

基于 Prony 算法的单相自适应重合闸故障识别方法^{*}谭王景¹ 王 倩² 李 笑³ 季三飞¹

(1.陕西工业职业技术学院 咸阳 712000; 2.西安理工大学 西安 710048; 3.国网渭南供电公司 渭南 714000)

摘 要: 基于电压互感器“带通”特性及实际系统工频分量的特点,提出了一种适用于带并联电抗器的特高压输电线路单相自适应重合闸故障识别方法。首先,利用 ATP-EMTP 电磁暂态软件建立电弧模型;其次,使用 Prony 算法求取工频衰减因子,并计算固定时间窗内的衰减因子比;最后通过比较瞬时性故障和永久性故障衰减因子比的差异提出故障识别判据。通过大量仿真及计算表明,无论故障点位置在哪,该方法均能够正确、有效识别瞬时性故障和永久性故障。

关键词: 电弧特性;ATP-EMTP;重合闸;Prony 算法;故障识别

中图分类号: TN702; TM762.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Method of fault identification for single-phase adaptive
reclosure based on Prony algorithmTan Wangjing¹ Wang Qian² Li Xiao³ Ji Sanfei¹(1. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. State Grid Weinan Power Supply Company, Weinan 714000, China)

Abstract: A fault nature identification method for single-phase adaptive reclosure on UHAVC transmission lines with shunt reactors is proposed by considering bandpass characteristics of the voltage transformer and power frequency component in the power system. By using the ATP-EMTP software the arc model is built. Then, the attenuation factor is extracted by Prony algorithm and the attenuation factor ratio in fixed time window is calculated with Prony algorithm. Finally, the identification strategy which can distinguish the permanent fault and intermittent fault is put forward by comparing the difference of attenuation ratio factor. A lot of calculation results and simulation results show that wherever the fault location is, the transient fault and permanent fault can be correctly and effectively identified.

Keywords: arc characteristics; ATP-EMTP; reclosure; Prony algorithm; fault identification

0 引 言

随着全球能源互联网概念的提出,特高压输电线路日益增加。在我国主网中,自动重合闸技术已得到普遍应用,其目的是为了瞬时性故障自动消除后线路能够重新运行。

而在我国超高压以上电网中,根据整定值配置的定时重合常常盲目重合于永久性故障,给电网带来二次冲击,使断路器工作条件变得更加严重。因此,在断路器断开后能够有效地识别故障性质,只在瞬时性故障时保护装置发送重合闸信号实现自适应显得尤为重要。

国内外专家学者对此进行了大量研究,并提出基于小波变换谱能量的故障识别方法^[1-2],但经小波变换所提取到用于故障识别的信号频率通常为几个赫兹,而目前电容式

电压互感器“带通”特性远远无法达到,因此实际现场无法应用;而利用自由分量幅值及电压信号振幅与阈值进行比较的方法来判定瞬时性故障与永久性故障^[3-4],利用电流信号的幅值进行故障性质识别^[5],这些方法目前都存在通过电压互感器(PT)、电流互感器(CT)后电压、电流有可能过小的情况,因此也无法正确判定故障性质。而对于利用智能算法,如模糊神经网络、人工神经网络等又由于时效性很难应用至现有保护装置中^[6-8]。

本文从工频分量的衰减因子切入,提出基于 Prony 算法的输电线路单相自适应重合闸故障识别方法。由于工频分量不存在 PT、CT 提取不到频率或精度不准的缺点,且断路器断开后瞬时性故障存在二次电弧,而永久性故障持续衰减,因此利用 Prony 算法计算出工频衰减因子后,通过

比较衰减程度的趋势提出故障识别判据。

1 故障电弧特性分析

瞬时性故障根据电弧产生时段可分为一次电弧和二次电弧。一次电弧由系统短路故障引起,时间为故障发生时至断路器动作跳开故障前,二次由线路间的电磁、静电耦合引起,时间为断路器动作后至电弧完全熄灭^[9]。因此,需对故障电弧特性进行分析以便建模仿真。

线路发生短路故障时,由于故障点与系统电源间依然存在着电气联系,一次电弧上会流过较大的短路电流,且电弧压降集中在弧柱上,弧长较稳定。一次电弧的动态特性可由式(1)~(3)表示^[10]。

