

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200521

适用于带中段并联电抗器的电缆线路的参数识别 纵联保护新原理

郭冰¹, 祝磊², 陈一惊³, 宋国兵¹, 侯俊杰¹, 薛健¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 国网陕西省电力公司, 陕西 西安 710048;
3. 国网陕西省电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对中段并联电抗器的电缆线路, 提出了一种基于参数识别的纵联保护新方法。保护原理利用了故障分量网络, 选取并联电抗器安装处作为参考点。根据贝瑞隆分布参数模型, 分别将线路两侧电压和电流归算得到参考点处的电压和电流, 并将两者的比值作为该侧特征阻抗。定义特征参数为两侧特征阻抗的并联值。区外故障对应的特征参数识别结果为并联电抗器的电抗值, 极性为正; 区内故障对应的特征参数的识别结果为参考点背侧总阻抗并联值, 极性为负。综上可根据区内外故障下特征参数识别结果的差异性构造保护判据。经过理论分析和仿真验证可知, 保护原理易于整定计算, 具有较高的灵敏度, 同时具备较强的抗过渡电阻能力, 对采样率的要求不高, 具有较高的可靠性。

关键词: 电缆线路; 并联电抗器; 纵联保护; 贝瑞隆模型; 参数识别

Novel pilot protection principle based on parameter identification for a transmission line with a shunt reactor in the middle

GUO Bing¹, ZHU Lei², CHEN Yicong³, SONG Guobing¹, HOU Junjie¹, XUE Jian¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: A novel pilot protection method based on parameter identification for cable lines with shunt reactor in the middle is proposed. The fault component network is used for fault analysis. The installation site of the shunt reactor is selected as the set point. Then, based on the distributed Bergeron model of the cables, the voltage and current at the set point can be calculated using the voltages and currents at two ends of the cable. The ratio of the voltage and the current is defined as the characteristic impedance of the corresponding terminal. The equivalent parallel impedance for characteristic impedances of both terminals is defined as the characteristic parameter, which can be obtained using the proposed parameter identification method. When an external fault occurs, the identification result is the impedance of the shunt reactor, whose polarity is positive. When an internal fault occurs, the identification result is the parallel impedance of the systems behind at both terminals, whose polarity is negative. Therefore, the protection criterion can be constructed based on the polarity of the identified parameters. Theoretical analysis and simulation results prove that the proposed protection method is robust to fault impedance and does not require a high sampling rate. The proposed principle has high sensitivity and reliability.

This work is supported by the Key Project of Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. U1766209).

Key words: cable; shunt reactor; pilot protection; Bergeron model; parameter identification

0 引言

随着经济的发展, 城市电力负荷日益增长, 对

供电可靠性的要求逐步提高, 为节省城市土地资源、改善市容市貌等需求, 电力电缆在城市电网中占据越来越重要的位置^[1-8]。部分城市进行了电缆改造工程, 例如北京 500 kV 电缆工程^[9]和珠澳电网 220 kV 电缆工程^[10]。

与架空线路相比, 超高压电缆线路的分布参数

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目资助 (U1766209)

效应明显, 电容电流很大, 为补偿电路的对地电容电流, 通常在线路中装设并联电抗器。此外, 并联电抗器还具有平衡无功功率、改善电压分布、限制系统过电压和加速潜供电弧熄灭等功能。线路并联电抗器一般安装于线路中点^[11-12]或线路端点^[13-14], 其中安装至线路中点时能更加有效地抑制过电压^[12], 文中以线路中点情况展开分析。

电流差动保护原理简单, 具有较高的选择性, 能够适用各种故障和非正常运行状态, 在工程上获得了广泛应用。但在超高压电缆线路中, 分布电容电流的影响不容忽视, 降低了电流差动保护的灵敏度和可靠性。虽然并联电抗器一般采取欠补偿方式, 能够减少部分分布电容电流对差动保护的影响, 但并联电抗器为低频分量和衰减直流分量提供了通路, 有可能造成保护误动^[13-15]。

针对上述问题, 有学者对于含并联电抗器的电容电流补偿算法展开研究, 主要包括相量补偿法和时域补偿法。文献[16-17]利用电压相量和线路导纳计算出电容电流相量进行补偿, 具有良好的稳态补偿效果。文献[18-19]研究了利用 Π 型等效电路在时域中补偿电容电流的方法, 在暂态过程中也可有效补偿电容电流。文献[20]从行波传播的角度提出了基于电流行波的新型分布电容电流时域补偿算法。上述研究多基于架空线路, 对于电缆线路来说, 分布电容电流效应更加显著, 电容电流补偿难以进行精确补偿。

