

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190580

基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法

吕哲, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 随着大量电力电子装置应用于电网, 暂态量保护的优势逐渐凸显。针对其易受雷击干扰影响的问题, 在非雷击故障、雷击干扰和雷击故障下, 对各相暂态电流附加分量进行了分析。得出故障与雷击干扰的本质差异为: 故障暂态波形的整体变化趋势中具有明显的工频正弦特征。据此, 采用平均值滑动去噪的方法可基本消除雷电流等高频影响, 获得暂态电流的主波形。提出采用 50 Hz 正弦函数对主波进行拟合, 基于拟合决定系数的大小可识别各相线故障。经 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真, 验证所提识别方案能正确识别各种类型下的雷击干扰与故障, 不受故障初始角及过渡电阻的影响, 适用于不同类型输电线路。

关键词: 输电线路; 暂态量; 雷击干扰; 波形特征; 正弦拟合

Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics

LÜ Zhe, WANG Zengping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the large number of power electronic devices applied to the power grid, the advantages of transient protection are more obvious. For the problem that it is susceptible to lightning strikes, the additional component of transient current in each phase are analyzed under short-circuit fault, lightning strike disturbance and lightning strike causing fault. The essential difference between fault and disturbance is whether the trend of the transient waveform has the characteristic of power frequency sine wave. Accordingly, the method of using the average value sliding denoising can eliminate the high frequency effects such as lightning current, and obtain the main waveform. It is proposed to fit the main wave with a 50 Hz sinusoidal function. Based on the determination coefficient criterion of fitting, the faults and lightning strike disturbance of each phase line can be distinguished. The PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation results verify that the proposed identification scheme can correctly identify lightning strikes and faults under various scenarios. It is suitable for various transmission lines without being affected by the inception angle of the fault and the transition resistance.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900604) and National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: transmission line; transient component; lightning strike; waveform characteristic; sine fitting

0 引言

电力电子化电力系统的快速发展, 一方面对继电保护速动性提出了更高的要求, 另一方面线路 FACTS 元件及逆变器型电源给传统工频量保护带来

了不确定性^[1-3]。暂态量保护由于可以充分利用故障暂态时丰富的故障特征信息, 能有效提高保护速度, 受到了国内外学者的广泛关注^[4-5]。但暂态量保护数据窗长通常为几毫秒, 当输电线路受到雷击干扰时, 其暂态过程与故障信号相似, 均含有较大的高频成分, 极易引发暂态量保护的误判。因此, 如何快速正确识别雷击干扰与故障信号是暂态量保护实用化进程中所必须解决的问题。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900604);
国家自然科学基金重点项目资助(51637005)

目前, 在雷击干扰识别方面已取得了一定进展, 原理主要分为利用暂态高频分量和利用时域波形特征两类。暂态高频分量方面, 有学者提出利用小波变换、数学形态学等方法计算暂态电流高低频能量比作为识别判据^[6-9], 亦或利用 HHT 变换、小波能量谱提取各频带信息进行区分^[10-11]。此外, 文献[12]基于线路避雷器特性, 提出根据暂态高频能量衰减速度的快慢识别雷击干扰; 文献[13]根据暂态电流的能量频谱分布中主频带随时间的变化差异, 引入变异系数识别雷击干扰。但是电流高频分量受线路补偿装置、雷电流幅值、故障条件和 CT 传变特性等众多因素影响, 不同频带的选取及相应保护判据缺乏理论依据支撑。

时域波形特征方面, 有学者提出可根据雷击前后行波电流变化大小的不同识别雷击干扰^[14], 或根据行波波头与截波处最大斜率比、波尾持续时间进行识别^[4,15]。根据三相电流行波极性和行波能量变化特点可识别不同雷击类型^[16]。通过对瞬时功率波形进行主成分分析聚类, 可利用机器学习的方法进行判别^[17]。该类方法依赖于对行波波头的准确捕捉, 线路结构及串联补偿装置将对其产生一定影响。文献[18]根据线路暂态电压零模与线模分量之间的差异, 可准确识别感应雷击, 但不够全面。根据暂态电流的变化趋势特征, 对 3 ms 内的波形进行直线拟合, 定义了“波形一致性/相似系数”^[19-20], 可较好地识别雷击干扰与故障。在此基础上, 文献[21]根据暂态电流正负轴积分差异的大小, 判断其是否偏向 0 轴一侧来识别线路故障。然而, 故障暂态电流的单调性其实是受到线路附加工频电源的影响, 在一定故障条件下, 采用直线拟合正弦波形的方式可能出现较大的偏差。同理, 在特定情况下暂态波形将穿越 0 轴, 使得基于正负轴电流含量差异的识别灵敏度下降。

为解决上述问题, 本文基于对各相暂态电流附加分量和相应地模、线模分量的分析, 总结出在非雷击故障、雷击干扰和雷击故障下波形的本质差异, 具有一定的理论依据。通过从不同特征角度设计了识别判据, 并利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真进行验证。结果表明, 所提识别方案能可靠、灵敏地识别各相线雷击干扰与故障, 具有较好的普适性。

1 雷击干扰与故障暂态特征分析

为分析雷击干扰与故障特征差异, 以图 1 为例, 搭建 500 kV 系统仿真模型。如图 2 所示, 输电线路采用频域相关模型, 顶端架设两根避雷线, 杆塔采用多波阻抗模型, 接地电阻 R_g 采用冲击阻抗模型^[22]。

