

基于故障点电压实测的线路距离保护新方法

基于长线方程实时计算线路故障点电压,实现线路故障点电压准确测量。故障后沿线电压降落幅值呈现物理分布特性:保护区内故障时,保护安装处到故障点的电压降落幅值小于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值;保护区外故障时,保护安装处到故障点的电压降落幅值大于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值。基于此特性,提出一种线路距离保护新方法。该方法与方向元件配合使用,适用于单相接地故障和相间故障的整个故障过程的I段保护,原则上消除了故障点电压的影响,具有良好的耐高阻和抗负荷电流影响的能力。PSCAD仿真分析和500 kV线路录波数据测试表明,该方法动作性能优于传统距离保护,具有良好的现场实用价值。

曾惠敏/国网福建省电力有限公司检修分公司

0 引言

输电线路即使经杆塔直接接地,在土壤电阻率较低的地区过渡电阻也在10 Ω附近,在电阻率较高的地方过渡电阻可达30 Ω甚至更高^[1-2]。过渡电阻产生的附加阻抗呈阻感性或阻容性,容易造成阻抗距离保护拒动作或超越,从而导致保护误动作或拒动作,会给电力系统安全运行带来重大损失,甚至有可能会威胁到电力系统的稳定性^[3-5]。

文献[6-11]研究表明,采用分布参数建模测量阻抗与故障距离呈双曲正切函数关系,双曲正切函数特性使得过渡电阻对阻抗距离保护的影响更为严重。采用分布参数建模,原则上消除了分布电容电流的影响,提高了距离保护应用在超特高压交流线路时的动作可靠性。但没有实现线路故障点电压的实时准确测量,无法从原理上消除过渡电阻的影响,保护动作特性仍然受高过渡电阻影

响严重。

本文基于分布参数模型实时计算故障点电压,实现线路故障点电压的准确测量,为继电保护各种算法运算新增一个关键的实时信息,为研究新型线路保护及故障测距原理提供支撑。经分析,保护区内故障时,保护安装处到故障点的电压降落幅值小于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值;保护区外故障时,保护安装处到故障点的电压降落幅值大于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值。基于此特性,提出一种输电线路距离保护新方法。

1 基于分布参数模型线路距离保护原理

1.1 基于分布参数模型单相接地故障推导^[12]

ϕ 相接地故障时,m处 ϕ 相电压为

$$U_{m\phi} = U_{m\phi 1} + U_{m\phi 2} + U_{m\phi 0} \\ = \frac{U_{i\phi}}{\cosh(\gamma_1 l_{mf})} + Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf}) [I_{m\phi} + k_i(l_{mf}) I_{m0}] \quad (1)$$

其中,零序电流补偿系数为

$$k_i(l_{mf}) = \frac{Z_{c0} \sinh(\gamma_0 l_{mf}) + Z_{m0} [\cosh(\gamma_0 l_{mf}) - \cosh(\gamma_1 l_{mf})]}{Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_{mf})} - 1 \quad (2)$$

于是, ϕ 相操作电压为

$$U_{op,\phi}(l_{set}) = U_{m\phi} - Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set}) [I_{m\phi} + k_i(l_{set}) I_{m0}] \quad (3)$$

式中, $U_{i\phi}$ 为 ϕ 相接地故障点电压; l_{set} 为保护范围; $\phi = A、B、C$ 相; $\gamma_i、Z_{ci}$ ($i = 1, 2, 0$) 分别为线路正、负、零序传播常数和波阻抗; Z_{m0} 为保护安装处的零序



曾惠敏/工程师

关键词/Keywords

分布参数·
过渡电阻·
距离保护·

系统等效阻抗； $U_{m\phi 1}$ 、 $U_{m\phi 2}$ 、 $U_{m\phi 0}$ 分别为保护安装处故障相正、负、零序电压； l_{mf} 为故障距离。