为此有学者提出了适用于带并联电抗器线路保护的新原理。贝瑞隆模型反映波传播过程, 是一种比较精确的线路模型, 文献[11]提出了在线路中间含有电抗器的线路上应用贝瑞隆模型方程的差动保护原理, 能够在较大程度上消除分布电容电流影响, 但仍需整定制动系数。文献[21-22]分析了传统行波差动保护在含并联电抗器线路中的适用性, 并分别提出了适用于含并联电抗器线路的行波差动保护新原理。文献[14]基于针对线路两端带并联电抗器的线路, 提出了基于参数识别的纵联保护原理, 易于整定, 灵敏度高, 但其利用了补偿后的差动电流, 在原理上仍依赖于电容电流补偿。

综上, 文中结合贝瑞隆模型与参数识别原理的优势, 提出了一种纵联保护新原理。保护原理利用故障分量网络, 选取并联电抗器安装处为参考点, 根据贝瑞隆分布参数模型, 分别将线路两侧的电压和电流归算至参考点处, 并将电压与电流的比值作为该侧特征阻抗, 定义特征参数为两侧特征阻抗的并联值。区外故障对应的特征参数识别结果为并联电抗器的电抗值, 极性为正; 区内故障对应的特征

参数的识别结果为参考点背侧总阻抗并联值, 极性为负。根据区内外故障对应特征参数识别结果的差异性构造保护判据。经过理论分析和仿真验证可知, 保护原理易于整定计算, 具有较高的灵敏度, 同时具备较强的抗过渡电阻能力, 对采样率的要求不高, 具有较高的可靠性。

1 区内外故障时的特征参数分析

1.1 特征参数定义

对于中段安装并联电抗器的超高压电缆线路, 如图 1 所示, 并联电抗器两侧的线路均采用贝瑞隆模型等值, 选取线路中段并联电抗器安装处 K 点为参考点, 则可以根据 M 侧或 N 侧的电压和电流推算 K 点的电压和电流。

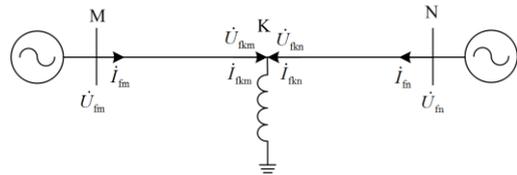


图 1 中间带并联电抗器线路的贝瑞隆模型示意图

Fig. 1 Bergeron model of transmission line with shunt reactor in the middle segment

电力系统发生故障之后, 根据叠加原理, 可等效为非故障状态与故障附加状态。若在计算过程中 M 侧和 N 侧电气量采用故障分量, 则可以得到 K 点电压和电流的故障分量。图 1 中, \dot{U}_{fkm} 和 \dot{I}_{fkm} 分别表示由 M 侧电压 \dot{U}_{fm} 和电流 \dot{I}_{fm} 计算得到的 K 点电压和电流, \dot{U}_{fkn} 和 \dot{I}_{fkn} 分别表示由 N 侧电压 \dot{U}_{fn} 和电流 \dot{I}_{fn} 计算得到的 K 点电压和电流。

定义 M、N 侧的特征阻抗为

$$Z_{km} = \frac{\dot{U}_{fkm}}{\dot{I}_{fkm}} \quad Z_{kn} = \frac{\dot{U}_{fkn}}{\dot{I}_{fkn}} \quad (1)$$

定义待识别特征参数 Z 为

$$Z = \frac{Z_{km} Z_{kn}}{Z_{km} + Z_{kn}} \quad (2)$$

当发生线路区外故障时, 由贝瑞隆等值电路计算得到的 K 点电压和电流严格满足沿线电压、电流分布特征; 当发生线路区内故障时, 破坏了沿线电压、电流分布规律, 计算得到的 K 点电压和电流与真实值具有一定差异。区内外故障时的 Z 值具有显著差异性。