其中, 母线对地电容为 $0.01 \mu\text{F}$, 线路两侧装有金属氧化物避雷器, 绝缘子串采用伏秒积模型^[17]。根据我国防雷规程建议, 雷电流采用标准 $2.6/50 \mu\text{s}$ 负极性双指数波形^[23], 计算方式如式(1)所示。

$$i_L(t) = -I_L(e^{-t/\lambda_1} - e^{-t/\lambda_2}) \quad (1)$$

式中: I_L 表示雷电流幅值; λ_1 、 λ_2 分别表示波前和半峰值时间; 雷电通道波阻抗 Z_0 取为 300Ω 。

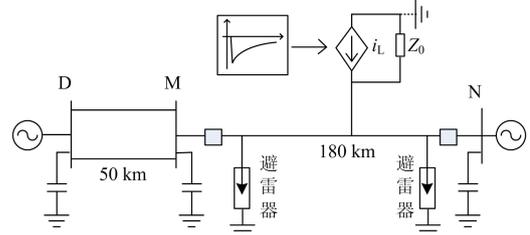


图 1 500 kV 系统仿真模型

Fig. 1 500 kV system simulation model

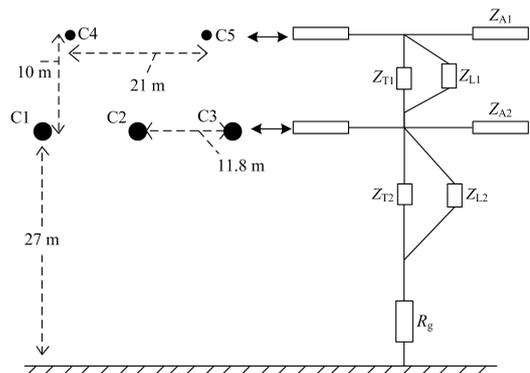


图 2 500 kV 输电线路及杆塔模型

Fig. 2 500 kV transmission line and tower model

为凸显雷击干扰及线路故障的特征差异, 消除负荷及系统运行方式的影响, 选用各相电流附加分量进行研究。

$$i^*(t) = i(t) - i(t - T) \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为当前测得的线路电流; T 为工频周期 20 ms。此外, 通过 Karenbauer 变换阵可将各相附加分量解耦为线模和地模分量进行分析。

$$\begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 线模 i_{l1} 、 i_{l2} 表示各相之间的电流变化关系; 地模 i_g 表示为各相与大地之间的电流变化关系。对于不同相间故障, 取线模中的最大值进行计算。

1.1 非雷击故障

当发生非雷击故障时, 故障相附加分量电路如图 3 所示, i_M 和 i_N 为线路两侧电流。线路分布电容

电流由 i_c 统一表示, i_f 为故障支路电流, 满足如下等式:

$$i_M(t) + i_N(t) = i_f(t) + i_c(t) \quad (4)$$

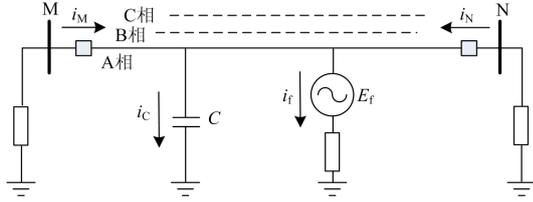


图 3 非雷击故障附加分量电路

Fig. 3 Additional circuit of short-circuit faults

在图 3 初始零状态电路中, M 侧暂态电流 i_M 可分为强迫分量和自由振荡分量。其中, 强迫分量与故障工频电压源 E_f 有关, 自由振荡分量反映了线路中磁场与电场间的能量交换, 与故障行波在线路中的折反射传播有关。