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{T_p}(G_p - g_p) \quad (1)$$

$$T_p = \frac{a \times I_p}{L_p} \quad (2)$$

$$G_p = \frac{|i|}{V_p L_p} \quad (3)$$

式中: g_p 是一次动态电弧电导; G_p 是一次稳态电弧电导; T_p 是电弧时间常数; I_p 是电弧伏安特性曲线中的峰值电流; L_p 是电弧长度; $|i|$ 是一次电弧电流绝对值; V_p 是单位长度的静态电弧压降。

由于故障相与非故障相间的电磁耦合与静电耦合作用,当断路器跳开后,故障处的电弧仍会持续燃烧,但电流幅值较一次电弧小的多,同时受感应电压变换的影响,出现反复重燃熄灭的状态,只有当实际电压始终小于重燃电压后,二次电弧才完全熄灭。

$$\frac{dg_s}{dt} = \frac{1}{T_s}(G_s - g_s) \quad (4)$$

$$G_s = \frac{|i|}{V_s L_s(t_r)} \quad (5)$$

$$T_s = \frac{\beta I_s^{1.4}}{L_s(t_r)} \quad (6)$$

$$V_s = 75 I_s^{-0.4} \quad (7)$$

式中: g_s 是二次动态电弧电导; G_s 是二次稳态电弧电导; T_s 是二次电弧时间常数; $|i|$ 是二次电弧电流绝对值; V_s 是单位长度二次电弧压降; L_s 是电弧长度; t_r 是电弧持续时间; β 是比例常数; I_s 是二次电弧电流峰值^[11-12]。

二次电弧的重燃电压不仅与电弧电流有关,还是时间的函数。通过大量试验得出的经验公式为:

$$|v_r(t_r)| = [5 + 1620 T_e / (2.15 + I_s)](t_r - T_e)h(t_r - T_e) \quad (8)$$

$$h(t_r - T_e) = \begin{cases} 1, & t_r - T_e \geq 0 \\ 0, & t_r - T_e < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$V_r = |v_r(t_r)| L_s(t_r) \quad (10)$$

式中: $v_r(t_r)$ 是二次电弧重击穿的电位梯度; T_e 是电弧持续燃烧时间(包括临时熄灭和永久熄灭); V_r 是二次电弧重燃电压; $L_s(t_r)$ 是二次电弧的弧长。

不同于一次电弧,二次电弧的弧长是以时间为自变量的函数,通过高速摄影技术拟合出风速为 0~1 m/s 时二次电弧弧长的关系式^[13]:

$$L_s(t_r)/L_0 = \begin{cases} 1, & t_r \leq 0.1 \text{ s} \\ 10t_r, & t_r > 0.1 \text{ s} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_0 是二次电弧起始长度。

电弧电压小于电弧重燃电压时,电弧相当于熄灭状态,当电弧电压大于重燃电压时,电弧相当于重燃状态。当电弧电压不再大于重燃电压时,电弧才彻底熄灭。熄弧后,故障相恢复电压等于电感与电容耦合电压之和,其值将变大。

2 故障电弧仿真模型搭建

为构造精确的一、二次电弧模型,反应其特性对故障相电压的影响,本文利用 ATP-EMTP 仿真软件中的自定义编辑元件 MODELS 与 TACS 控制元件建立故障电弧模型^[14-17]。

仿真模型中,利用 TYPE91 型非线性电阻元件模拟动态变化的一、二次电弧等效电阻,并借助发送至 TYPE13 型受控开关的动作指令模拟二次电弧熄灭-重燃现象。

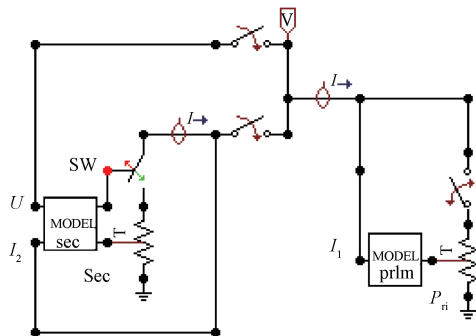


图 1 ATP-EMTP 电弧模型示意图

式(2)中的 T_p 可根据经验值计算,式(3)中的 L_p 、 V_p 为定值,如图 1 所示,从仿真模型中引入电流 I_1 即可计算 G_p ,由式(1)可计算出电弧电导 g_p ,由 MODEL prim 模块输出至 TYPE91 型非线性电阻模拟一次电弧 P_{ni} 。同理,二次电弧 MODEL sec 模块输入量为电弧电压 U 、电弧电流 I_2 ,输出量为 TYPE13 型受控开关 SW 和 TYPE91 型非线性电阻模拟的二次电弧 Sec。