1.2 区内故障

以区内 MK 段线路某处发生故障为例, 故障分量网络如图 2 所示。图中 \dot{U}_f 表示故障点的故障电

压, Z_m 和 Z_n 分别表示 M 侧和 N 侧的系统阻抗。

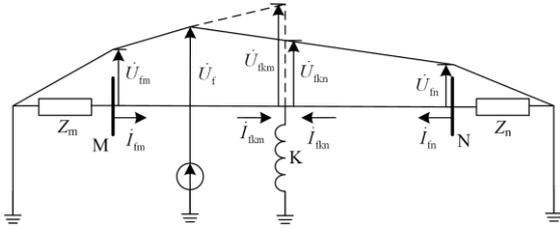


图 2 区内故障下故障分量网络

Fig. 2 Fault component network of internal fault

对于故障分量网络, 故障点处故障分量电压最高, 由故障点向两侧故障电压逐渐降低, 故障电流由故障点流向线路两侧。

对于 N 端系统, 故障点之前故障分量电压、电流仍满足沿线分布规律。故由 N 侧电压 \dot{U}_{fn} 和电流 \dot{i}_{fn} 计算得到的 K 点电压和电流 \dot{U}_{fkn} 和 \dot{i}_{fkn} 接近实际值, 根据图 2 可知

$$Z_{kn} = \frac{\dot{U}_{fkn}}{\dot{i}_{fkn}} = -(Z_{L-kn} + Z_n) \quad (3)$$

式中, Z_{L-kn} 表示 KN 段线路的阻抗。

线路 KM 段存在故障点, 因此由 M 侧电气量计算得到的结果不再是 K 点的真实电压和电流。根据图 2 可知, 计算得到的 K 点电流 \dot{i}_{fkm} 与线路首端故障电流 \dot{i}_{fm} 流向一致, 而计算得到的 K 点故障电压 \dot{U}_{fkm} 较故障点电压偏大, Z_{km} 可表示为

$$Z_{km} = \frac{\dot{U}_{fkm}}{\dot{i}_{fkm}} = -(Z_{L-km} + Z_m) \quad (4)$$

式中, Z_{L-km} 表示 KM 段线路的阻抗。

将式(3)、式(4)代入式(2)可得

$$Z = -\frac{(Z_{L-km} + Z_m)(Z_{L-kn} + Z_n)}{Z_{L-km} + Z_m + Z_{L-kn} + Z_n} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当发生区内线路故障时, 参数 Z 的识别结果为 K 点 M、N 两侧背侧总阻抗并联值, 且极性为负。

1.3 区外故障

以区外 N 侧系统发生故障为例, 故障分量网络如图 3 所示。

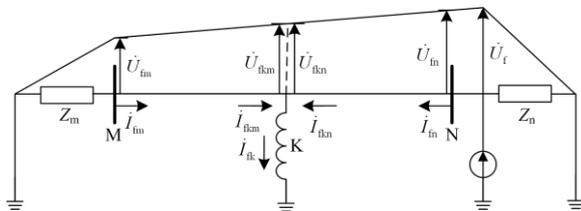


图 3 区外故障下故障分量网络

Fig. 3 Fault component network of external fault

区外故障下, 线路的模型没有被破坏, 故图 3 中, 由贝瑞隆模型计算得到的故障分量电压 \dot{U}_{fkm} 和 \dot{U}_{fkn} 可近似认为与 K 点电压真实值 \dot{U}_{fk} 相等。

$$\dot{U}_{fkm} = \dot{U}_{fkn} = \dot{U}_{fk} \quad (6)$$

计算得到的故障分量电流 \dot{i}_{fkm} 和 \dot{i}_{fkn} 则满足式(7)。

$$\dot{i}_{fkm} + \dot{i}_{fkn} = \dot{i}_{fk} \quad (7)$$

式中, \dot{i}_{fk} 为流过并联电抗器的故障电流。

将式(6)、式(7)代入式(2)、式(1), 待识别参数 Z 可表示为

$$Z = \frac{\dot{U}_{fkm} \dot{U}_{fkn}}{\dot{U}_{fkn} \dot{i}_{fkm} + \dot{U}_{fkm} \dot{i}_{fkn}} = \frac{\dot{U}_{fk}}{\dot{i}_{fk}} = jX_L \quad (8)$$