由图 4(a)、图 4(c) 可得, 对于故障相, E_f 将激励产生幅值较大的工频电流, 并由于故障行波的折反射而附加有幅值较低的高频振荡分量。因此, 故

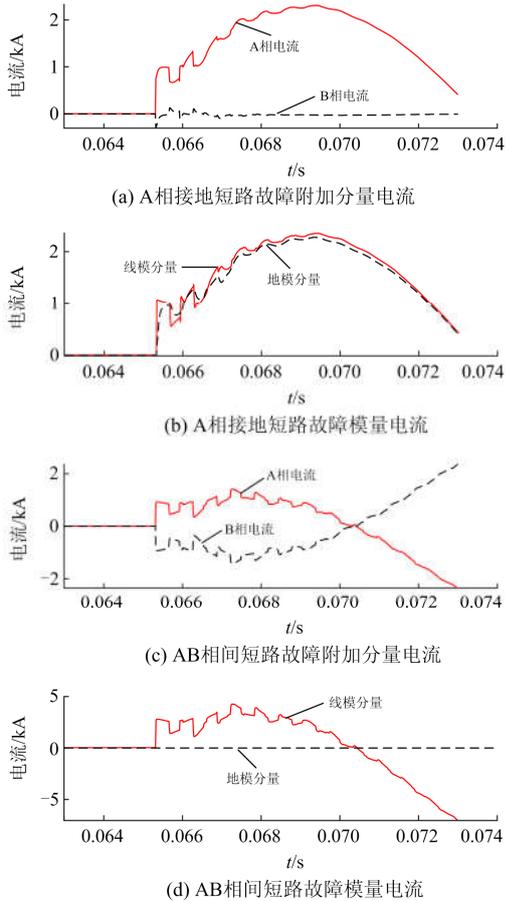


图 4 非雷击故障电流示意图

Fig. 4 Current diagram of short-circuit faults

障相在整体变化趋势中呈现为工频正弦波形。非故障相由于相间耦合, 受到故障相高频分量的影响, 暂态阶段主要表现为在 0 轴附近高频振荡的特征。以图 4(b)、图 4(d) 为例, 当发生接地故障时, 故障支路电流流经大地, 使得线模分量与地模分量的差异不明显。当发生非接地故障时, 由于故障电流不存在对地通路, 因此地模分量几乎为 0。

1.2 雷击干扰

输电线路受到的雷电冲击通常分为感应雷和直击雷。感应雷仅通过电磁感应和静电感应作用到线路, 110 kV 及以上线路一般不会引起闪络事故。直击雷通常分为雷击杆塔塔顶、雷绕击导线和雷击避雷线档距中央, 当雷电流幅值较低时, 将发生雷击干扰。

图 5 为雷击干扰时的附加分量电路, 无论是绕击导线还是通过耦合作用至线路, 各相线均相当于注入一个近似双指数曲线的电流激励源 i_L , 电流满足如下等式:

$$i_M(t) + i_N(t) = -i_L(t) + i_c(t) \quad (5)$$

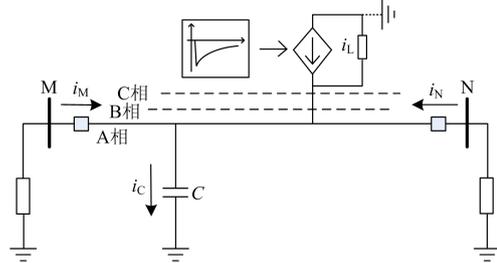
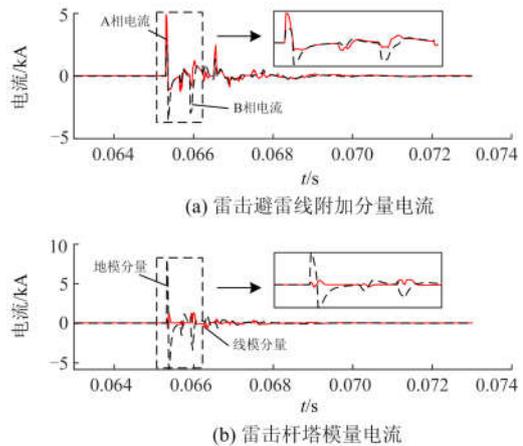


图 5 雷击干扰附加分量电路

Fig. 5 Additional circuit of lightning strike disturbance

M 侧电流 i_M 主要受到雷电波在线路上传播特性的影响, 表现为电流行波在线路两侧折、反射, 并逐渐衰减至零。仿真示例波形如图 6 所示, 其中雷击避雷线及雷击杆塔时的雷电流幅值为 150 kA。图 6(c)、图 6(d) 为雷绕击 A 相导线, 雷电流幅值为 15 kA。



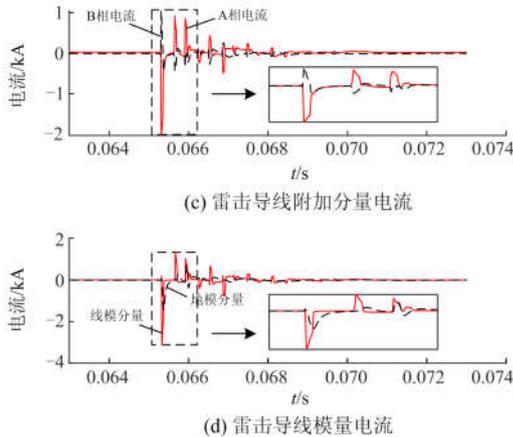


图 6 雷击干扰电流示意图

Fig. 6 Current diagram of lightning strike disturbance

在雷击干扰下, 由于雷电波在线路之间的折反射, M 侧各相电流表现为在 0 轴附近高频振荡衰减的形式, 且正负轴含量基本相同。其波动频率与线路长度呈负相关, 衰减速度与线路分布参数以及线路两侧折反射系数相关。感应雷击的情况已有相关文献进行了详细分析^[18], 本文不再赘述, 此时由于雷击点到线路各相的距离基本相同, 各相暂态附加电流波形相似, 地模分量远大于线模分量。当发生雷击杆塔或雷击避雷线时, 在电磁耦合作用下, 各相线路的感应电流变化规律与幅值大体相同, 使其绝大部分流经地模网络, 线模分量几乎为 0。当发生雷击绕线路时, 雷击相(文中为 A 相)电流明显大于其他相的感应电流, 且与其他相电流变化方向相反。此时电流主要流经线模网络, 使得线模分量大于地模分量。

