和有效性,并研制了基于该原理的自适应重合闸装置。

2 apFFT 谱分析原理

快速傅里叶变换(FFT)是目前应用最广泛的频谱分析方法,在 FFT 基础上,文献[16]提出了 apFFT 谱分析方法。

apFFT 谱分析思想是先对输入数据进行全相位预处理,然后再进行 FFT 谱分析。该过程利用线性时移不变

性系统的叠加原理,首先考虑包含中心样点 $x(0)$ 的所有长度为 N 分段情况,将中心样点 $x(0)$ 前后长度为 $(2N-1)$ 的输入量进行数据加权,再将这 N 个延时单元的数据重叠叠加,形成长度为 N 的输出量 $y(n)$,最后对 $y(n)$ 做 N 点 FFT 得到 apFFT 谱分析结果,其实现流程如图 1 所示。

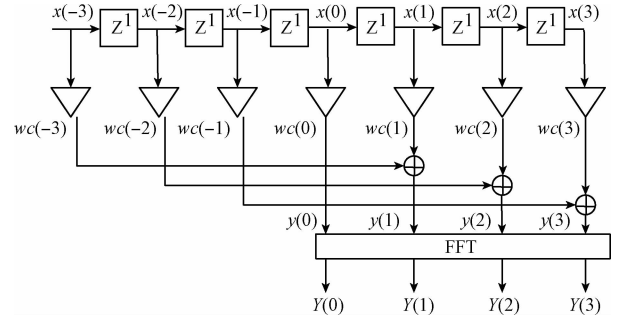


图1 全相位 FFT 频谱分析流程($N=4$)

Fig. 1 Data flow of apFFT spectral analysis ($N=4$)

2.1 apFFT 谱分析和传统 FFT 谱分析的关系

假设单频复指数信号:

$$x(n) = Ae^{j(\omega n + \theta)} = Ae^{j(\omega \beta 2\pi/N + \theta)} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

式中: A 为幅值, ω 为角频率, θ 为初始相位, N 为采样点数, ω 表示为 β 倍频率间隔 $2\pi/N$ 的形式。

则 $x(n)$ 的传统 FFT 谱为:

$$X(k) = \frac{A \sin\left[\frac{\pi(\beta - k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi(\beta - k)}{N}\right]} e^{j\left[\theta + \frac{\pi}{N}(\beta - k)\right]} \quad (2)$$

对 $2N-1$ 个输入数据 $\{x(-N+1), \dots, x(0), \dots, x(N-1)\}$ 进行加窗预处理可得到 N 个输出数据,再对其进行 FFT 得到 apFFT 谱分析结果:

$$X'(k) = \frac{A^2 \sin^2\left[\frac{\pi(\beta - k)}{N}\right]}{N^2 \sin^2\left[\frac{\pi(\beta - k)}{N}\right]} \cdot e^{j\theta} \quad (3)$$

对比式(2)和(3)可知,apFFT 幅值谱为传统 FFT 幅值谱的平方,这意味着主谱线幅值和旁谱线幅值的比值按照平方关系衰减,使得主谱线显得更为突出,因此 apFFT 谱分析能有效的抑制谱泄露性能。

另外,传统 FFT 各条谱线的相位值与其对应的频率偏离值 $(\beta - \theta)$ 密切相关,而 apFFT 谱的相位值为 θ ,即中心样点 $x(0)$ 的初始相位值,且不受频率频偏值 $(\beta - \theta)$ 的影响,无需进行相位校正,直接取主谱线的相位值便可以精确取得信号的初始相位,apFFT 其相位谱呈现平坦特性。

单频复指数信号 $x(t) = e^{j(2\pi f t + \theta)}$,信号频率 $f = 50$ Hz,初始相角 $\theta = 150^\circ$,采样频率为 $f_s = 2000$ Hz,采样点数 $N = 800$ 。对采样序列分别进行 N 点加窗 apFFT 和 FFT 计算,可得 apFFT 和 FFT 幅值谱和相位谱如图 2 所示。

