

基于电弧特性的特高压输电线路单相自适应重合闸

程玲¹, 徐玉琴¹, 宋稔霖²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国家电网公司宜昌超高压管理处江陵换流站, 湖北 宜昌 443005)

摘要: 提出了一种基于电弧特性的特高压线路单相自适应重合闸方案。通过 EMTP-ATP 软件中的 MODELS 模块建立二次电弧模型, 模拟了瞬时故障时二次电弧的反复燃烧-熄灭-重燃的过程。利用数学形态学的多分辨形态学梯度提取故障相母线电压信号的暂态分量, 通过比较故障相母线电压谱能量的差异来判别瞬时性与永久性故障。EMTP 仿真数据都证明该方案能准确地区分故障类型, 可靠地实现自适应重合闸。

关键词: 单相自适应重合闸; 二次电弧; 瞬时故障与永久故障识别; 数学形态学; 多分辨形态学梯度; EMTP 仿真

Single-phase adaptive auto-reclosure of EHV transmission line based on the arc characteristic

CHENG Ling¹, XU Yu-qin¹, SONG Zi-lin²

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Jianglin Converting Yichang EHV Administration, State Grid Corporation of China, Yichang 443005, China)

Abstract: A novel method based on the arc characteristic for single-phase self-adaptive recloser on ultra high voltage transmission line is presented in this paper. Building up secondary arc model through the MODELS modular of EMTP-ATP, this paper simulates that the secondary arc repeatedly burn and extinguish when transient fault occurs. It extracts the busbar transient voltage signal using the multi-resolution morphological gradient of the mathematic morphological, the differential spectrum energy of voltage can be used to determine whether the fault is permanent or transient. EMTP simulation data shows that this method can identify the fault nature and correctly implement the self-adaptive reclosure.

Key words: single-phase self-adaptive reclosure; the secondary arc; identification of transient fault from permanent fault; mathematic morphological; multi-resolution morphological gradient; electromagnetic transients program simulation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0018-05

0 引言

自动重合闸技术在我国架空输电线路获得了普遍应用, 其目的是为了在瞬时故障消除后使线路重新投入运行。由于绝大部分故障是瞬时性的, 采用自动重合闸可大大提高供电的可靠性, 提高电力系统并列运行的稳定性。但目前的重合闸技术仍存在两个主要问题: ①不能区分瞬时和永久故障, 可能重合于大电源系统的出口永久故障, 使电力系统及电力设备又一次受到严重故障的冲击; ②不能判别故障点是否已经熄弧, 重合闸出口的延时是固定的, 可能造成瞬时性故障因故障点尚未熄弧而重合不成功。

据统计, 在我国超高压输电线路, 90%以上的故障是单相接地故障, 而单相接地故障中约有80%为瞬时性故障, 所以在我国500 kV线路上大多采用

单相自适应重合闸消除单相接地故障, 提高系统运行的稳定水平, 另外单相重合闸的过电压比三相重合闸低很多, 在特高压线路上拟采用单相重合闸。

近年来, 单相自适应重合闸的理论和方法日趋成熟, 为其实用化奠定了理论基础。其中典型的有电压判据方法^[1,2], 它利用瞬时故障时恢复电压中存在电容耦合分量这一特点区分故障性质, 但在线路某一端出口处发生永久性单相接地故障时, 在对端会有一段误动区, 且不适合于带并联电抗器的线路。在此基础上提出了人工神经网络的智能识别方法^[3], 基于小波及小波包分析^[4]的自适应重合闸方法。以及基于电压谐波信号分析判断故障性质^[5]的方法, 其不足之处在于, 难以确定判据使用的时间, 且必须在较短时间内连续采样, 计算各次谐波幅值, 计算复杂, 灵敏性受到谐波大小的影响。

本文利用EMTP/ATP的MODEL模块建立故障点电

弧模型, 在瞬时性故障时通过电弧电阻接地, 实现了瞬时性故障时故障点电阻的非线性特性, 较好的模拟了瞬时性故障时电弧燃烧—熄灭—重燃的反复变化过程。利用数学形态学多分辨形态梯度, 提取故障后故障相母线电压暂态信号, 设置时间窗计算电压暂态信号谱能量, 通过电压谱能量的差异能较好识别故障性质, 用于提高重合闸成功率。在瞬时性故障时, 还能较精确的确定电弧熄灭的时间。

1 电弧特性分析

断路器跳开故障相线路后, 电弧并没有熄灭, 它将持续相对长的一段时间。这段时间内的故障电弧被称为二次电弧, 其影响因素是多方面的。二次电弧要经过燃烧、熄灭、重燃、熄灭的反复过程, 直到电弧电压不再大于电弧重燃电压后, 二次电弧才算是真正意义上的熄灭^[6]。