1.3 雷击故障

雷击故障主要指在雷击导线或雷击杆塔的过程中(一般认为雷击避雷线不会造成线路故障), 线路绝缘子串由于杆塔与线路之间的电势差超过其耐受电压而发生冲击闪络, 并转化为稳定的故障。如图 7 所示, 线路电流满足如下等式:

$$i_M(t) + i_N(t) = -i_L(t) + i_C(t) + i_f(t) \quad (6)$$

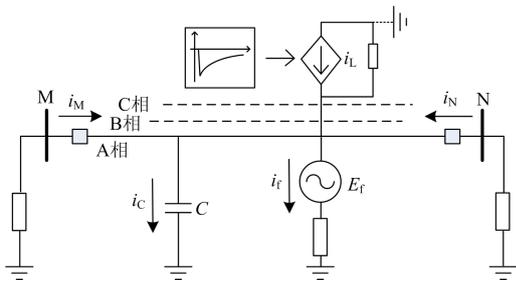


图 7 雷击故障附加分量电路

Fig. 7 Additional circuit of lightning strikes causing fault

从雷击到发生冲击闪络时间通常为几微秒, 进而转化为稳定的工频电弧时间也仅在几十微秒以内。因此 M 侧电流 i_M 兼具有雷击干扰和故障工频变化的双重特征。仿真示例波形如图 8 所示, 其中图 8(a)、图 8(b)为雷绕击 A 相导线并发生 A 相闪络故障, 雷电流幅值为 25 kA。图 8(c)、图 8(d)为雷击杆塔塔顶使得 A、B 相同时发生闪络故障, 雷电流幅值为 250 kA。

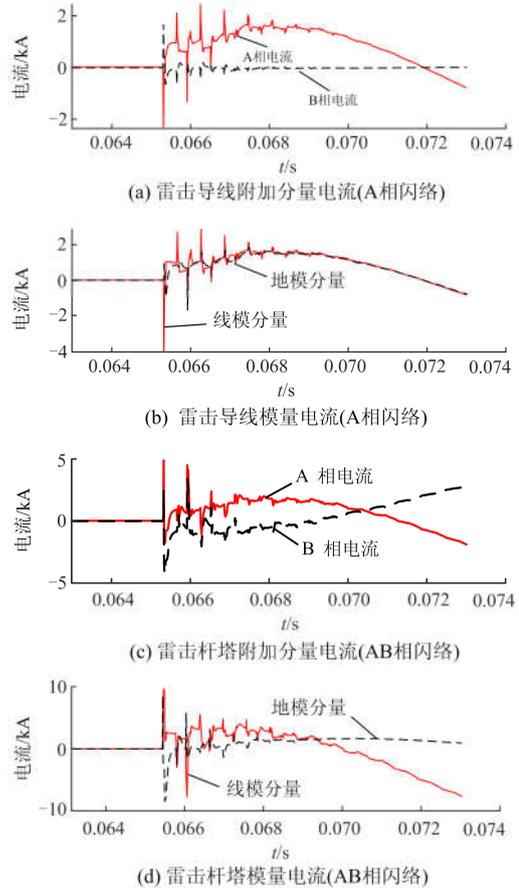


图 8 雷击故障电流示意图

Fig. 8 Current diagram of lightning strikes causing fault

在故障暂态初始, 各相电流与雷击干扰时的波形具有一定相似度, 因此难以从频谱含量上进行区分。然而从整体变化趋势中可以看出, 故障相电流由于存在故障工频电源, 依然具有明显的 50 Hz 正弦特征, 这是与雷击干扰本质上的差异。非故障相由于相间耦合作用, 表现为在 0 轴附近的高频振荡。对于不同类型的雷击闪络故障, 暂态时线模与地模分量之间的含量差异不明显, 不存在地模分量远大于线模分量的情况。

1.4 雷击干扰与线路故障暂态电流特征

根据上述分析, 线路发生雷击干扰与线路故障时暂态电流具有以下特征:

1) 只有当线路发生感应雷击、雷击避雷线和雷击杆塔三种雷击干扰时, 暂态电流附加分量中地模分量显著大于线模分量; 其他情况下, 地模分量与线模分量差异不明显。

2) 当线路发生非雷击故障或雷击故障时, 故障相附加分量电流整体表现为约 50 Hz 正弦变化特征, 且幅值较大, 非故障相附加分量电流整体表现为在 0 轴附近高频振荡的趋势。

3) 当线路发生雷击干扰时, 各相附加分量电流均表现为在 0 轴附近高频振荡趋势。

2 雷击干扰与故障识别方案

2.1 识别判据

当线路暂态量保护启动判据启动后, 设当前时刻 $t=0$ 。根据上述部分雷击干扰时的地模分量与线模分量的差异特征, 设置暂态能量识别判据 J 。

$$J = \sum_{n=1}^M i_g(n)^2 / \sum_{n=1}^M i_l(n)^2 \geq J_{set} \quad (7)$$

式中: n 为当前第 n 个采样时刻; M 为数据窗长, 取为 2 ms; J_{set} 为判据整定值。当 $J > J_{set}$ 时, 认为线路发生雷击干扰为感应雷击、雷击避雷线或雷击杆塔之一。按照雷击线路出口杆塔闪络进行整定, J_{set} 取为 5。当 $J < J_{set}$ 时, 需要做进一步识别判定。