比较图 2 幅值谱中主谱线和旁瓣谱线的高度,apFFT

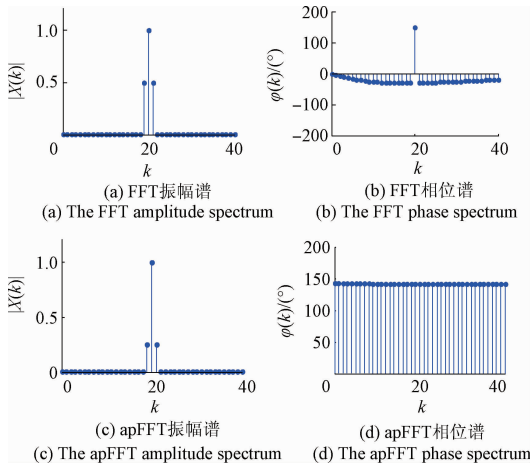


图2 传统FFT谱与apFFT谱对照

Fig. 2 FFT spectrums compared with apFFT spectrums

幅值谱较之传统的FFT具有良好的抑制旁谱泄露的性能,另外,从相位谱可知,apFFT所有的相位值都等于初始相角 150° ,其相位谱具有相位不变性。FFT相位谱仅有主谱线的相位值等于初始相角 150° ,其余谱线相位值都不等于初始相角,并且各谱线的相位值也存在差异,因此FFT相位谱分布不具平坦特性。

2.2 含密集谱的多频信号apFFT分析

实际中,信号往往含有多种频率成分,若信号中两个频率成分频率间隔较小,无论是传统FFT还是apFFT谱,其幅值谱都会出现谱重叠现象,特别是当频率间隔小于频率分辨率时,振幅谱仅出现一个谱峰。对含密集谱的多频信号进行apFFT谱分析,依据主要apFFT相位谱线是否具有平坦特性可分辨是单频谱还是多频密集谱,以及密集谱的频率范围。

$x(n) = 2\cos(90\pi t + 30^\circ) + 2\cos(100\pi t + 90^\circ) + 2\cos(200\pi t + 100^\circ)$, $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 45$ Hz, $f_3 = 100$ Hz, $f_s = 2000$ Hz, $N = 200$,其apFFT振幅谱和相位谱如图3所示。由于 f_1 与 f_2 的频率差小于频率分辨率,幅值谱重叠,只出现一个谱峰,且以峰值谱线($k = 5$)为中心的3根相位谱线高度不相等。 f_2 与 f_3 的频率差大于分辨率,幅值谱未重叠,以峰值谱线($k = 10$)为中心的相位谱线高度近似相等,相位谱呈“局部平坦特性”。

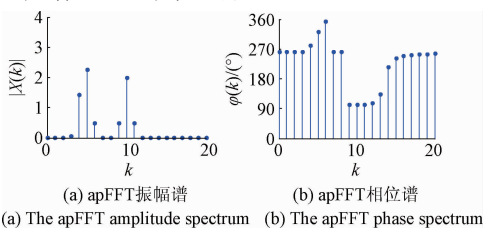


图3 多频信号的全相位幅值谱和相位谱

Fig. 3 The apFFT amplitude and phase spectrums of a multifrequency signal

通过上述分析可知,apFFT相位谱能够反映信号频率的复杂程度^[17],本文尝试利用apFFT相位谱的平坦特性用于电力故障信号的分析。

3 瞬时性故障相端电压分析

3.1 瞬时性故障电弧电压

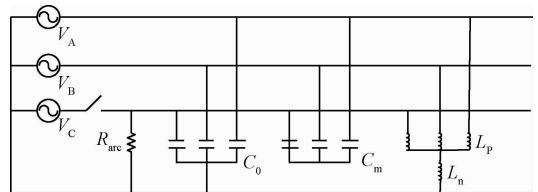
带有并联电抗器的超高压输电线路发生单相瞬时性接地故障时,电弧熄灭前先后经历一次电弧和二次电弧阶段。一次电弧电流持续时间和断路器保护动作时间有关,此阶段电弧电压主要集中在弧柱上,电弧长度基本稳定且弧柱横截面积较大。故障相断路器跳闸后进入二次电弧阶段,二次电弧物理过程更为复杂,电弧经过不断反复的熄灭重燃过程,直到注入电弧能量无法支撑电弧燃烧最终在电流过零点时电弧熄灭。线路电压等级越高,二次电弧越不易熄灭,持续时间也 longer。