1.2 基于分布参数模型相间故障推导^[13]

m处 $\phi\phi$ 相间电压为

$$U_{m\phi\phi} = \frac{U_{f\phi\phi}}{\cosh(\gamma_1 l_{mf})} + Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf}) I_{m\phi\phi} \quad (4)$$

由相间故障复合序网可得故障处电流为 $I_{f\phi\phi} = j\sqrt{3}I_{\phi 2}$ ，即满足 $\text{Arg}(U_{f\phi\phi}) = \text{Arg}(jI_{\phi 2})$ 。

于是， $\phi\phi$ 相间操作电压为

$$U_{op,\phi\phi} = U_{m\phi\phi} - Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set}) I_{m\phi\phi} \quad (5)$$

式中， $\phi\phi = AB$ 、 BC 、 CA ，对应 $\varphi = C$ 、 A 、 B 。

1.3 基于分布参数模型故障点电压计算

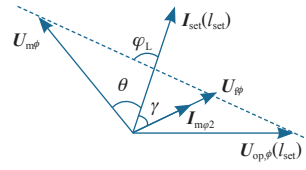
文献[14]采用华北电网输电线路参数仿真分析得出， $I_{f\phi 2}$ 以 $I_{m\phi 2}$ 相位估算的最大估算误差小于 0.35° 。因此，单相接地时，满足 $\text{Arg}(U_{f\phi}) = \text{Arg}(I_{m\phi 2})$ ， $\phi = A$ 、 B 、 C 相；相间故障时，满足 $\text{Arg}(U_{f\phi\phi}) = \text{Arg}(jI_{m\phi 2})$ ， $\phi\phi = AB$ 、 BC 、 CA ，对应 $\varphi = C$ 、 A 、 B 。

考虑 $|\cosh(\gamma_1 l_{mf})| \approx 1$ ， $\text{Arg}[\cosh(\gamma_1 l_{mf})] \approx 0$ ^[15]， $U_{f\phi} \approx U_{f\phi}/[\cosh(\gamma_1 l_{mf})]$ ， $U_{f\phi\phi}/[\cosh(\gamma_1 l_{mf})] \approx U_{f\phi\phi}$ 。单相接地时， l_{mf} 变化， $k_i(l_{set}) \approx k_i(l_{mf})$ ，从而可得 $I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0} \approx I_{m\phi} + k_i(l_{mf})I_{m0}$ ； $U_{m\phi}$ 与 $U_{op,\phi}(l_{set})$ 、 $U_{f\phi}$ 分别相差一固定相量 $Z_{c1} \times \tanh(\gamma_1 l_{set})[I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0}]$ 和 $[I_{m\phi} + k_i(l_{mf})I_{m0}] \times Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf})$ 。区内故障时， $U_{m\phi}$ 超前 $U_{f\phi}$ 、 $U_{f\phi}$ 超前 $U_{op,\phi}(l_{set})$ ；区外故障时， $U_{m\phi}$ 超前 $U_{op,\phi}(l_{set})$ 、 $U_{op,\phi}(l_{set})$ 超前 $U_{f\phi}$ 。 $\text{Arg}(U_{f\phi}) = \text{Arg}(I_{m\phi 2})$ 。 $Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})[I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0}]$ 与 $I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0}$ 矢量夹角为 $\text{Arg}[Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})]$ 。于是可得，单相接地时各电气量相对矢量关系如图1所示。

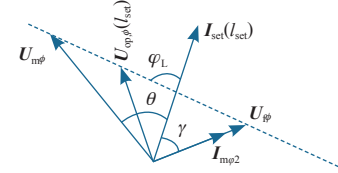
相间故障时，故障点位于保护区内，有 $U_{m\phi\phi}$ 超前 $U_{f\phi\phi}$ 、 $U_{f\phi\phi}$ 超前 $U_{op,\phi\phi}$ ；故障点位于保护区外，有 $U_{m\phi\phi}$ 超前 $U_{op,\phi\phi}$ 、 $U_{op,\phi\phi}$ 超前 $U_{f\phi\phi}$ 。 $\text{Arg}(U_{f\phi\phi}) = \text{Arg}(jI_{m\phi 2})$ 。 $I_{m\phi\phi}$ 与 $Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})I_{m\phi\phi}$ 矢量夹角为 $\text{Arg}[Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})]$ 。于是可得， $\phi\phi$ （ $\phi\phi = AB$ 、 BC 、 CA ）相间短路后各电气量相对矢量关系分别如图2所示。