考虑到对于雷击干扰或非故障相, 其暂态附加分量电流表现为在 0 轴附近的高频振荡, 且变化规律由于电场与磁场之间的能量交换, 基本关于 0 轴对称。因此, 采用平均值滑动去噪的方法可消去各相电流中的高频分量, 能较为准确地体现出暂态电流的整体变化趋势。将平均值化后的电流波形称为“主波”, 主波的计算方法如式(8)所示。

$$\bar{x}_n = \frac{1}{D} \sum_{i=n-D}^n x_i \quad (8)$$

式中: \bar{x}_n 、 x_n 分别为 n 时刻的主波值与实际值; D 表示平均去噪窗长, 取为 1.5 ms。如图 9 所示, 主波波形能较好地表征暂态电流的整体变化趋势, 基本不受雷电流等高频分量的影响。

由上述分析可知, 在不同故障时刻和故障类型下, 主波均能体现出具有故障特征的 50 Hz 正弦变化规律, 与非故障相具有明显差异。因此, 可设置 50 Hz 正弦函数对主波进行波形拟合, 并计算拟合结果对实际主波的拟合优度, 即决定系数(R-square)。可有效检测出波形中是否含有工频故障特征, 其中拟合函数如式(9)所示。

$$y_i = A \sin(2\pi \times 50t_i + \theta) + B \quad (9)$$

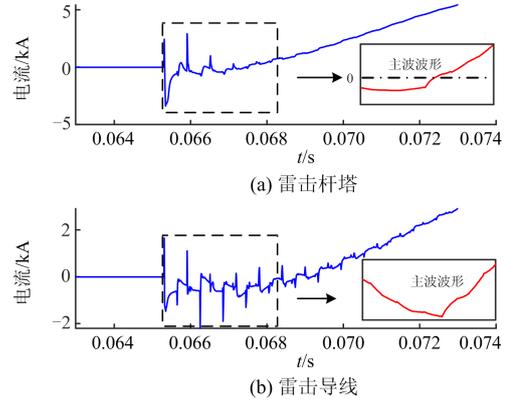


图 9 不同雷击故障下故障相附加分量电流

Fig. 9 Additional component current of fault phase with different lightning strikes causing fault

式中: B 表示暂态电流非周期分量大小; 设置最小拟合幅值 $A_{min}=0.001$ 。决定系数是通过计算回归平方和与残差平方和来衡量拟合回归函数对暂态主波变化规律的解释程度, 与波形自身大小无关。相比于相关系数, 决定系数的评价更偏保守, 其计算方式如式(10)所示。

$$R^2(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^M (\bar{x}_i - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{x}_j)^2 (y_i - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_j)^2}{\sum_{i=1}^M (\bar{x}_i - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^M (y_i - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_j)^2} \quad (10)$$

式中: M 为数据窗长, 取为 3 ms; R^2 在 0~1 区间取值。当 R^2 接近 1 时表示主波波形具有明显的 50 Hz 正弦变化规律; 当 R^2 接近 0 时表示主波与拟合波形具有较大的差异, 基本不含有 50 Hz 正弦变化成分。根据雷击闪络与非雷击故障发生在线路出口处进行整定, R_{set}^2 设为 0.9, 当 $R^2 > R_{set}^2$ 时, 判为线路故障, 当 $R^2 < R_{set}^2$ 时, 判为雷击干扰。

2.2 雷击识别配合方案

基于上述暂态地、线模分量差异判据和波形拟合决定系数判据, 设计雷击识别方案如图 10 所示。图 10 中, 雷击干扰 I 为感应雷击、雷击避雷线或杆塔, 雷击干扰 II 为雷击导线等干扰。其中判据 J 仅需 2 ms 窗长, 计算复杂度较小, 可识别部分雷击干扰; 判据 R^2 计算复杂度较大, 需要 3 ms 窗长, 可全面识别各种故障类型。通过判据之间的相互配合, 能有效提高识别速度, 避免雷击干扰影响。

3 仿真实验与分析

为验证所提综合识别方法的性能, 以图 1 所示系统为例, 在 PSCAD/EMTDC 中进行电磁暂态仿真,

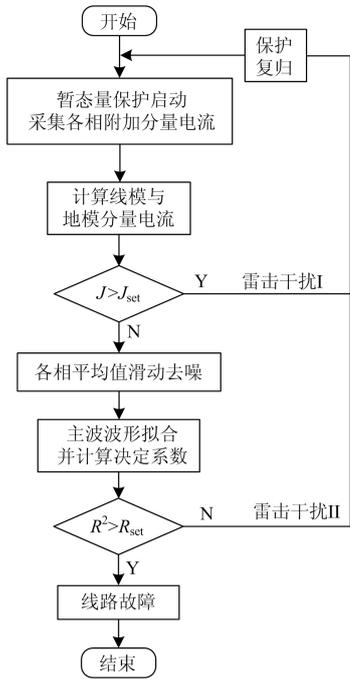


图 10 雷击干扰与故障识别流程图

Fig. 10 Identification flow chart about lightning strike disturbance and faults

对不同雷击类型、雷电流幅值大小以及故障条件等进行分析, 采样频率取为 100 kHz。

3.1 传统雷击识别方法分析

在一定故障条件下, 电流经平均值滤波后的暂态波形如图 11(a)所示, 此时文献[19]采用直线进行拟合将可能出现较大的误差。在不同时刻故障时, 如图 11(b)所示, 暂态电流将穿越 0 轴。此时 0 轴上下两侧电流含量相对差异和绝对差异均较小, 使得文献[21]中的识别判据灵敏性下降。此时采用 50 Hz