可以用下式来表达二次电弧的动态特性

$$\frac{\partial g_s}{\partial t} = \frac{1}{T_s} (G_s - g_s) \quad (1)$$

$$G_s = \frac{|i|}{V_s L_s(t_r)} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{\beta I_s^{1.4}}{L_s(t_r)} \quad (3)$$

$$V_s = 75 I_s^{-0.4} \text{ V/cm} \quad (4)$$

如上四式中, g_s 是随时间变化的二次电弧电导, G_s 是二次电弧稳态电导, T_s 是时间常数, L_s 是电弧长度, I_s 是二次电弧的电流峰值, β 是比例系数, V_s 是二次电弧单位长度的电弧电压, t_r 是二次电弧产生的时间, $|i|$ 是电弧电流的绝对值。

$$v_r(t_r) = \left[5 + 1620 T_e / (2.15 + I_s) \right] * (t_r - T_e) * h(t_r - T_e) \quad (5)$$

$$h(t_r - T_e) = \begin{cases} 1 & (t_r - T_e \geq 0) \\ 0 & (t_r - T_e \leq 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$V_r = |v_r(t_r)| * I_s(t_r) \quad (7)$$

电弧重击穿电压的上升速度是时间的函数, 即随着时间的增加, 电弧的重击穿电压增加, 电弧的重击穿电压还与电弧的电流有关^[7], 通过试验得出的经验公式如式(5), 其中 v_r 为电弧重击穿的电位梯度, T_e 为电弧产生到电弧熄弧的时间 (包括电弧临时熄灭和永久熄灭), V_r 为电弧的重燃电压。

潜供电弧的长度也随时间的变化而变化, 通过高速摄影技术得到在风速为 0.1 m/s 时, 电弧的长度与时间的关系为

$$I_s(t_r)/I_0 = \begin{cases} 1 & t_r \leq 0.1 \text{ s} \\ 10t_r & t_r > 0.1 \text{ s} \end{cases} \quad (8)$$

电弧的重燃电压随着二次电弧燃烧时间的延长和电弧长度的拉长而迅速升高。所以在故障电弧电压的变化过程当中, 当实际电弧电压小于电弧重燃电压时, 电弧电流恰恰在过零点附近, 相当于电弧的熄灭状态; 而当电弧电压大于电弧重燃电压时, 电弧相当于重燃状态; 直到重燃电压很高, 而实际电弧电压的大小始终不再大于电弧重燃电压以后, 电弧才彻底熄灭电弧熄弧后, 故障相的恢复电压等于电感耦合电压和电容耦合电压之和, 其值将变大。

通过识别二次电弧的特性可判断故障性质, 而且, 检测二次电弧的熄弧时刻, 对决定自动重合闸装置的最佳重合闸时间具有决定性意义。

2 电弧模型的仿真过程

本文采用 EMTP-ATP 进行数字仿真试验, 在建立电弧模型时特别利用了 MODELS 和 TACS 模块。ATP 的 MODELS 是一种研究时域系统特性的通用描述语言, 也被许多其它仿真工具所支持, 可描述任何用户自定义的控制系统和电路结构, 并为其它程序或模块连接到 ATPDRAW 提供了一个简单的接口。TACS 是 EMTP 控制系统模拟工具, 它扩展了 EMTP 的功能和应用。在 EMTP 中电气网络和 TACS 是分别求解的。

线路模型为特高压线路晋东南—南阳段 1000 kV 线路系统, 线路全长 358 km, 线路参数为 $R_1=0.00758 \Omega/\text{km}$, $R_0=0.15421 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.2635 \Omega/\text{km}$, $L_0=0.8306 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.013970 \mu\text{f}/\text{km}$, $C_0=0.009296 \mu\text{f}/\text{km}$ 。

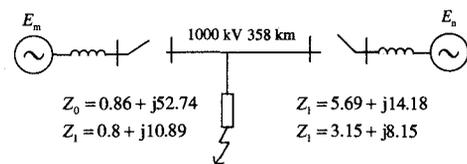


图 1 特高压 1000 kV 输电线路系统图

Fig.1 1000 kV EHV transmission line system

在建立电弧模型过程中, 利用 ATPDRAW 的 OBJECT 模块提供的 MODEL 语言对电弧的动态特征及电弧熄灭重燃过程进行描述, 创建 mod-file, 并建立相对应 sup-file, 即可生成描述一、二次电弧特性的模型控制块。二次电弧的模型控制块以故障点电弧电压及电流为输入量, 并包含两个输出量, 分别作为 TACS 非线性电阻 (type91) 及 TACS 开关 (type13) 的 TACS 端输入量, 以控制 TACS 非线性电