由图1可得，接地故障点电压计算式为

$$U_{f\phi} = \left| \frac{U_{m\phi} \sin(\varphi_L - \theta)}{I_{m\phi 2} \sin(\pi - \varphi_L - \gamma)} \right| I_{m\phi 2} \quad (6)$$

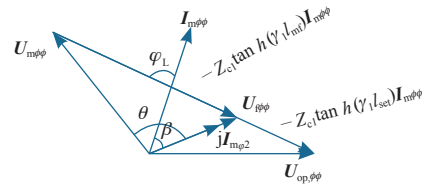


(a) 保护区内故障时各电气量矢量关系

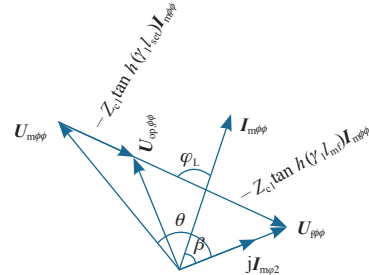


(b) 保护区外故障时各电气量矢量关系

图1 单相接地故障电压电流矢量关系



(a) 保护区内故障电气矢量关系



(b) 保护区外故障电气矢量关系

图2 相间短路故障电压电流矢量关系

式中， $I_{set}(l_{set}) = I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0}$ ； $\phi = A$ 、 B 、 C 相； $\varphi_L = \text{Arg}[Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})]$ ； $\theta = \text{Arg}\{U_{m\phi}/[I_{set}(l_{set})]\}$ ； $\gamma = \text{Arg}[I_{set}(l_{set})/I_{m\phi 2}]$ 。

由图2可得，相间故障点电压计算式为

$$U_{f\phi\phi} = \left| \frac{U_{m\phi\phi} \sin(\varphi_L + \beta - \theta)}{\sin(\varphi_L + \beta)} \right| \exp(j\alpha) \quad (7)$$

式中， $\phi\phi = AB$ 、 BC 、 CA ； φ 为参考相，对应 $\varphi = C$ 、 A 、 B 相； $\theta = \text{Arg}(U_{m\phi\phi}/jI_{m\phi 2})$ ； $\beta = \text{Arg}(I_{m\phi\phi}/jI_{m\phi 2})$ ； $\varphi_L = \text{Arg}[Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})]$ ； $\alpha = \text{Arg}(jI_{m\phi 2})$ 。

1.4 基于分布参数模型输电线路距离保护新判据

线路故障后沿线电压降落情况如图3所示。单相接地故障时，保护区内故障沿线电压降落

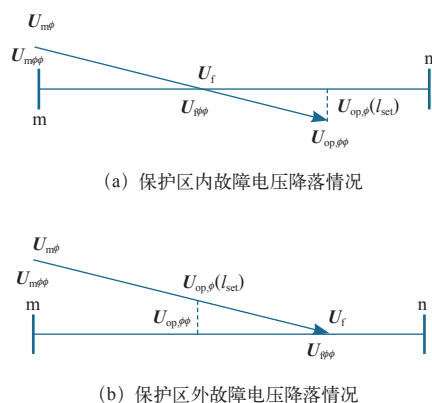


图3 线路故障后沿线电压降落情况

有 $|U_{m\phi} - U_{f\phi}| = |[I_{m\phi} + k_i(l_{mf})I_{m0}] \times [Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf})]|$,
 $|U_{m\phi} - U_{op,\phi}(l_{set})| = |[I_{m\phi} + k_i(l_{set})I_{m0}] \times [Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})]|$,
 因此, 保护区内故障时沿线电压降落满足 $|U_{m\phi} - U_{f\phi}| < |U_{m\phi} - U_{op,\phi}(l_{set})|$; 区外故障沿线电压降落则满足 $|U_{m\phi} - U_{f\phi}| > |U_{m\phi} - U_{op,\phi}(l_{set})|$ 。