本文采用时变电阻模拟二次电弧过程^[18-19]。忽略线路阻抗,图4(a)所示为线路模型求解电弧阶段故障相端电压。

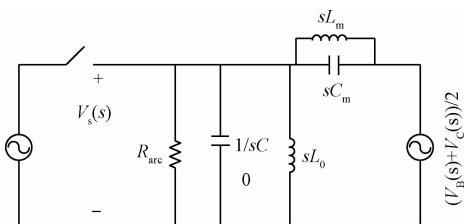
由此模型得图4(b)所示运算电路,可求得A相发生单相接地故障时,二次电弧阶段故障相端电为:

$$V_s(s) = \frac{R_{arc} // \left(\frac{1}{sC_0}\right) // (sL_0)}{R_{arc} // \left(\frac{1}{sC_0}\right) // (sL_0) + \left(\frac{1}{sC_0}\right) // sL_m} \cdot \frac{V_B(s) + V_C(s)}{2} \quad (4)$$

式中:“//”表示并联运算, C_0 、 L_0 为输电线路对地耦合电容和对地耦合电感, C_m 、 L_m 为相间耦合电容和相间耦合电感, R_{arc} 为等效电弧电阻, V_B 、 V_C 为健全相B、C相电压。



(a) 单相接地故障等效电路
(a) Equivalent circuit of single-phase grounding fault



(b) 二次电弧熄弧前运算电路
(b) Arithmetic circuit before secondary arc extinction

图4 输电线路等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of transmission line

图 5(a) 所示为二次电弧阶段故障相电压,图 5(b) 所示为其全相位幅值谱。由于二次电弧阶段电弧电阻 R_{arc} 具有高度非线性,造成电压波形畸变,故障相端电压中含有丰富的高频分量,能量主要集中在 5 次以内的谐波和间谐波。

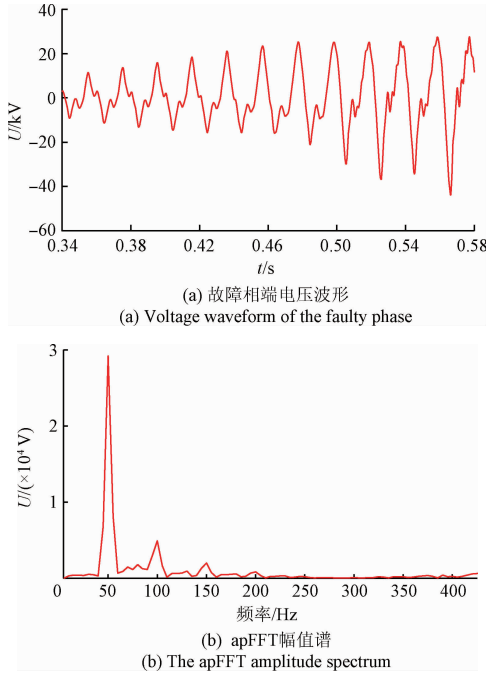


图 5 二次电弧阶段故障相端电压分析
Fig.5 Analysis of fault voltage in secondary arc stage

3.2 瞬时性故障恢复电压

带并联电抗器的超高压线路瞬时性故障二次电弧熄灭后,由于并联电抗器的作用,系统由相间储能元件构成一个振荡回路,产生自由振荡分量,由式(5)可求得自由振荡频率:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_m + 2L_0}{L_m L_0 (2C_m + C_0)}} \quad (5)$$