阻 (type91) 阻值及 TACS 开关(type13)闭合状态, TACS 控制的非线性电阻与 TACS 开关的串联即组成了二次电弧模型。一次电弧模型控制块只有一个输入量故障点电弧电流和控制 TACS 非线性电阻 (type91) 阻值的输出量, 该非线性电阻即为一次电弧模型。

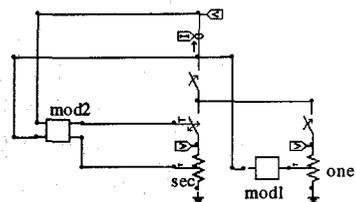


图 2 电弧电阻模型示意图
Fig.2 The arc resistance model

设在线路中点处发生 a 相短路故障, 瞬时性故障以线形电阻串联电弧电阻接地 (一次电弧与二次电弧模型并联连接, 通过时控开关分别控制它们的投入状态), 永久性故障直接经线形电阻接地。在 0.05 s 时发生故障, 一次电弧产生, 投入一次电弧模型, 此时二次电弧模型处于断开状态。0.1 s 时线路两侧短路器跳开, 一次电弧熄灭, 二次电弧产生, 投入二次电弧模型, 断开一次电弧模型。电弧电阻模型如图 2 所示。图 3 为短路器跳闸后, 0~400 ms 时间段内, 金属性短路情况下故障相端电压, 以及二次电弧期间的电弧电压、电流波形。

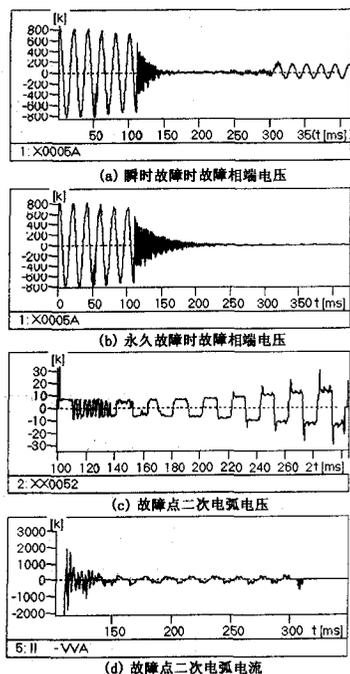


图 3 线路中点处金属性短路时波形

Fig.3 Wave of line centre point in metal fault case

很明显, 电弧电压近似成方波, 与理想情况下电弧电压电流波形^[6]相比, 近似性很高。且燃弧大约持续 200ms, 在 300~400ms 之间电弧熄灭, TACS 开关打开电弧电流为零。故障相电压有较大幅度的升高, 且成有规律的正弦波。此时故障相的恢复电压等于电感耦合电压和电容耦合电压之和。

3 形态学的应用

数学形态学方法用于信号处理时只取决于待处理信号的局部形状特征, 比传统的线性滤波更为有效, 在有效的消除信号噪声的同时保留原信号的全局和局部特征。它计算简单, 其算法只有加减法和取极值计算, 不涉及乘除法, 因而可以对信号进行实时处理^[8]。

形态梯度不同于一般常规物理意义下的梯度, 梯度运算是突现边缘信息的有效工具, 故可用来进行图象的边缘检测和信号处理。但仅利用普通的形态学梯度无法满足高灵敏度奇异性检测的要求。类似小波分析, 多分辨率分析的概念也被用于数学形态学, 也就是多分辨率形态学梯度。为了提取暂态波形的上升和下降边沿, 在多分辨形态学梯度中, 定义了一种可变并具有不同原点位置的结构元素^[9], 如式 (9)、(10) 所示:

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (9)$$

$$g^- = \{g_1, g_{l-1}, \dots, g_2, g_1\} \quad (10)$$

式中: 结构元素长度 l , 等于 $2^{l-m} \times l_g$, m 为多分辨形态梯度的分析级数, l_g 为结构元素在第 l 层的初始宽度。在 g^+ 和 g^- 中带下划线的元素表示它们的原点位置。结合 g^+ , g^- 和形态梯度定义式, 多分辨形态梯度第 m 层输出为

$$p_{g^+}^m = (p^{m-1} \oplus_{g^+})(x) - (p^{m-1} \ominus_{g^+})(x) \quad (11)$$

$$p_{g^-}^m = (p^{m-1} \ominus_{g^-})(x) - (p^{m-1} \oplus_{g^-})(x) \quad (12)$$

$$p_g^m = p_{g^+}^m(x) + p_{g^-}^m(x) \quad (13)$$

4 自适应重合闸判据的提出及验证

永久性故障情况下电弧会很快熄灭; 而瞬时性故障情况下, 其电弧要经过燃烧—熄灭—重燃—熄灭的反复过程, 变化过程复杂, 其中许多影响因素都具有非线性特性, 电弧的非线性会造成故障相电压的畸变。由于在瞬时性故障时, 故障点电弧可视为一非线性电阻, 其在故障相母线上产生的高频信号反应在故障相母线电压的能谱较高, 永久性故障