相间故障时, 故障点位于保护区内沿线电压降落有 $|U_{m\phi\phi} - U_{f\phi\phi}| = |Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf})I_{m\phi\phi}|$, $|U_{m\phi} - U_{op,\phi}(l_{set})| = |Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{set})I_{m\phi\phi}|$, 即故障点位于保护区内沿线电压降落满足 $|U_{m\phi\phi} - U_{f\phi\phi}| < |U_{m\phi\phi} - U_{op,\phi\phi}|$; 区外故障沿线电压降落则满足 $|U_{m\phi\phi} - U_{f\phi\phi}| > |U_{m\phi\phi} - U_{op,\phi\phi}|$ 。

基于上述分析可得适用于单相接地和相间故障的输电线路距离保护判据分别如下

$$\begin{cases} |U_{m\phi} - U_{f\phi}| < |U_{m\phi} - U_{op,\phi}(l_{set})| \\ |U_{m\phi\phi} - U_{f\phi\phi}| < |U_{m\phi\phi} - U_{op,\phi\phi}| \end{cases} \quad (8)$$

上述距离保护方法适用于单相接地故障和相间故障的整个故障过程的I段保护。当方向元件判别为正方向故障时, 若式(1)和式(2)判据成立, 则判断对应故障点位于保护区内。

2 PSCAD/EMTDC仿真分析

以华北电网500 kV线路参数建立PSCAD/EMTDC测试模型如图4所示。

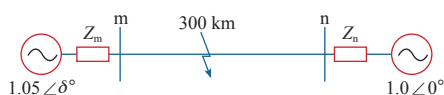
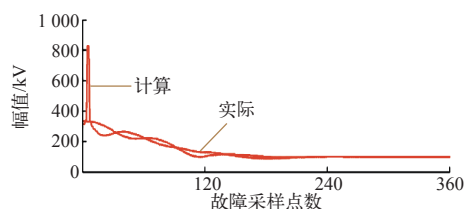


图4 两端供电系统单相测试模型

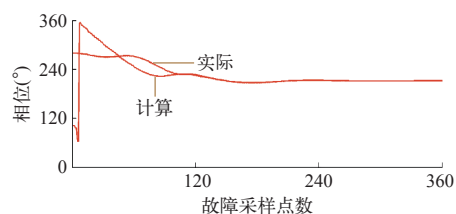
m、n两侧系统参数和输电线路正序、零序参

数见文献[16]。保护整定范围 $l_{set} = 0.85 \times 300 \text{ km} = 255 \text{ km}$; 采样频率6 kHz。

图5a、b分别为 $\delta = 15^\circ$ 时, 距m端120 km处A相经25 Ω 接地后360个采样点内, 120 km处实际接地故障点电压与计算得到120 km处接地故障点电压幅值相位比较曲线。



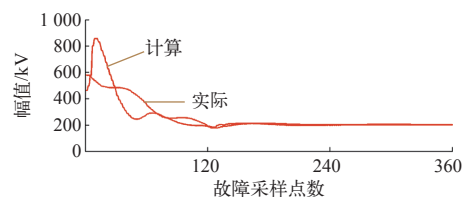
(a) 实际故障点电压与计算故障点电压的幅值比较曲线



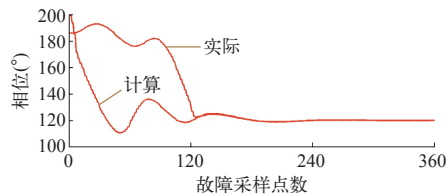
(b) 实际故障点电压与计算故障点电压的相位比较曲线

图5 距m端120 km处A相经25 Ω 接地时实际故障点电压与计算得到接地故障点电压的幅值相位比较曲线

图6a、b分别为 $\delta = 10^\circ$ 时, 距m端150 km处BC相经65 Ω 短路后360个采样点内, 150 km处相间故障点电压与计算得到150 km处相间故障点电压幅值相位比较曲线。