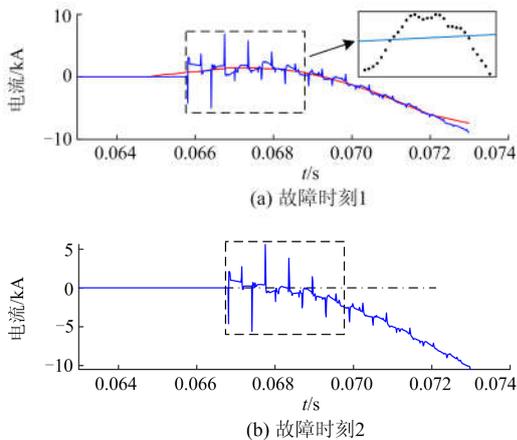


图 11 不同时刻下雷击故障线模电流

Fig. 11 Aerial mode current of lightning strikes causing fault at different times

正弦拟合并计算决定系数的方法将不受此影响。

3.2 非雷击故障

设置不同短路故障类型对识别判据性能进行检验, 对于发生概率较大的单相接地故障, 分析不同过渡电阻的影响。故障发生时, A 相、B 相、C 相电流初始角分别约为 120°、0°、-120°, 故障位置距离 M 侧 90 km, 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同类型非雷击故障下仿真结果

Table 1 Simulation results with different common short-circuit faults

短路故障	过渡电阻	判据 J	决定系数 R^2		
			A 相	B 相	C 相
A-G	1 Ω	0.90	0.98	0.25	0.24
	100 Ω	0.89	0.97	0.12	0.12
	500 Ω	0.81	0.98	0.08	0.08
AB	—	≈ 0	0.98	0.98	0.26
AB-G	100 Ω	0.66	0.96	1.00	0.55
AB-G	500 Ω	0.81	0.98	1.00	0.47
ABC	—	0.03	0.98	0.97	0.99

由表 1 可以看出, 当发生不同非雷击故障类型时, 暂态电流地模与线模分量的比值判据 J 明显小于整定值 5, 不会发生误判。结合图 12 可知, 如 ABC 三相短路时, 暂态电流仅在 0 轴附近变化, 使得主波含量不明显, 但判据 R^2 为 0.97, 依然可识别为故障相。因此, 基于波形拟合计算的决定系数判据 R^2 可不受过渡电阻及故障初始角的影响, 能准确识别各故障相。非故障相 R^2 判据最大为 0.55, 识别方案具有较好的灵敏度。

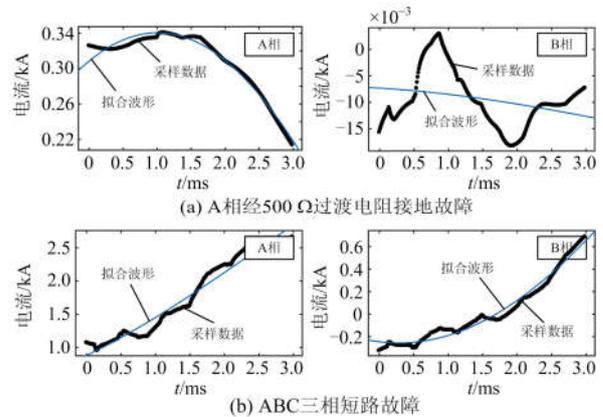


图 12 不同类型非雷击故障下主波拟合

Fig. 12 Main wave fitting with different kinds of faults

3.3 雷击干扰

对于线路发生雷击干扰, 考虑 500 kV 线路耐雷水平, 设置雷击杆塔和避雷线的雷电流幅值为

150 kA, 雷绕击导线时为 15 kA。在不同雷击类型及位置下, 计算结果如表 2 所示。

表 2 不同类型雷击干扰下仿真结果
Table 2 Simulation results with different lightning strike disturbance

雷击干扰	雷击距离	判据 J	决定系数 R^2		
			A 相	B 相	C 相
150 kA 雷击	5 km	9.41	0.52	0.39	0.37
雷击杆塔	90 km	18.48	0.34	0.69	0.62
	175 km	25.58	0.53	0.16	0.61
150 kA 雷击	5 km	15.54	0.48	0.34	0.40
雷击杆塔	90 km	17.86	0.40	0.58	0.57
避雷线	175 km	26.80	0.12	0.03	0.02
15 kA 雷击	5 km	0.30	0.25	0.58	0.60
雷击杆塔	90 km	0.32	0.57	0.35	0.41
导线	175 km	0.04	0.38	0.20	0.17

由表 2 可得, 在线路不同位置发生雷击杆塔或雷击避雷线时, 附加地模分量均明显大于线模分量, 判据 J 最小值为 9.41, 能在第一时间准确识别雷击干扰。从图 13 可以看出, 在不同类型的雷击干扰下, 线路附加分量表现为高频振荡变化, 主波含量很低且与 50 Hz 正弦波形的差异度较大。因此, 在不同类型的雷击干扰下, 判据 R^2 均远小于整定值, 不会出现误判。