对于不同等级的输电线路,自由振荡频率一般为 38 ~ 42 Hz,自由分量的幅值小于或接近工频分量幅值如图 6 所示,与工频分量叠加构成恢复电压的拍频特性。

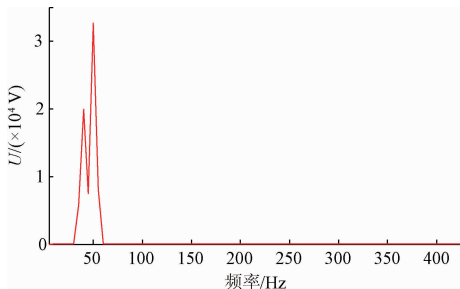


图 6 恢复电压 apFFT 幅值谱
Fig.6 The amplitude spectrum of recovery voltage

4 故障熄弧时刻捕捉

4.1 瞬时性故障熄弧时刻捕捉判据

由前面分析可知,瞬时性故障二次电弧阶段,故障相端电压暂态信号频率复杂,含有大量高频分量,其中既含有整次谐波,也含有间谐波,能量主要集中在 5 次以内。二次电弧熄灭后,系统进入恢复电压阶段,故障相端电压呈拍频特性,高频分量迅速减小。根据二次电弧熄灭前后信号高频分量的变化,利用 apFFT“相位谱平坦特性”在熄弧前后的改变,捕捉二次电弧熄弧时刻。

选取数据窗为 80 ms,频谱分辨率为 12.5 Hz;每次滑动 1/4 工频周波 5 ms。

对故障相端电压进行 apFFT 分析,获得其幅值谱和相位谱,利用整数次谐波幅值谱峰为中心的 3 根相位谱线 k_1, k_2, k_3 的波动程度,定义第 i 次(i 为整数)谐波附近 3 根相位谱线的平坦度 $S(i)$ 为:

$$S(i) = \sqrt{\Delta \varphi_1^2 + \Delta \varphi_2^2 + \Delta \varphi_3^2} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} \Delta \varphi_1 = (\varphi(k_1) - \bar{\varphi}(i))^2 \\ \Delta \varphi_2 = (\varphi(k_2) - \bar{\varphi}(i))^2 \\ \Delta \varphi_3 = (\varphi(k_3) - \bar{\varphi}(i))^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\bar{\varphi}(i) = \frac{\varphi(k_1) + \varphi(k_2) + \varphi(k_3)}{3} \quad (8)$$

考虑到二次电弧阶段高频分量主要集中在五次以内的谐波中,计算 3 次、4 次、5 次谐波对应的平坦度 $S(3)$ 、 $S(4)$ 、 $S(5)$,取三者之间最小值作为识别熄弧的判据。当检测到在半个周期内三者满足式(9)时,判定电弧熄灭,从而确定熄弧时间。 S_{set} 为所设阈值。

$$S = \min \{ S(3), S(4), S(5) \} < S_{set} \quad (9)$$

4.2 实现步骤

基于以上判据的捕捉故障熄弧时刻的处理流程如下:

- 1) 以 2 000 Hz 的采样频率对故障线路端电压进行采样,取跳闸后 3 个周波开始的电压信号进行 apFFT 分析;
- 2) 根据式(6) ~ (8) 分别求得 3 次、4 次、5 次谐波对应的 $S(3)$ 、 $S(4)$ 、 $S(5)$;
- 3) 若在连续半个周波内式(9)成立,则判断为熄弧,并输出熄弧时间。

5 仿真分析

利用 ATP-EMTP 仿真软件对如图 7 所示的长度为

320 km 的双端带并联电抗器的 500 kV 的输电线路进行输电线路单相瞬时性接地故障仿真。

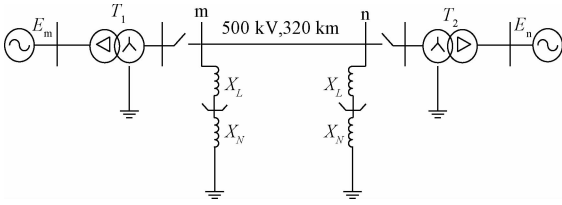


图7 系统仿真模型

Fig. 7 System simulation model

一次电弧参数为 $l=350\text{ cm}$, $\tau=1.3\text{ ms}$, $u_0=12\text{ V/cm}$, $r=1.3\text{ m}\Omega/\text{cm}$; 二次电弧参数为 $\alpha=-0.5$ 。