式中, X_L 表示并联电抗器的电抗。

由式(8)可知, 线路区外故障下, 待识别参数 Z 的识别结果为并联电抗器的阻抗, 且极性为正。

2 保护判据及流程

输电线路的各相之间存在耦合作用, 对输电线路参数矩阵对角化可以将相分量 $u_\varphi(t)$, $i_\varphi(t)$ ($\varphi = a, b, c$) 解耦转化为模分量 $u_j(t)$, $i_j(t)$ ($j = 0, 1, 2$), 其中每一模量均满足贝瑞隆模型, 在计算时将每一模分量电压电流, 由贝瑞隆方程归算至参考点处^[23]。若参考点到线路端点的距离与波速的比值不是采样周期的整数倍, 本文利用线性插值法得到参考点处的电压和电流^[24]。

为计算简便起见, 本文采用克拉克变换矩阵求取模分量, 变换矩阵形式为

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}, S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

考虑由克拉克变换得到的 1 模量能较好地反映接地故障, 而 2 模量能良好反映相间故障^[25], 在由式(1)计算特征阻抗时, 结合 1 模量和 2 模量, 有

$$Z'_{km} = \frac{\dot{U}_{fkm1} + \dot{U}_{fkm2}}{\dot{i}_{fkm1} + \dot{i}_{fkm2}}, Z'_{kn} = \frac{\dot{U}_{fkn1} + \dot{U}_{fkn2}}{\dot{i}_{fkn1} + \dot{i}_{fkn2}} \quad (10)$$

式中: \dot{U}_{fkmj} 和 \dot{i}_{fkmj} 分别表示 \dot{U}_{fkm} 和 \dot{i}_{fkm} 的 j ($j = 1, 2$) 模分量; \dot{U}_{fknj} 和 \dot{i}_{fknj} 分别表示 \dot{U}_{fkn} 和 \dot{i}_{fkn} 的 j ($j = 1, 2$) 模分量。

则特征参数的表达式变为

$$Z' = \frac{Z'_{km} Z'_{kn}}{Z'_{km} + Z'_{kn}} \quad (11)$$

由前文分析可知: 区外故障时特征参数的识别结果为并联电抗器的阻抗, 极性为正; 区内故障时特征参数的识别结果为参考点 K 两侧背侧阻抗的并

联值, 极性为负。根据叠加定理, 结合 1 模量和 2 模量计算得到的特征参数仍然满足上述关系。因此, 可根据特征参数的极性差异构造保护判据。交流系统中电抗远大于电阻, 取 Z' 的虚部构造动作量。保护的判据为

$$\text{Im}(Z') < 0 \quad (12)$$

保护采用相电流突变量启动, 考虑系统正常运行时电流波动小于 0.1 p.u., 当任一相电流连续三个采样点突变超过 0.1 p.u. 时, 保护启动。

保护流程图如图 4 所示。

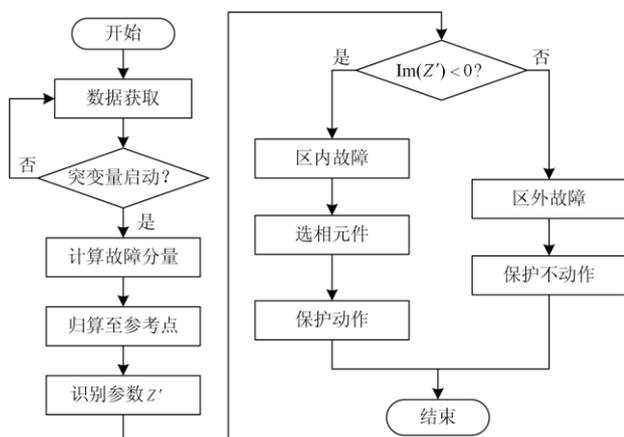


图 4 保护流程图

Fig. 4 Protection flow chart

3 仿真验证

为验证本文提出的基于参数识别的保护原理, 基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台搭建 330 kV 双电源系统模型, 如图 5 所示。线路为电缆线路, 全长 100 km, 仿真采用贝瑞隆模型。并联电抗器安装于线路的中点 K 处。P₁—P₄ 为设定的四个故障点: P₁ 为距离 M 侧母线 10 km 处; P₂ 为线路中点 K; P₃ 为 KN 段线路中点处, P₄ 为 N 侧区外故障。