(a) 实际故障点电压与计算故障点电压的幅值比较曲线



(b) 实际故障点电压与计算故障点电压的相位比较曲线

图6 距m端150 km处BC相经65 Ω 短路时实际故障点电压与计算得到相间故障点电压的幅值相位比较曲线

图5、图6中分别在故障后第140、123个采样点开始实际故障点电压与计算得到故障点电压幅

值相位皆吻合，从而验证本文故障点电压计算方法的正确性。

表1为距m端185 km处发生A相经不同过渡电阻接地时新方法计算故障点电压的测量误差情况。由表1可知，线路高阻接地故障时，新方法计算故障点电压不受过渡电阻的影响，具有很高的测量准确度。

表1 距m端185 km处发生A相经不同过渡电阻接地时新方法计算故障点电压的测量误差情况 ($\delta=30^\circ$)

过渡电阻/ Ω	测量故障点电压幅值/kV	实际故障点电压幅值/kV	相对测量误差(%)
50	223.98	225.35	-0.608
150	270.73	268.58	0.800 5
300	290.64	293.97	-1.133

图7为 $\delta=5^\circ$ 时，距m端205 km处A相经300 Ω 接地后180个采样点内沿线电压降落变化情况。由图7可知，近保护整定范围处，无论是轻载高阻接地还是重载高阻接地，沿线电压降落满足判据式(8)，新方法可靠正确动作。

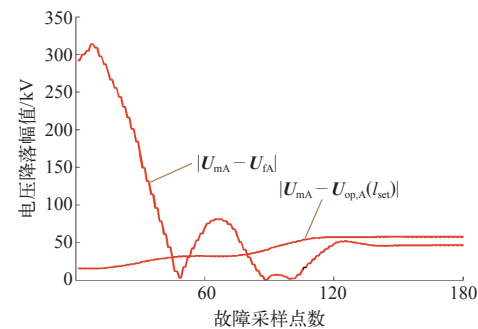


图7 距m端205 km处A相经300 Ω 接地时沿线电压降落幅值变化曲线

表2给出 $\delta=30^\circ$ 时，距m端不同位置发生A相经500 Ω 高电阻接地时的新方法动作情况。表3给出 $\delta=30^\circ$ 时，距m端不同位置发生BC相间经135 Ω 电阻短路时的新方法动作情况。由表2和表3可知，无论是单相高阻接地还是相间高阻短路，故障点位于保护区内时，m端到故障点的电压降落幅值小于m端到保护整定范围处的电压降落幅值，新方法正确动作；故障点位于保护区外时，m端到故障点的电压降落幅值大于m端到保护整定范围处的电压降落幅值，新方法可靠不动作。

表2 不同位置发生A相经500 Ω 接地时新方法保护动作情况 ($\delta=30^\circ$)

故障位置/km	$ U_{mA} - U_{IA} /kV$	$ U_{mA} - U_{op,A}(I_{set}) /kV$	新方法动作情况
45	17.151	85.235	正确动作
67	23.659	82.477	正确动作
83	28.089	80.474	正确动作
128	39.091	74.875	正确动作
153	44.289	71.794	正确动作
179	49.021	68.623	正确动作
191	50.983	67.17	正确动作
210	53.802	64.889	正确动作
220	55.135	63.696	正确动作
235	56.936	61.92	正确动作
245	58.007	60.744	正确动作
265	59.838	58.412	不动作
275	60.596	57.256	不动作
287	61.366	55.878	不动作

表3 不同位置发生BC相间经135 Ω 短路时新方法保护动作情况 ($\delta=30^\circ$)