本文采用 1 000 kV 特高压晋东南-南阳段线路系统,如图 2 所示。线路参数:全长 $L = 358$ km,正序电阻 $R_1 = 0.00758 \Omega/\text{km}$,零序电阻 $R_0 = 0.15421 \Omega/\text{km}$,正序电感 $L_1 = 0.2635 \text{ H}/\text{km}$,零序电感 $L_0 = 0.8306 \text{ H}/\text{km}$,正序电容 $C_1 = 0.013970 \mu\text{F}/\text{km}$,零序电容 $C_0 = 0.009296 \mu\text{F}/\text{km}$ 。送电端参数: $E_m = 1000\sqrt{2}/\sqrt{3} \angle 0^\circ \text{ kV}$; $X_{1m} = 0.86 + j52.74$; $X_{0m} = 0.8 + j10.89$;受电端参数: $E_m = 1000\sqrt{2}/\sqrt{3} \angle -25^\circ \text{ kV}$; $X_{1m} = 5.69 + j14.18$; $X_{0m} = 3.15 + j8.15$;线路两端均带有经小电抗的并联电抗器,电抗 $X_L = 1680 \Omega$,中性

点小电抗 $X_N = 442.41 \Omega$ 。

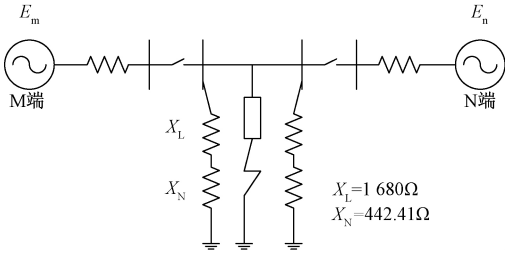


图 2 1000 kV 特高压输电线路系统

设线路中点发生 A 相接地故障,故障发生时刻为 0.05 s,在该时刻产生一次电弧,通过时控开关控制一次电弧模型投入,而二次电弧模型处于断开状态。系统运行至 0.1 s 时,线路两侧保护动作,故障相断路器跳开,一次电弧熄灭,二次电弧产生,通过时控开关控制断开一次电弧模型,接入二次电弧模型。仿真时间为 0.55 s。仿真波形如图 3~5 所示。

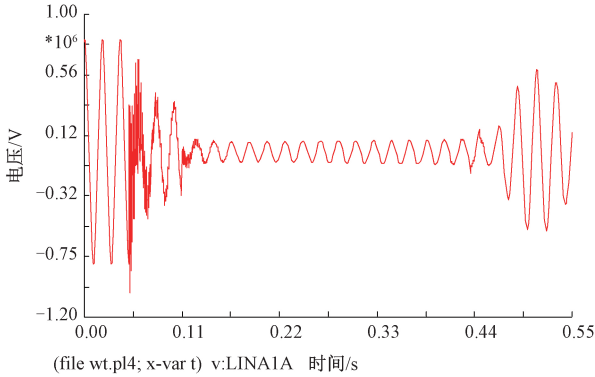


图 3 瞬时性故障时故障相端电压波形

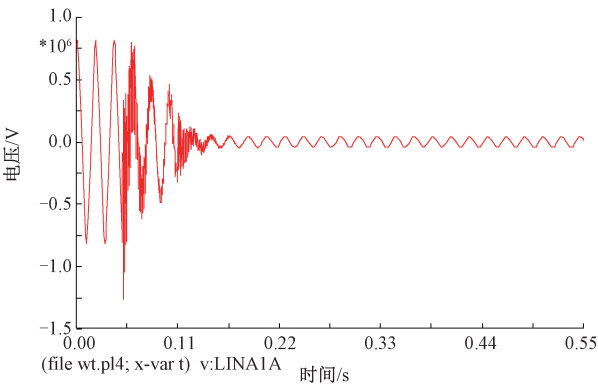


图 4 永久性故障时故障相端电压波形

断路器断开后,永久性故障的故障相电压持续衰减后趋于稳定,而瞬时性故障由于存在二次电弧,电弧要经历反复熄灭、重燃的动态过程,在电弧熄灭后,由于并联电抗器的存在故障相恢复电压呈现拍频特性。因此,两种故障的