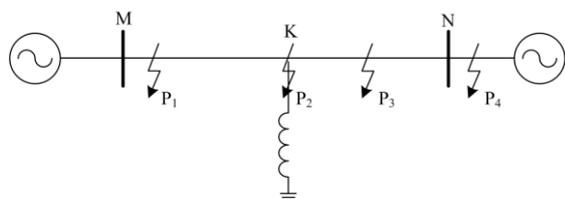


图 5 仿真系统模型

Fig. 5 Diagram of simulated system model

电缆线路参数为

$$Z_1 = 0.02848 + j0.08109 \Omega/\text{km}$$

$$Z_0 = 0.03111 + j0.07448 \Omega/\text{km}$$

$$C_1 = C_0 = 0.208 \mu\text{F}/\text{km}$$

两端系统参数为

$$E_m = 1.05 \angle 0^\circ \quad E_n = 1 \angle -30^\circ$$

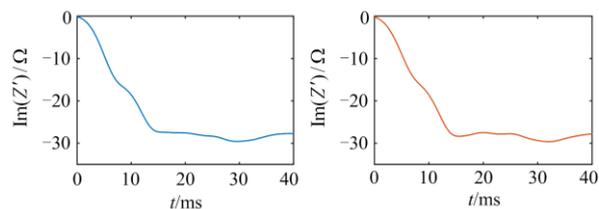
$$X_{m1} = 45.23 \Omega \quad X_{n1} = 43.92 \Omega$$

$$X_{m0} = 30.21 \Omega \quad X_{n0} = 36.12 \Omega$$

电抗器参数为: $X_L = 1572 \Omega$

3.1 保护原理验证

在图 5 所示模型中对本文提出的保护原理进行仿真验证, 采样率为每周波 60 点。以 A 相接地故障和 BC 相间短路故障为例, 故障位置在 P₁ 和 P₄ 时保护动作量的波形如图 6—图 9 所示, 波形为保护启动后两个周波的数据。

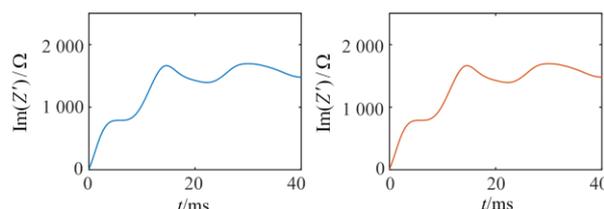


(a) M侧保护动作量

(b) N侧保护动作量

图 6 P₁ 处单相接地故障动作量波形图

Fig. 6 Operation value of single-phase grounding fault at P₁

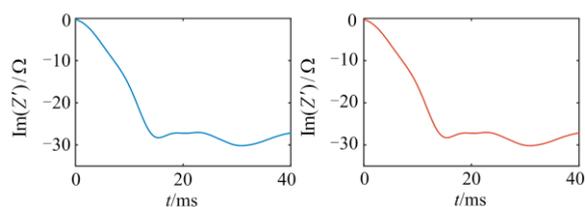


(a) M侧保护动作量

(b) N侧保护动作量

图 7 P₄ 处单相接地故障动作量波形图

Fig. 7 Operation value of single-phase grounding fault at P₄

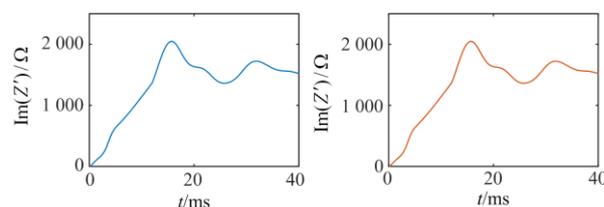


(a) M侧保护动作量

(b) N侧保护动作量

图 8 P₁ 处相间故障动作量波形图

Fig. 8 Operation value of phase-to-phase fault at P₁



(a) M侧保护动作量

(b) N侧保护动作量

图 9 P₄ 处相间故障动作量波形图

Fig. 9 Operation value of phase-to-phase fault at P₄

由图 6—图 9 可见，本文提出的保护原理在故障发生后可靠起动。当发生区内故障时，识别极性为负；当发生区外故障时，识别极性为正。特征参数极性能够可靠区分区内外故障。特征参数识别结果在起动后一个周波内趋于稳定，设定保护起动后一个周波出口。

表 1 列出了在故障点 P₁—P₄ 发生不同类型故障时的保护动作结果，过渡电阻设为 0.01 Ω。由表 1 可见，在不同故障类型下，本文提出的保护判据均能够可靠区分区内和区外故障。