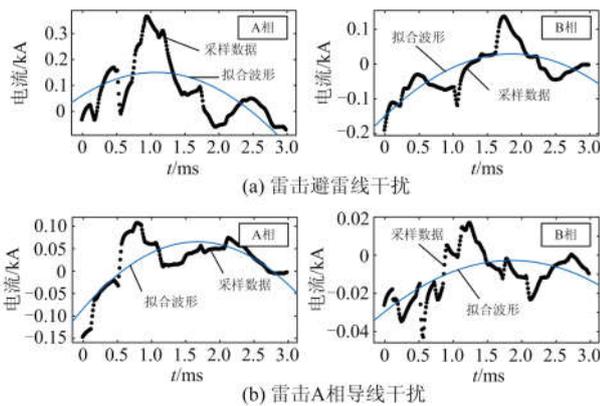


图 13 90 km 处不同类型雷击干扰下主波拟合
Fig. 13 Main wave fitting with different lightning strike disturbance at 90 km

3.4 雷击故障

由大量雷击闪络原因分析可知, 当雷击杆塔或雷绕击导线时, 由于雷电形态、绝缘子污损程度、保护角、接地电阻等不同, 可能发生单相、两相、三相闪络的故障类型。雷击杆塔闪络时雷电流幅值为 250 kA, 雷击导线闪络时雷电流幅值为 25 kA, 计算结果如表 3 所示。

表 3 不同类型雷击故障下仿真结果
Table 3 Simulation results with different lightning strikes causing fault

雷击故障	闪络故障	判据 J	决定系数 R^2		
			A 相	B 相	C 相
250 kA 雷击杆塔	A 相	1.12	0.99	0.65	0.55
	AB 相	0.33	0.99	0.98	0.67
	ABC 相	1.52	0.99	0.99	0.99
25 kA 雷击导线	A 相	0.82	0.98	0.09	0.48
	B 相	0.73	0.34	0.97	0.38

由表 3 可得, 在不同类型雷击闪络故障下, 由于雷电流冲击较为明显, 暂态地模与线模分量的比值出现一定差异, 但均明显小于整定值 J_{set} 。由图 14 可知, 故障相电流经过平均值滑动去噪后, 基本可消除雷电流的高频振荡影响, 使具有 50 Hz 正弦变化的波形特征凸显出来。在不同雷击故障类型下, 判据 R^2 最小值为 0.94, 而非故障相与 50 Hz 正弦规律差异明显。因此, 所提识别方案能准确可靠地识别雷击故障相。

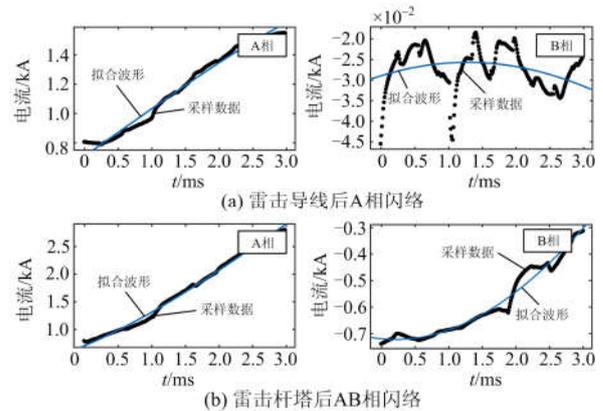


图 14 不同类型雷击故障下主波拟合
Fig. 14 Main wave fitting with different lightning strikes causing fault

4 其他因素影响分析

避雷器、冲击电晕、线路补偿装置以及电流互感器传变特性对本文所提识别判据的影响分析如下:

- 1) 避雷器: 经仿真分析, 避雷器导通时, 仅有幅值较高且波形较陡的部分雷电流流过避雷器。对于雷击干扰 I, 各相线避雷器中的电流变化基本相同, 对地模与线模分量的比值不产生影响。
- 2) 冲击电晕: 暂态行波在线路传播时产生的冲击电晕使雷电波的波头峰值明显降低且波头的时间被延长, 但对波形整体变化趋势无影响。
- 3) 线路补偿装置: 线路补偿装置 UPFC、SSSC 元件的串联侧由于变压器漏抗、桥臂电感等因素在

暂态过程中可等效为电感, 因此仅对雷电波中的高频分量存在抑制作用。

4) 互感器传变特性: 在 10 倍额定电流时, 采用 5TPE 级电子式互感器的复合误差小于 5%, 不具有饱和问题且能准确跟踪信号幅值的突变。

综上所述, 由于所提识别判据中主要是对主波整体波形, 即 3 ms 时窗内低频成分进行分析, 因此不会受到上述因素的影响, 可适用于不同输电线路。

5 结论

针对暂态量保护易受雷击影响的问题, 本文提出了一种基于暂态波形特征的雷击干扰与故障识别方案, 得到以下结论:

1) 通过对暂态电流附加分量分析得: 线路发生雷击或非雷击故障时, 故障相由于故障附加电源影响, 有明显的工频正弦变化趋势; 对于线路故障时的非故障相或者雷击干扰时的各相线, 均呈现沿 0 轴高频振荡的变化趋势。

2) 采用平均值滑动去噪的方法可较好地提取暂态波形整体变化趋势。利用 50 Hz 正弦函数对主波波形进行拟合, 并根据拟合决定系数判据可有效识别各相线雷击干扰与故障。识别判据简单可靠, 具有一定理论依据。