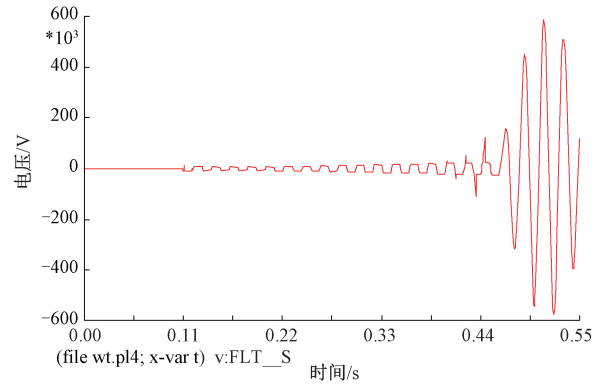


图 5 二次电弧电压波形

工频分量衰减因子呈现很大差异。

3 衰减因子计算的 Prony 算法^[18-21]

傅里叶变换认为信号由一系列不衰减的正弦分量组成,而 Prony 算法则假设信号由一组衰减的正弦分量组成,其一般表达式为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^q A_i e^{-\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (12)$$

式中: A_i 为振幅; θ_i 为相位; α_i 为衰减因子; f_i 为振荡频率。由式(12)可知,第 n 个采样点估计值可表示为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^q A_i e^{-\alpha_i n \Delta t} \cos(2\pi f_i n \Delta t + \theta_i) \quad (13)$$

式中: Δt 为采样时间间隔。

假设离散时间函数为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^q b_i z_i^n \quad (14)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, N-1$; $x(n)$ 为实际数据; $\hat{x}(n)$ 为估计数据,将 $\hat{x}(n)$ 作为 $x(n)$ 的近似。其中 b_i 、 z_i 均为复数,包含信号的频率、幅值、相位和衰减因子等相关信息,可表示为:

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (15)$$

$$z_i = \exp[(-\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (16)$$

为求解信号的幅值 A_i ,相位 θ_i ,衰减因子 α_i 和频率 f_i

相关信息,需求解 $\epsilon = \sum_{i=1}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2$,使其误差的平方和达到最小即可,求解过程则是对非线性方程组进行逐步迭代。

利用 Prony 算法对问题进行分析的关键是需将式(12)拟合为一个常系数线性差分方程,进而求其齐次解,通过观察测量数据进而求出差分方程的各个系数,最后根据这些系数求解多项式的根 z_i ($i = 0, 1, 2, \dots, p$)。求解各参数的步骤如下。

1)由采样数据构造线性差分方程,求解差分方程的系数。

$$\begin{bmatrix} x(p) \\ x(p+1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(p-1) & x(p-2) & \cdots & x(0) \\ x(p) & x(p-1) & \cdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-2) & x(N-3) & \cdots & x(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

2)求解差分方程特征多项式 $1 - a_1 z^{-1} - \cdots - a_p z^{-p} = 0$ 的根。

3)计算参数 \mathbf{b} 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $\hat{x}(0) = x(0); \hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i); n = 1, 2, \cdots, N-1$ 。

则:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{z}^H \mathbf{z})^{-1} \mathbf{z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (19)$$

4)计算幅值 A_i , 相位 θ_i , 衰减因子 α_i 和频率 $f_i (i = 1, 2, \cdots, p)$ 。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)] \\ \alpha_i = -\ln|z_i/\Delta t| \\ f_i = \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)]/(2\pi\Delta t) \end{cases} \quad (20)$$

由以上分析及计算过程可以看出,估计信号与实际信号越接近,误差也就越小。

4 基于 Prony 算法的故障识别

线路发生永久性接地故障时,故障初期绝缘被击穿,电磁暂态过程中除了工频分量还有大量的高频分量,绝缘被击穿后高频分量迅速衰减,当断路器断开后,故障线路与系统电源失去电气联系,工频分量、高频分量迅速衰减;而瞬时性接地故障在断路器断开后,由于故障相与非故障相间的耦合关系、电弧自身的非线性及恢复电压的影响,使得工频分量、高频分量衰减较慢。因此,不同故障波形信息的特性差异为故障识别提供了相当的可能性。

线路发生不同形式的故障时,工频分量的衰减性有很大区别,根据前述特征分析,利用 Prony 算法通过计算固定时间窗内的衰减因子,来表征信号衰减程度差异,并通过分析衰减因子变化的差异提出用以区分两种故障的判据。