表 1 不同故障类型下仿真结果

Table 1 Simulation results for various fault types

故障点	故障类型	Im(Z')/Ω	极性	动作
P ₁	AG	-28	负	是
	BC	-28		
	BCG	-27		
	ABC	-26		
P ₂	AG	-27	负	是
	BC	-24		
	BCG	-27		
	ABC	-27		
P ₃	AG	-27	负	是
	BC	-25		
	BCG	-26		
	ABC	-27		
P ₄	AG	1 355	正	否
	BC	1 580		
	BCG	1 624		
	ABC	1 683		

3.2 抗过渡电阻性能验证

表 2 列出了在故障点 P₁—P₄ 发生单相过渡电阻接地故障时的保护动作量，表中 R_f 表示过渡电阻，考虑电缆线路过渡电阻一般较小，以 10 Ω、20 Ω 和 50 Ω 为例。

由表 2 可知，在 10 Ω、20 Ω 和 50 Ω 单相接地故障下，保护仍具有高灵敏度和可靠性。本文提出的基于参数识别的保护原理使用故障分量，在原理上不受过渡电阻的影响。

3.3 不同采样率下性能验证

表 3 列出了故障点 P₁ 发生故障时的不同采样率下的仿真结果，以单相接地和相间短路为例，过渡电阻为 0.01 Ω。由表 3 可知，在 2 kHz、3 kHz 和 5 kHz 采样率下，保护原理均具有高灵敏度和可靠性。本文在使用贝瑞隆方程计算的过程中引入了线性插值法，保护结果不依赖于高采样率。

表 2 单相过渡电阻接地故障仿真结果

Table 2 Simulation results for single-phase grounding faults with fault impedance

故障点	故障类型	R _f /Ω	Im(Z')/Ω	极性	动作
P ₁	AG	10	-26	负	是
	AG	20	-23		
	AG	50	-31		
P ₂	AG	10	-32	负	是
	AG	20	-35		
	AG	50	-34		
P ₃	AG	10	-29	负	是
	AG	20	-30		
	AG	50	-36		
P ₄	AG	10	1 237	正	否
	AG	20	1 356		
	AG	50	1 649		

表 3 不同采样率下仿真结果

Table 3 Simulation results with various sampling rates

采样率	故障点	故障类型	Im(Z')/Ω	极性	动作
2 kHz	P ₁	AG	-27	负	是
	P ₁	BC	-28		
	P ₄	AG	1 644		
	P ₄	BC	1 496		
3 kHz	P ₁	AG	-28	负	是
	P ₁	BC	-28		
	P ₄	AG	1 355		
	P ₄	BC	1 580		
5 kHz	P ₁	AG	-28	负	是
	P ₁	BC	-27		
	P ₄	AG	1 601		
	P ₄	BC	1 522		

4 结论

本文针对中段并联电抗器的电缆线路提出了一种基于参数识别原理的纵联保护新方法。该方法采用分布参数模型，利用特征参数的极性判别故障。经过理论分析和仿真结果得到如下结论：

1) 线路区外故障特征参数的识别结果为并联电抗器的电抗，为正极性；区内故障特征参数的识别结果为负的两侧背侧总阻抗并联值，为负极性。保护可靠性和灵敏度高，整定容易。

2) 保护使用故障分量和分布参数模型，不受分布电容电流的影响，具备较强的抗过渡电阻能力，保护原理引入了线性插值法，对采样率的要求不高。

参考文献

[1] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):