故障位置/km	$ U_{mBC} - U_{BC} /kV$	$ U_{mBC} - U_{op,BC} /kV$	新方法动作情况
35	45.906	333.41	正确动作
55	68.645	321.05	正确动作
80	94.607	303.43	正确动作
117	128.83	286.85	正确动作
138	146.44	276.5	正确动作
179	177.02	257.95	正确动作
195	188.14	251.19	正确动作
213	199.67	243.93	正确动作
238	214.77	234.28	正确动作
245	218.97	228.68	正确动作
260	227.58	226.26	不动作
275	235.51	221.07	不动作
282	238.92	218.72	不动作
293	243.85	215.07	不动作

3 现场录波数据测试

福建电网与华东电网的联络线为500 kV宁德双线和500 kV德龙线，其中500 kV德龙线全长256.11 km。采用500 kV德龙线A相高阻接地故障录波数据对本文方法动作性能进行测试。

图8为2011年3月份福建电网500 kV德龙线上距500 kV宁德变电站95.9 km处（位于南瑞RCS-931装置II段距离保护区内）A相发生接地短路时500 kV

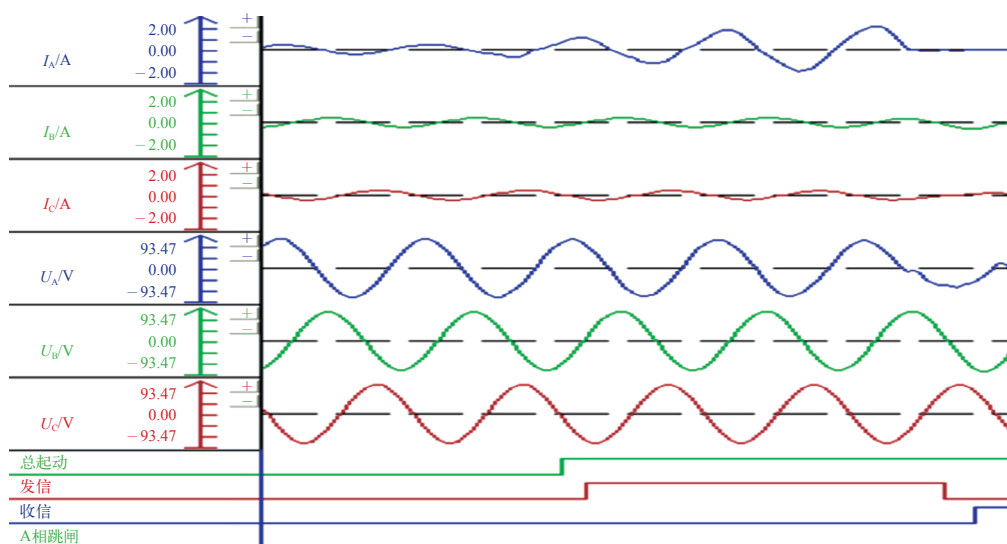


图8 500 kV德龙线A相接地故障录波波形

宁德变电站的故障录波波形。现场南瑞RCS-931装置动作报告：分相电流差动动作，10 ms时RCS-931保护A相跳闸，1 727 ms时RCS-931D保护A/B/C相跳闸，故障相别A相，故障测距326.8 km，没有距离保护动作报文。

图9为500kV德龙线A相高阻接地故障后本文方法测量到的德龙线A相沿线电压降落幅值的变化曲线。由图9可知，500 kV德龙线A相接地故障后第12个采样点开始满足判据式(8)，保护可靠动作于发跳闸信号。此次500 kV德龙线A相高阻接地整个故障过程中，现场南瑞RCS-931装置距离保护一直拒动作，测距结果超出线路全长。因此，故障录波数据测试表明，本文方法具有良好的耐高阻和抗负荷电流影响的能力，动作性能优于传统距离保护。