电弧很快熄灭, 反应在故障相母线电压的能谱较低。电弧特性在不同的故障性质下存在的这种差异为其自适应的判别提供了可能性。

本文中通过多分辨形态学梯度提取断路器跳闸后一段时间内故障相的暂态电压信号, 并对多分辨形态学梯度分析后的结果进行谱能量分析。首先利用Fourier级数对断路器跳开后故障相电压信号进行频谱分析, 以确定故障量中所包含的主要故障分量, 如图4所示, 以线路中点金属性瞬时故障为例。从图中可确定故障相电压除包含基波分量外, 其高频成分主要包含5, 7, 8.5, 13, 14.5, 21和24次谐波, 频率范围为250~1250 Hz。

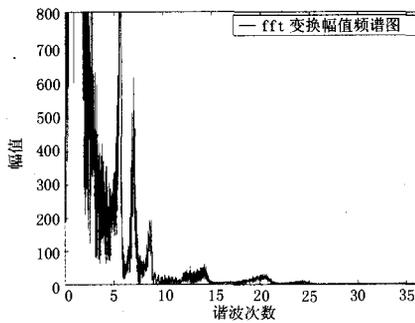


图 4 故障相电压 FFT 变换

Fig.4 Fourier transforms of fault phase voltage

在选取多分辨形态学梯度层数时, 为了能提取故障相频率范围为250~1250 Hz的高频信号的特性, 对其进行四层形态学梯度分析比较适合。将PT二次传变的电压信号 u_k 进行4层多分辨形态学梯度分析, 以提取高频暂态分量, 如式(11)~(13)所示; 进而, 通过移动数据窗并根据公式(14)计算第4层的形态梯度能量谱。

$$E = (n\Delta T) = \sum_{k=n-M}^n U_{f4}^2(k\Delta T)\Delta T \quad (14)$$

通过对故障相电压进行4层多分辨形态学梯度分析, 发现两种故障下, 在故障发生及断路器跳开后100 ms时间内, 信号畸变度均很大, 高频暂态分量谱能量差别不大, 无法有效区分故障类型, 特别在金属性故障时, 由于系统受到冲击最大, 永久故障下电压畸变程度更大。然而瞬时故障时电弧要经历燃烧、熄灭、重燃、熄灭的反复过程, 对故障相电压暂态分量的影响持续时间较长; 永久故障时, 电弧很快就熄灭, 故障相形态学梯度谱能量只在断路器跳开后一小段时间保持较大值。本文中仿真结果以及现场经验均表明瞬时故障时故障点处二次电弧持续的时间大约为250 ms, 而永久故障下电弧熄灭的时间远小于250 ms。为此本文在300~305 ms时间内

对 u_k 采样。本文选取采样步长 $\Delta T=0.05$ ms, 数据窗的采样点数 $M=100$, 数据窗宽度为 $M\Delta T=5$ ms。

本文通过对不同故障位置及不同过渡电阻情况进行大量仿真, 仿真结果都证实了瞬时性故障的电压谱能量大于永久性故障的电压谱能量, 这一实验结果很好地证明了上文中的分析结论。并且在金属性短路时, 系统受冲击较大, 瞬时性故障和永久性故障情况下, 电压谱能量都比较高, 但是瞬时故障下电压谱能量仍然远远大于永久性故障下的情况。随着过渡电阻的增加, 瞬时性故障情况下的电压谱能量总体呈减少趋势, 但变化幅度不大; 而经过渡电阻接地的永久故障下, 电压谱能量值远小于金属性短路时谱能量值变化幅度很大, 其值均小于1.0, 过渡电阻的增加没有引起能量谱值大范围的变化。所以在选取整定值时, 要求谱能量整定值高于永久故障金属性短路时谱能量最大值, 且小于瞬时故障高阻接地情况下谱能量最小值即可。数百例仿真结果表明, 金属性短路时永久故障下谱能量最大值在2000以下, 而经大电阻接地时瞬时故障电压谱能量最小值在4000以上。设置谱能量整定值 E_{set} 为2000, 且为了增强判据的可靠性, 设置可靠系数 $K_k=1.2$ 。

$$E \geq E_{set} * K_k \quad (15)$$

当所测电压谱能量满足式(15)时则判断为瞬时性故障, 否则为永久性故障, 在故障发生后不应发重合闸命令。

本文针对特高压线路作了大量的仿真, 在不同故障点及不同过渡电阻情况下验证了上述自适应重合闸判据, 表1为部分实验结果:

表1 试验结果示例

Tab.1 The example of experimental results

位置 \ 类型	金属性短路		过渡电阻 为 50 Ω		过渡电阻 为 100 Ω	
	永久	瞬时	永久	瞬时	永久	瞬时
0%	0.0012	6685.5	0.0061	6872.4	0.0407	6162.9
10%	0.4129	4904.1	0.0118	5993.1	0.0364	5791.2
30%	5.961	6459.3	0.0032	5652.9	0.0286	5902.4
50%	118.94	6257.3	0.0301	5511.9	0.0173	6102.4
70%	1153.4	4046.9	0.2006	4713	0.0856	4743.1
90%	1534.6	5639.2	0.4508	5167	0.2510	4061.6
100%	1775.6	5618.7	0.1904	4593.8	0.1942	4791.4

由表1可知判断结果不受过渡电阻及故障点位置变化的影响, 均能准确识别出故障类型。特别在金属性短路时准确的识别永久性故障, 避免了金属

性短路情况下对永久性故障实施重合闸对系统造成的巨大冲击。

5 结论

实现自适应重合闸技术对电力系统的稳定安全有重要意义。其关键就是准确识别瞬时性故障与永久性故障,本文提出的比较母线故障相电压暂态分量的谱能量方法,能可靠地识别故障类型,以实现自适应重合闸。该方案只需提取 PT 二次传变电压信号,实现简单。经过大量的 EMTP 仿真,验证了该方案的有效性与可靠性。

参考文献

- [1] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
GE Yao-zhong. Method of Distinguishing Between Instant and Permanent Fault During Single-Phase Reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-31.
- [2] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.
FAN Yue, SHI Wei. Modification of Voltage Criterion in the Single-pole Automatic Reclosing of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47.
- [3] 房鑫炎 阙波. 人工神经网络在自适应重合闸瞬时与永久故障判别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 80-86.
FANG Yin-yan, QUE Bo. The Application of ANN in the Distinction of Transient and Permanent Faults during Adaptive Autoreclosure[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 80-86.
- [4] 蔡超豪. 基于小波分析的自适应重合闸[J]. 继电器, 1999, 27(2): 21-23.
CAI Chao-hao. Adaptive Single-phase Reclosing Based on Wavelet [J]. Relay, 1999, 27(2): 21-23.
- [5] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.
LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.
- [6] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Technique for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems[J]. IEE Pro-Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 148-154.
- [7] Golderg S, Horton W F. A Computer of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 586-593.
- [8] 全玉生, 李学鹏, 杨俊伟, 等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1-5.
QUAN Yu-sheng, LI Xue-peng, YANG Jun-wei, et al. Application of Several Mathematical Morphology Operators in Power System Saltation Signal Detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 1-5.
- [9] 马静, 王增平, 徐岩, 等. 利用多分辨形态梯度实现单端暂态量保护新方案[J]. 华北电力大学学报, 2005, 33(5): 7-11.
MA Jing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. New Scheme of Single-end Transient-based Protection Using Multi-resolution[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 33(5): 7-11.

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2007-08-01

作者简介:

程玲(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压电网单相自适应重合闸; E-mail: chengling_1983xy@163.com

徐玉琴(1964-), 女, 教授, 主要从事电力系统继电保护新原理与新技术、电力系统分析与控制方面的研究;

宋祜霖(1981-), 男, 电气工程师, 于国家电网公司宜昌超高压管理处江陵换流站工作。

Wide-area Disturbances[J]. 2001 IEEE: 710-714.

收稿日期: 2007-05-16; 修回日期: 2007-08-13

作者简介:

张玮(1973-), 女, 博士生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhangwei_jn@mail.sdu.edu.cn

潘贞存(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护和安全自动控制;

李磊(1974-), 男, 高工, 研究领域为电力系统继电保护。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [7] Surachet Tamronglak. Analysis of Power System Disturbances due to Relay Hidden Failures Doctoral Dissertation[D]. Virginia: Virginia Polytechnic and State University, 1994.
- [8] 易俊, 周孝信. 考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 1-5.
- [9] Elizondo D C, de la Ree J, Phadke A J, et al. Hidden Failures in Protection Systems and Their Impact on