- 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [2] 洪浚轩, 何文, 何浩辉, 等. 电缆线路中间接头绝缘缺陷电场仿真与放电小室局放检测研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8): 56-61.
HONG Junxuan, HE Wen, HE Haohui, et al. Research on electric field simulation of insulation defects of cable intermediate joints and detection of partial discharge in discharge chamber[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8): 56-61.
- [3] 付松林, 何光华, 徐骏, 等. 大段长高压电缆护层保护器暂态特性分析与参数优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 32-41.
FU Songlin, HE Guanghua, XU Jun, et al. Transient characteristic analysis and parameter optimization of sheath protector for large-scale high voltage cable[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 32-41.
- [4] 杨亮, 周恺, 倪周, 等. 考虑负荷特性的 XLPE 电缆绝缘老化程度研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 113-119.
YANG Liang, ZHOU Kai, NI Zhou, et al. Analysis of XLPE cable insulation aging considering load characteristics[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 113-119.
- [5] 郑建康, 刘素蓉, 蒲路, 等. 电力电缆带电燃烧的数值模拟技术研究进展[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 105-112.
ZHENG Jiankang, LIU Surong, PU Lu, et al. State of the art of combustion behavior of live power cables[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 105-112.
- [6] 奚若欧, 马志强. 电缆线路对城市配网变电站无功影响分析[J]. 通讯世界, 2018(5): 186-187.
- [7] 赵铁军, 王秀斌, 虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.
ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.
- [8] KHOND S W, DHOMANE G A. Optimum coordination of directional overcurrent relays for combined overhead/cable distribution system with linear programming technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 114-120. DOI: 10.1186/s41601-019-0124-6.
- [9] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable States[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [10] 林桂辉, 朱鹏宇, 王灿, 等. 基于 Carson 理论和 EMTP 的 220 kV 多回电缆线路电气参数及不平衡度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 142-148.
LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Analysis of electrical parameters and unbalanced factors of 220 kV multi-circuit transmission cable based on Carson theory and EMTP simulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 142-148.
- [11] 李斌, 贺家李, 郭征, 等. 线路中间带并联电抗器的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 31-36.
LI Bin, HE Jiali, GUO Zheng, et al. Differential protection in transmission line with shunt reactor installed in the middle segment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 31-36.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 41-44.
SU Bin, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang. Traveling wave differential protection on UHV transmission line with shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 41-44.
- [13] 臧怀泉, 林飞飞, 荣雅君, 等. 带并联电抗器的时域电容电流补偿算法[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3964-3971.
ZANG Huaiquan, LIN Feifei, RONG Yajun, et al. Time domain capacitance compensation algorithm with shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3964-3971.
- [14] 索南加乐, 孙成, 杨斌, 等. 双端带并联电抗器的输电线路纵联保护[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 99-103.
SUONAN Jiale, SUN Cheng, YANG Cheng, et al. Novel pilot protection for transmission line with shunt reactor at double terminal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 99-103.
- [15] 张健康, 粟小华, 胡勇, 等. 大容量可控电抗器对线路差动保护的影响及解决措施[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 115-120.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, HU Yong, et al. Impact of large-capacity controllable shunt reactor on line differential protection and solutions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 115-120.

- [16] 张琦兵, 邰能灵, 袁成, 等. 同塔四回线电流差动保护的电容电流补偿分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 46-50.
ZHANG Qibing, TAI Nengling, YUAN Cheng, et al. Analysis of capacitance current compensation of current differential protection on four-parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 46-50.
- [17] 毕天姝, 于艳莉, 黄少锋, 等. 超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 30-34.
BI Tianshu, YU Yanli, HUANG Shaofeng, et al. Novel accurate compensation method of capacitance current of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [18] 索南加乐, 杨钺, 杨忠礼, 等. 用于同杆双回线保护的时域电容电流的分相补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 77-81.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. Study of time-domain compensation algorithm of capacitive current for parallel transmission line protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 77-81.
- [19] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. II 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on II-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [20] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 适用于特高压线路的差动保护分布电容电流补偿算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 36-40.
SU Bin, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang. Distributed capacitive current compensation algorithm for current differential relay of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 36-40.
- [21] 刘丽花. 带并联电抗器的特(超)高压输电线路继电保护的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
LIU Lihua. Study on relay protection of U(E)HV transmission line with shunt reactor[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [22] 张武军, 何奔腾, 沈冰. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 56-61.
ZHANG Wujun, HE Benteng, SHEN Bing. Traveling wave differential protection on UHV transmission line with shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 56-61.
- [23] 郭征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.
GUO Zheng, HE Jiali. Novel principle of pilot differential relay protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.
- [24] 宋国兵, 刘林林, 索南加乐, 等. 采用插值法的分布参数线路模型的频带研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 72-76.
SONG Guobing, LIU Linlin, SUONAN Jiale, et al. Study on the frequency band for interpolation method used in distributed parameter line model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 72-76.
- [25] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-11-01

作者简介:

郭冰(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: guobingxjtu@qq.com

祝磊(1982—), 男, 高级工程师, 从事继电保护运行管理方面的工作; E-mail: diaolingheye@163.com

陈一惊(1989—), 女, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: chen_yicong@163.com

(编辑 周金梅)