线路参数: 正序电阻 $R_1=0.0195\ \Omega/\text{km}$, 零序电阻 $R_0=0.1556\ \Omega/\text{km}$; 正序电感 $L_1=0.9116\text{ mH}/\text{km}$, 零序电感 $L_0=1.9560\text{ mH}/\text{km}$; 正序电容 $C_1=0.0132\ \mu\text{F}/\text{km}$, 零序电容 $C_0=0.0102\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。系统电源参数为 m 侧电源 $E_m=500\sqrt{2}/3\ \angle 20^\circ$, 系统阻抗 $Z_{m1}=2.3+j38.57\ \Omega$, 零序阻抗 $Z_{m0}=1.3+j28.2\ \Omega$; n 侧电源 $E_n=500\sqrt{2}/3\ \angle 0^\circ$, 系统阻抗 $Z_{n1}=3.1+j20.3\ \Omega$, $Z_{n0}=2.1+j18.54\ \Omega$ 。

仿真设置参数: ATP-EMTP 采样频率为 2 kHz, E_m 、 E_n 相角差为 20° 。以 A 相为例, 线路在 0.1 s 发生接地故障, 0.2 s 线路两端断路器动作跳闸, 0.4 s 电弧熄灭。图 8 所示为线路中点发生瞬时性接地故障 m 端故障相电压。

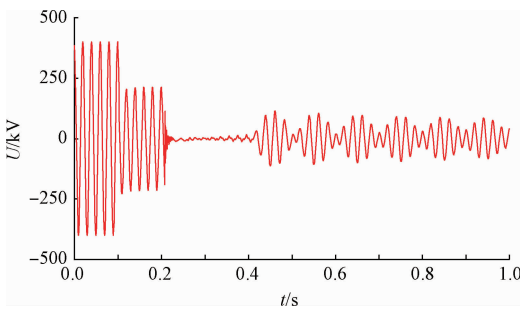


图8 瞬时性故障电压波形

Fig. 8 Voltage waveform of the faulty phase

按照本文提出的判据, 对故障相电压信号进行 apFFT 分析得到对应的幅值谱和相位谱, 按照上述数据处理流程对数据进行处理, 以 0.4 s 熄弧的仿真模型为例, 得到的数据利用 MATLAB 按照流程图编程得到判据 S 的变化曲线如图 9 所示。

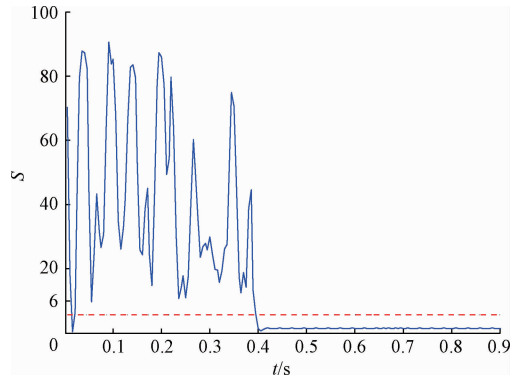


图9 故障相端电压信号的 apFFT 相位谱平坦度 S

Fig. 9 The apFFT phase spectrum flatness S of the fault phase terminal voltage signal

图 9 中虚线为本文设置的阈值, 对不同电压等级、不同长度的输电线路进行了大量仿真, 结果表明 S_{set} 大小取 5~7 时可有效捕捉熄弧时刻。从图 9 中可以明显地看出在二次电弧前 S 的值大于阈值, 在二次电弧阶段 S 有间歇性的比较大的脉冲输出, 这一现象验证了在二次电弧阶段, 由于电弧电阻高度非线性使得故障相端电压中含有剧烈变化的高次谐波和间谐波, 因此故障相端电压的 apFFT 相位谱不具平坦性。在二次电弧熄灭后, S 值持续小于阈值, 正是因为电弧熄灭, 高频信号减小直至消失, 所以高次谐波对应的相位谱是相对平坦的。因此可以根据 S 值的变化情况识别二次电弧熄弧时刻。