为保证数据信号的容错性,选取时间窗为 40 ms,即断路器断开后每隔 40 ms 计算一次故障相端电压工频衰减因子,连续计算 6 个时间窗,表 1~3 分别为线路首端、中点、末端发生故障时两种故障的工频衰减因子。

如表 1~3 所示,结果显示瞬时性故障、永久性故障都存在衰减现象,对于永久性故障,其衰减因子在第 1 个时间窗的值较大,后 5 个时间窗衰减迅速,且衰减因子变化基本

表 1 线路首端故障工频衰减因子

采样时段	瞬时性故障	永久性故障
0.1~0.14	2.8	8.8×10^{-2}
0.14~0.18	7.1×10^{-2}	2.0×10^{-4}
0.18~0.22	1.2	1.3×10^{-5}
0.22~0.26	2.1	7.2×10^{-7}
0.26~0.30	1.9	5.2×10^{-7}
0.30~0.34	1.8	2.5×10^{-7}

表 2 线路中点故障工频衰减因子

采样时段	瞬时性故障	永久性故障
0.1~0.14	5.7	1.7
0.14~0.18	0.058	8.0×10^{-6}
0.18~0.22	0.064	-2.6×10^{-6}
0.22~0.26	1.1	-6.9×10^{-7}
0.26~0.30	1.1	-1.1×10^{-6}
0.30~0.34	1	1.3×10^{-6}

表 3 线路末端故障工频衰减因子

采样时段	瞬时性故障	永久性故障
0.1~0.14	1.3	0.18
0.14~0.18	0.072	5.0×10^{-5}
0.18~0.22	0.034	3.7×10^{-7}
0.22~0.26	0.78	2.3×10^{-6}
0.26~0.30	0.75	7.3×10^{-7}
0.30~0.34	0.73	3.1×10^{-7}

不大,同时数量级较小;对于瞬时性故障,第 1 个时间窗与后 5 个时间窗相比衰减因子变化不大,因此可利用不同故障时衰减因子变化的差异来进行故障识别。

计算第 1 个时间窗与之后几个时间窗内衰减因子的比值:

$$J_i = \frac{\alpha_1}{\alpha^i} (i = 2 \sim 6) \quad (21)$$

式中: i 为第 i 个时间窗。

表 4~6 所示为识别方法的仿真结果,由于永久性故障第 1 个时间窗和后 5 个时间窗相差较大,而瞬时性故障差别较小,因此设置一定阈值即可识别出故障类型。 $J_i > 200$ 五次判定为永久性故障,即需闭锁重合闸; $J_i < 200$ 五次判定为瞬时性故障,则系统按原整定时间投入重合闸。

如图 6 所示,当线路发生故障时,断路器动作跳开故障线路,线路侧电压互感器实时提取电压信息,通过 Prony 算法提取 40 ms 时间窗内的工频衰减因子,并计算衰减因子比,通过比较 J_i 与阈值 200 之间的关系判定故障类型,保护装置根据故障类型做出不同选择,从而有效提高系统安全稳定性。

表 4 线路首端故障工频衰减因子比

衰减因子比	瞬时性故障	永久性故障
E_1/E_2	39.44	440
E_1/E_3	2.33	6 769.23
E_1/E_4	1.33	122 222.22
E_1/E_5	1.47	169 230.77
E_1/E_6	1.56	352 000

表 5 线路中点故障工频衰减因子比

衰减因子比	瞬时性故障	永久性故障
E_1/E_2	98.28	212 500
E_1/E_3	89.06	653 846.15
E_1/E_4	5.18	2 463 768.12
E_1/E_5	5.18	1 545 454.55
E_1/E_6	5.7	1 307 692.31

表 6 线路末端故障工频衰减因子比

衰减因子比	瞬时性故障	永久性故障
E_1/E_2	18.06	3 600
E_1/E_3	38.24	486 486.49
E_1/E_4	1.67	78 260.87
E_1/E_5	1.73	246 575.34
E_1/E_6	1.78	580 645.16