3) 该方案可准确识别不同类型下的雷击干扰与故障, 不受故障初始角、过渡电阻、线路补偿装置等影响, 具有较高的灵敏度和可靠性。适用于不同类型的输电线路, 具有较好的实际应用前景。

参考文献

- [1] FADHEL A A, TARLOCHAN S S, RAJIV K V. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2116-2125.
- [2] 李仲青, 曹虹, 张和, 等. 500 kV UPFC 对工频变化量方向保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 55-63.
LI Zhongqing, CAO Hong, ZHANG He, et al. Analysis of the impact of 500 kV UPFC on impedance directional protection based on variation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 55-63.
- [3] ZHOU X Y, WANG H F, AGGARWAL R K, et al. Performance evaluation of a distance relay as applied to a transmission system with UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1137-1147.
- [4] 段建东, 张保会, 李鹏, 等. 超高压输电线路新单端暂态量保护元件的实用算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 45-51.
- [5] 刘青, 王增平, 郑振华, 等. 基于信号复杂度的串补线路单端暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 81-88.
LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua, et al. Non-unit transient protection based on signal complexity for series compensated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 81-88.
- [6] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 7-13.
DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 7-13.
- [7] 赵军, 吕艳萍, 王汉广. 基于多尺度形态分解的特高压线路雷击干扰识别新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 994-998.
ZHAO Jun, LÜ Yanping, WANG Hanguang. New scheme to identify lightning disturbance for the UHV transmission lines based on multi-scale morphology decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 994-998.
- [8] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 143-148.
WANG Gang, LI Haifeng, ZHAO Jiancang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 143-148.
- [9] 高艳丰, 黄晓胤, 闫红艳, 等. 输电线路雷击故障的综合识别研究[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 93-98.
GAO Yanfeng, HUANG Xiaoyin, YAN Hongyan, et al. Study on synthetic identification of lightning fault of power transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 93-98.
- [10] 罗日成, 李稳, 陆毅, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的 1000 kV 输电线路雷电绕击与反击识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 232-239.
LUO Richeng, LI Wen, LU Yi, et al. Identification method of shielding failure and back striking over-voltage of 1 000 kV transmission line based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 232-239.
- [11] 李晓斌, 赵东阳, 钟光强, 等. 基于小波能量谱的输电线路雷击故障识别方法研究[J]. 电测与仪表, 2014,

- 51(12): 34-39.
LI Xiaobin, ZHAO Dongyang, ZHONG Guangqiang, et al. Identification method of lightning fault for transmission lines based on wavelet energy spectrum[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(12): 34-39.
- [12] 哈恒旭, 张保会. 输电线路边界保护中雷电冲击与故障的识别[J]. *继电器*, 2003, 31(4): 1-5.
HA Hengxu, ZHANG Baohui. The study on identification of fault and lightning strokes in boundary protection for EHV transmission lines[J]. *Relay*, 2003, 31(4): 1-5.
- [13] 陈旭, 朱永利, 赵雪松, 等. 基于时频域的雷电扰动识别方法[J]. *高压电器*, 2017, 53(1): 90-95.
CHEN Xu, ZHU Yongli, ZHAO Xuesong, et al. Identification of lightning strikes based on time-frequency joint analysis[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(1): 90-95.
- [14] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(9): 75-79.
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. Effect of lightning on protection based on travelling waves[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(9): 75-79.
- [15] 段建东, 张保会, 郝治国, 等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(18): 30-35.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Identification of lightning and fault in EHV transmission line transient-based protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(18): 30-35.
- [16] 代杰杰, 刘亚东, 姜文娟, 等. 基于雷电行波时域特征的输电线路雷击类型辨识方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(6): 242-250.
DAI Jiejie, LIU Yadong, JIANG Wenjuan, et al. Identification of back striking and shielding failure on transmission line based on time domain characteristics of traveling wave[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(6): 242-250.
- [17] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(3): 1-12.
SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(3): 1-12.
- [18] 李海锋, 王钢, 赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特征分析及其识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 119-124.
LI Haifeng, WANG Gang, ZHAO Jiancang. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by indirect lightning stroke[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(3): 119-124.
- [19] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(7): 64-69.
SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(7): 64-69.
- [20] 吕艳萍, 刘亚东. 应用数学形态学方法分析识别特高压线路雷击干扰[J]. *高电压技术*, 2010, 36(12): 2948-2953.
LÜ Yanping, LIU Yadong. New scheme to identify lightning interference for UHV transmission lines using mathematical morphology[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(12): 2948-2953.
- [21] 邹贵彬, 高厚磊, 朱峰, 等. 输电线路雷击与故障的积分识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(9): 43-48.
ZOU Guibin, GAO Houlei, ZHU Feng, et al. Integral identification method of lightning stroke and fault for transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(9): 43-48.
- [22] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷击暂态识别[J]. *电网技术*, 2013, 37(11): 3007-3014.
LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Transient identification of lightning strokes on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(11): 3007-3014.
- [23] 顾垚彬, 宋国兵, 郭安祥, 等. 针对直流线路行波保护的雷击识别方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.
GU Yaobin, SONG Guobing, GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line traveling-wave protection of HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-07-30

作者简介:

吕哲(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态量保护; E-mail: lvzhee@126.com

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护。E-mail: wangzpl103@sina.com

(编辑 张爱琴)