本文针对瞬时性故障在不同电压电流相位差、不同过渡电阻、不同故障位置 and 不同并联电抗器补偿度等情况下进行了大量仿真, 其仿真结果如表 1~4 所示。表中, L 为故障点至线路首端长度占线路总长度的百分比, R 为电弧电阻, K 为并联电抗器补偿度, δ 为功角。

表1 不同功角下仿真结果 ($L=50\%$, $R=100\ \Omega$, $K=70\%$)

Table 1 Simulation results under different power angle ($L=50\%$, $R=100\ \Omega$, $K=70\%$)

功角 $\delta/(\circ)$	判断熄弧时间/s	实际熄弧时间/s
-90	0.419 1	0.4
-50	0.392 3	0.38
0	0.369 1	0.35
50	0.435 1	0.42
90	0.377 2	0.36

表2 不同接地电阻下仿真结果 ($L=50\%$, $K=70\%$, $\delta=20^\circ$)

Table 2 Simulation results under different faults resistance ($L=50\%$, $K=70\%$, $\delta=20^\circ$)

过渡电阻 R/Ω	判断熄弧时间/s	实际熄弧时间/s
50	0.394 2	0.38
100	0.411 3	0.4
300	0.426 1	0.41

表3 不同故障位置下仿真结果 ($R=50\ \Omega$, $K=70\%$, $\delta=20^\circ$)

Table 3 Simulation results under different faults position ($R=50\ \Omega$, $K=70\%$, $\delta=20^\circ$)

故障位置 $L/\%$	判断熄弧时间/s	实际熄弧时间/s
0	0.387 2	0.37
25	0.435 1	0.41
50	0.401 8	0.39
75	0.394 5	0.38
100	0.421 1	0.4

表4 不同补偿度下的仿真结果 ($R=50\ \Omega$, $L=50\%$, $\delta=20^\circ$)

Table 4 Simulation results under different compensation levels ($R=50\ \Omega$, $L=50\%$, $\delta=20^\circ$)

补偿度 $K/\%$	判断熄弧时间/s	实际熄弧时间/s
60	0.418 3	0.4
70	0.423 1	0.41
80	0.382 5	0.37
90	0.362 5	0.35

由以上仿真结果可知,本文方法受故障位置、接地电阻等因素影响小,能快速准确捕捉二次电弧熄弧时刻。

6 工程应用

本方法已应用于自行研发的“输电线路最佳重合闸装置”如图10所示,用于捕捉输电线路瞬时性故障二次电弧熄弧时刻。

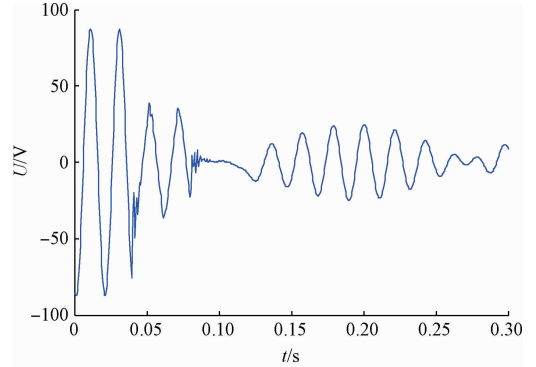


图10 输电线路最佳重合闸装置

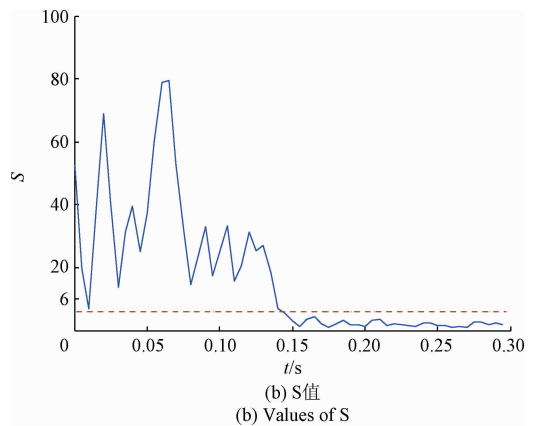
Fig. 10 Optimal reclosing device for transmission line