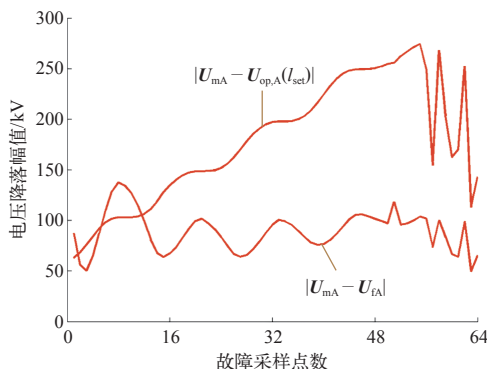


图9 500 kV德龙线A相沿线电压降落幅值变化曲线

4 结束语

基于分布参数模型实时计算线路故障点电压，实现线路故障点电压的准确测量，为继电保护各种算法运算新增一个关键的实时信息，为研究新型线路保护及故障测距原理提供支撑。

通过分析得出，线路故障后沿线电压降落幅值呈分布特性：保护区内故障时，保护安装处到故障点的电压降落幅值小于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值；保护区外故障时，保护安装处到故障点的电压降落幅值大于保护安装处到保护整定范围处的电压降落幅值。基于此特性，提出一种输电线路距离保护新方法。该方法与方向元件配合使用，适用于超/特高压线路单相接地和相间故障的整个故障过程的I段保护，具有良好的耐高阻和抗负荷电流影响的能力。软件分析和500 kV线路现场录波数据测试验证了新方法的正确性和实用性。

参考文献

- [1] 国家电网电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 国家电网电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(下册)[M]. 北京: 中国电力出版

- 社, 2012.
- [3] User's manual of SF-Auto.CSC101 distance protection [S].
- [4] M Eissa. Ground distance relay compensation based on fault resistance calculation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1830-1835.
- [5] Ha Hengxu, Zhang Baohui. Study on reactance relays for single phase to earth fault on EHV transmission lines [C]. 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004: 1-5.
- [6] 贺家李, 李永丽, 郭征, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (23): 1-6.
- [7] Xu Z Y, Huang S F, Ran Li, et al. A distance relay for a 1000-kV UHV transmission line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (3): 1-9.
- [8] 李斌, 贺家李, 常文华, 等. 基于贝瑞隆模型的长线路距离保护 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (23): 52-56.
- [9] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 零序电抗继电器在特高压交流输电线路上的适用性分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (4): 46-50.
- [10] 张洋, 王伟, 樊占峰. 基于虚拟零序电流的双回线接地距离保护原理 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (21): 55-59.
- [11] 夏勇军, 尹项根, 胡刚, 等. 同杆双回线路继电保护原理及工程应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (3): 98-103.
- [12] 马静, 曾惠敏, 林富洪. 一种基于分布参数模型的线路相间距离保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (4): 32-36.
- [13] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7): 264-270, 255.
- [14] 刘青, 王增平, 张媛. 基于改进Hilbert谱分析的STATCOM并补线路保护方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (11): 202-209.
- [15] 汪旻, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 176-179.
- [16] 蒋科, 吕飞鹏, 郭亮, 等. 基于感受阻抗的相间距离保护整定计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 129-133.
- [17] 陈新, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于多代理技术的智能电网继电保护在线整定系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (18): 167-173.

(收稿日期: 2016-12-13) **EA**

(上接第29页)

- [7] 肖小兵, 王宇恩. 基于网络报文数据的电网故障诊断分析 [J]. 华东电力, 2014, 42 (12): 73-75.
- [8] 黄华茂, 张程, 李垂有, 等. 数字化变电站GOOSE链路状态监测方法探讨 [J]. 广东电力, 2014, 27 (12): 76-79.
- [9] 李忠安, 王娇, 张惠刚, 等. IEC 61850过程层网络通信分析诊断工具设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (1): 93-97.
- [10] 曹海欧, 高翔, 杨毅, 等. 基于全模型SCD二次系统在线监测及智能诊断应用分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (14): 136-141.
- [11] 李响, 李彦, 刘革明. 光纤纵联保护通道故障在线诊断方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (2): 147-150.
- [12] 国家电网公司. Q/GDW 11361—2014 智能变电站保护设备在线监视与诊断技术规范 [S].

(收稿日期: 2016-02-10) **EA**