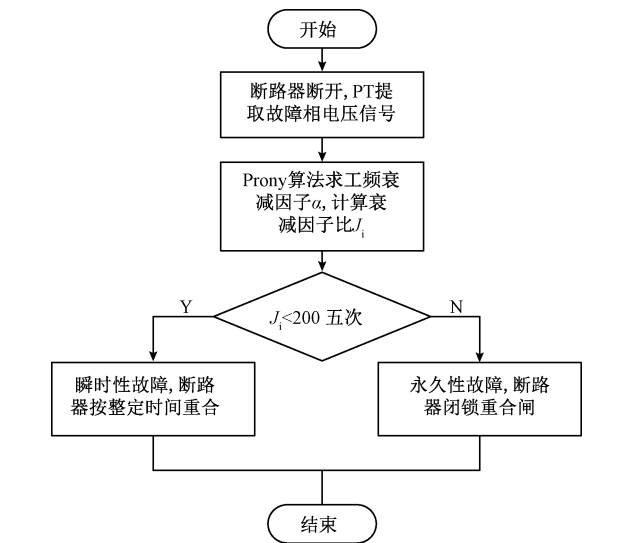


图 6 故障识别方法流程

5 结 论

本文提出了一种适用于带并联电抗器的特高压输电线路故障识别方法,通过分析一、二次电弧特性,并利用 ATP-EMTP 软件进行建模并模拟线路故障后的暂态过程,发现线路发生不同形式的故障时,工频分量的衰减性有很

大区别,基于此提出了一种利用 Prony 算法衰减因子比的故障识别判据,解决了实际系统中电压信号通过 PT 后频率率低因此无法利用的特点,并通过线路不同位置发生故障时的仿真结果证明该方法能够在断路器重合闸之前准确识别故障性质,以实现自适应重合闸,避免系统发生永久性故障时断路器重合对电网带来的二次冲击。

参考文献

[1] 施荣, 彭俊, 王涛, 等. 电弧小波能量谱下的输电线单相重合闸故障识别[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(6):788-794.

[2] 冷崇富, 江亚群, 黄纯, 等. 高压输电线路单相故障性质诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11):46-50.

[3] 罗勋华, 黄纯, 潘志敏, 等. 基于序分量无功功率的单相自适应重合闸[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 149-156.

[4] 荣雅君, 林飞飞, 张志鑫, 等. 分段 Prony 算法在特高压输电线路故障信号分析中的应用[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8):66-73.

[5] 石光, 邵文权, 郭耀珠, 等. 带并联电抗器输电线路单相故障性质识别判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 53-58.

[6] 江亚群, 冷崇富, 黄纯, 等. 基于 LMD 近似熵和 SVM 的自适应重合闸方法[J]. 湖南大学学报(自科版), 2015(8):74-80.

[7] 周超, 黄纯, 江亚群, 等. 基于改进 ITD 边际谱熵的单相自适应重合闸[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10):24-30.

[8] 戴永梁, 黄纯, 罗勋华, 等. HHT 边际谱熵在单相自适应重合闸中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(9):29-35.

[9] LIN X, HE B N, XU J Y. Secondary arc spectrum characteristics on EHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1891-1895.

[10] 梁林, 江亚群, 黄纯. 带并联电抗器的超高压输电线路单相故障识别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8):32-37.

[11] JOHNS A T, AGGARWAL R K, SONG Y H. Improved techniques for modelling fault arcs an faulted EHV transmission systems [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 148-154.

[12] ZHU Y, WANG D H, LIU J L. Research on algorithm of video segmentation based on self-adaptive single gaussian model [J]. Advanced Materials Research, 2014, 3326(989):2310-2313.

[13] PRIKLER L, KIZILCAY M, BÀN G, et al. Modeling secondary arc based on identification of arc parameters

from staged fault test records[J]. International journal of Electrical Power & Energy Systems, 2003, 25(8): 581-589.

[14] 王倩, 谭王景, 叶赞, 等. 基于 ATP-EMTP 的电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 16-21.

[15] 刘笑笑, 郑喻, 郑志超. 基于 ATP-EMTP 的故障接地电弧仿真研究[J]. 电气工程学报, 2015, 10(11): 53-57.

[16] 唐滢松, 曾宪文, 高桂革. EMTP 高压接地故障电弧的建模与仿真[J]. 上海电机学院学报, 2018, 21(3): 41-47.

[17] 李云阁, 刘青, 王倩, 等. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[18] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[19] 林琳, 孙新风, 马超. 变压器绕组变形在线监测方法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(3): 32-36.

[20] 高大珩, 尉伍, 王艺炜. 基于 Prony 算法和改进 Budeanu 理论的电力系统功率测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1582-1590.

[21] 李传江, 费敏锐, 胡豁生, 等. 基于谐波小波和 Prony 算法的转子不平衡信号提取[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2516-2522.

作者简介
谭王景(通信作者), 硕士, 助教, 主要从事变电站二次检修工作。
E-mail: twjcly@163.com