选取华中电网昆山-沙坪 500 kV 输电线路故障录波数据验证本文所提方法的有效性。图11(a)为带并联电抗器的500 kV线路发生单相瞬时性接地故障时故障相端电压(电压互感器二次侧)实际录波波形。故障发生后断路器约在0.04 s跳闸,约在0.12 s电弧熄弧,熄弧后恢复电压呈拍频特性。用本文所提方法捕捉二次电弧熄弧时刻如图11(b)所示,算法捕捉熄弧时刻为0.14 s,与实际熄弧时刻之间误差约为一个工频周期(0.02 s),满足重合闸对时间的要求。

利用上述故障录波数据对现有方法进行对比分析。文献[5-6]方法基于恢复电压拍频特性,需检测拍频电压幅值包络最大值 U_{max} 、最小值 U_{min} 。图11中拍频周期约为0.15 s,获得 U_{max} 、 U_{min} 给出熄弧判别结果至少需要0.15 s,实时性不够好。



(a) 故障相二次侧端电压的录波波形
(a) Actual voltage waveform of fault phase in secondary



(b) S值
(b) Values of S

图11 实际故障录波数据的分析结果
Fig. 11 Analysis of actual fault recorder data

文献[10]利用小波包近似熵识别故障性质,需要“分析开关动作跳闸后的8个工频周期特征频段的小波包系数”,计算量较大,且至少需要8个工频周期(即0.16 s)的检测时间。

文献[12]根据熄弧后故障相端电压谐波总畸变率(total harmonic distortion, THD)减少的原理捕捉熄弧时

刻,利用图 11 数据通过 FFT 算法可得到跳闸后 THD 变化情况,如图 12 所示。

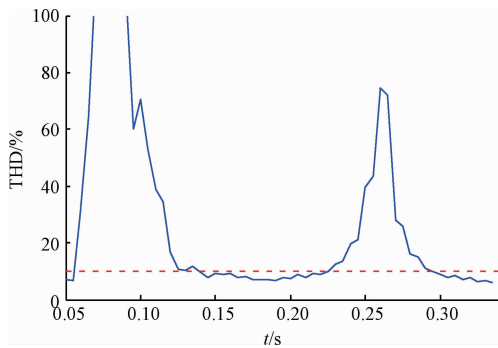


图 12 故障相端电压的谐波总畸变率 THD

Fig. 12 Total harmonic distortion (THD) of the fault phase terminal voltage signal

图 12 利用 THD 捕捉熄弧时刻为 0.146 s,但在 0.275 s 时 THD 急剧增加。这是由于电压呈拍频特性,包含两个频率接近的频率成分,FFT 算法的“频谱泄露”效应导致出现“伪谐波”,使得 THD“增大”,该方法出现误判。

文献[7-9,11]方法需额外测量并联电抗器电流及中性点小电抗器电流,在只测量线路故障相端电压的条件下无法实现。

7 结 论

对 apFFT“相位平坦特性”进行了分析,研究表明该特性能够很好地反映信号频率的复杂程度并能有效识别密集谱。

对输电线路单相瞬时性接地故障的故障相端电压信号的频域复杂性和 apFFT 相位谱的平坦特性进行了分析,提出了基于 apFFT“相位不变性”的自适应熄弧时刻捕捉判据。

本文方法受故障位置、过渡电阻、线路两侧电源功角、并联电抗器补偿度等因素的影响小,并具有较强的工程环境适应能力。

ATP-EMTP 仿真结果以及实际录波数据分析结果验证了所提方法的可行性和有效性。本文方法已应用于自行研发的“输电线路最佳重合闸装置”。

参考文献

[1] 索南加乐,梁振锋,宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 37-41.
SUONAN J L, LIANG ZH F, SONG G B. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc

extinction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 37-41.

- [2] 罗勋华,黄纯,戴永梁,等. 输电线路瞬时性故障的恢复电压直流偏移特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 107-111.
LUO X H, HUANG CH, DAI Y L, et al. DC offset characteristics of recovery voltage for transient transmission line fault [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 107-111.
- [3] 赵庆明,李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 50-54.
ZHAO Q M, LI B. A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 50-54.
- [4] 王增平,刘浩芳,徐岩,等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.
WANG Z P, LIU H F, XU Y, et al. A new criterion for single-phase adaptive automatic reclosure based on improved correlation algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 49-55.
- [5] 陆岩,郑玉平,沈军,等. 超高压有并联电抗器线路无故障重合闸研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 76-80.
LU Y, ZHENG Y P, SHEN J, et al. Research on adaptive reclosure of EHV transmission lines with shunt reactors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 76-80.
- [6] 李斌,李永丽,盛鹏,等. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 52-56.
LI B, LI Y L, SHENG K. The study on single-pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 52-56.
- [7] 邵文权,南树功,章霄微,等. 带并补电抗器超/特高压输电线路单相瞬时故障拍频特性研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 72-78.
SHAO W Q, NAN SH G, ZHANG X W, et al. Beat-frequency characteristics for single-phase transient fault of EHV/UHV transmission line with shunt reactor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 72-78.
- [8] 索南加乐,梁振锋,宋国兵. 采用模量参数识别的三相重合闸永久性故障判别原理[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 81-86.

- SUONAN J L, LIANG ZH F, SONG G B. Permanent faults identification based on mode component for three-phase autoreclosing on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 81-86.
- [9] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.
- SUONAN J L, SUN D D, FU W, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.
- [10] 黄娟, 黄纯, 江亚群. 基于小波包近似熵的线路故障性质辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2009-2015.
- HUANG J, HUANG CH, JIANG Y Q. Identification method of fault characteristics in transmission lines based on wavelet packet and approximate entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2009-2015.
- [11] 邵文权, 南树功, 张望妮, 等. 利用过渡电阻特征的超/高压输电线路电弧性故障及熄弧时刻识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1822-1827.
- SHAO W Q, NAN SH G, ZHANG W N, et al. Arcing fault detection and arc extinction time capture based on characteristics of transition resistances for EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1822-1827.
- [12] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New digital algorithm for adaptive reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 37-41.
- [13] 黄翔东, 王兆华. 基于全相位频谱分析的相位差频谱校正法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 293-297.
- HUANG X D, WANG ZH H. Phase difference correcting spectrum method based on all-phase spectrum analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 293-297.
- [14] 黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. 天津大学学报, 2008, 41(7): 815-820.
- HUANG X D, WANG ZH H. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 815-820.
- [15] 黄翔东, 王兆华, 罗蓬, 等. 全相位 FFT 密集谱识别与校正[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 172-177.
- HUANG X D, WANG ZH H, LUO P, et al. Discrimination and correction for dense all-phase FFT spectrums[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 172-177.
- [16] 王兆华, 侯正信, 苏飞. 全相位 FFT 频谱分析[J]. 通信学报, 2003, 24(11A): 16-19.
- WANG ZH H, HOU ZH X, SU F. All-phase FFT spectrum analysis [J]. Journal on Communications, 2003, 24(11A): 16-19.
- [17] 张鸿博, 蔡晓峰, 鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2835-2841.
- ZHANG H B, CAI X F, LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2835-2841.
- [18] 孙秋芹, 李庆民, 吕鑫昌, 等. 特高压输电线路潜供电弧的物理模拟与建模综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 7-12.
- SUN Q Q, LI Q M, LV X CH, et al. Survey on physical simulation and mathematical modelling for secondary arcs of UHV transmission lines [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 7-12.
- [19] ZADEH M R D, SANAYE-PASAND M, KADIVAR A. Investigation of neutral reactor performance in reducing secondary arc current [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2472-2479.

作者简介



李娜, 2015 年于河南理工大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。

E-mail: lina_1994@163.com

Li Na received her B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2015. Now she is a master student in Hunan University. Her main research interest is power system relay protection and control.



江亚群 (通讯作者), 分别在 1994 年、2000 年和 2009 年于湖南大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为湖南大学副教授, 主要研究方向为智能电网、信号处理。

E-mail: yaqunjiang@21cn.com

Jiang Yaqun (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc., Ph. D. degrees all from Hunan University in 1994, 2000 and 2009, respectively. Now she is an associate professor. Her main research interests are smart grids and signal processing.