

特高压输电线基于贝瑞隆模型的距离保护

薛士敏, 贺家李, 李永丽

(天津大学自动化学院电力系, 天津 300072)

摘要: 提出了应用贝瑞隆模型实现特高压输电线距离保护的新原理。介绍了应用贝瑞隆模型计算输电线故障的方法, 提出了实现距离保护的原理和保护动作判据, 推导了在各种故障状态下保护的的动作情况, 用 ATP 和 Matlab 仿真证明该原理的正确性。

关键词: 距离保护; 贝瑞隆模型; 特高压输电线

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)19-0001-04

0 引言

根据特高压输电线对继电保护高可靠性的要求, 多段式距离保护仍是这种线路理想的后备保护。其一段可用于实现欠范围直接跳闸式快速保护, 其

二段可用于实现超范围允许式或闭锁式快速距离纵联保护, 其三段、四段可作相邻线路的远后备。这可满足特高压输电线在一套主保护退出检修时仍有两套快速保护的要求。

特高压输电线一般距离很长, 分布电容很大, 输电线故障时的波过程使得故障点的距离不再与该点到保护安装处之间线路的串联阻抗成正比, 这破坏了常规距离保护的理论基础。使得保护精度大大降低, 难以满足特高压输电线的要求。因此研究不受电容电流影响的距离保护新原理有重要的理论和实际意义。

贝瑞隆型是建立在输电线上电磁波传播过程之上的准确模型。用贝瑞隆模型进行故障计算自然地考虑了分布电容的影响, 基于此模型的距离保护自动地计入了分布电容电流, 因此计算结果是准确的。本文提出了利用贝瑞隆模型计算故障距离的新方法, 从而实现了不受分布电容影响的距离保护。

1 输电线贝瑞隆模型简介^[1]

输电线路的各相之间都是有耦合的, 这表现在线路电阻、电容、电感参数 (在超高压和特高压线路上可忽略电导) 矩阵中有非零非对角元素。无论是完全换位的平衡线路还是不平衡线路, 都可以通过一定的转换矩阵使其参数矩阵完全对角化或近似对角化即转化为模分量, 从而形成相互之间没有耦合的模分量。其中线路的每一模分量都满足贝瑞隆模型, 如图 1。图中所示为每一模分量的一相线路。

对于 3 相均匀换位线路来说, 本文采用 Karenbauer 变换矩阵求模分量, 变换矩阵形式如下:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

对于非均匀换位线路不能使用固定的模变换矩阵, 可以根据线路参数在实域或复数域中求解模变换矩阵。对于每一模分量有:

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}; \quad Z = Z_0 + R/4$$

$$h = (Z_0 - \frac{R}{4}) / (Z_0 + \frac{R}{4}); \quad l/v = l \sqrt{L_0 C_0}$$

$$I_{mn}(t-) = -\frac{1-h}{2} \left[\frac{u_n(t-)}{Z} + h i_n(t-) \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{u_n(t-)}{Z} + h i_n(t-) \right] \quad (1)$$

$$I_{mn}(t-) = -\frac{1-h}{2} \left[\frac{u_n(t-)}{Z} + h i_n(t-) \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{u_n(t-)}{Z} + h i_n(t-) \right] \quad (2)$$

以上各式中 L_0 和 C_0 分别是模量上线路每公里电感、电容; R 是模量上线路全长的电阻; Z_0 是无损线波阻抗; Z 是近似考虑线路损耗以后的等值波阻抗; l 是线路长度 (单位 km); v 是模量上的波速; I_{mn} 和 I_{mn} 是等值电流源, 代表从对端来的反射波; t_+ 是模量上波在线路上的传播时间; u_m 和 u_n 分别是模量上线路两侧电压; i_m 和 i_n 分别是模量上线路两侧电流, 其正方向如图 1 中所示。

由图 1 知:

$$i_m(t) = u_m(t)/Z + I_{mn}(t-) \quad (3)$$

$$i_n(t) = u_n(t)/Z + I_{mn}(t-) \quad (4)$$

三相线路对于一种模分量的等效电路中, 设 u_1 、 i_1 和 u_2 、 i_2 分别是两侧电压电流模量, 正方向

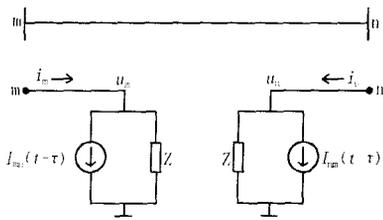


图 1 输电线每一模量上的贝瑞隆等值计算电路

Fig 1 Bergeron equivalent calculating circuit of each mode of transmission lines

如图 1 所示。根据贝瑞隆模型有^[2]：

$$\begin{bmatrix} u_m(t) & i_n(t) \end{bmatrix}^T = T \begin{bmatrix} u_n(t) & i_m(t) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中： $T = \begin{bmatrix} A(l) & B(l) \\ C(l) & D(l) \end{bmatrix}$ 为传输矩阵，其中

$$A = -D = De(\gamma l) [1/2 + R^2 / (32Z_c^2) + R / (4Z_c)] + De(-\gamma l) [1/2 + R^2 / (32Z_c^2) - R / (4Z_c)] - R^2 / (16Z_c^2) \quad (6)$$

$$B = -De(\gamma l) [3R/8 + 3R^2 / (32Z_c) + Z_c/2 + R^3 / (128Z_c^2)] - De(-\gamma l) [3R/8 - 3R^2 / (32Z_c) - Z_c/2 + R^3 / (128Z_c^2)] - R/4 + R^3 / (64Z_c^2) \quad (7)$$

$$C = De(\gamma l) [R / (2Z_c) + R / (8Z_c^2)] + De(-\gamma l) [-R / (2Z_c) + R / (8Z_c^2)] - R / (4Z_c^2) \quad (8)$$

式中： τ 为波从一端传播到另一端所需的时间， $D(\gamma l)$ 定义为延迟因子即 $f(t+\tau) = De(\gamma l) f(t)$ ； Z_c 为线路的波阻抗。

如上所述，贝瑞隆模型是在模量上成立的，所以在实际应用中，需首先将相量转换为模量。以 m 侧保护为例，计算过程为：首先将保护安装处的电压电流 $u_{m\phi}$ 和 $i_{m\phi}$ ($\phi = a, b, c$) 转化为模量 u_m 和 i_m (下标 $i = 0, 1, 2$ 代表各模分量的名称)，转换矩阵为 Karen-

bauer 变换矩阵 $S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$ ，然后代入公式 (1)

可以求出线路上各参考点位置 (设为 k) 电压模量 u_{ki} ，再转换为相量 $u_{k\phi}$ ，然后保护可以对电压用半波傅氏算法进行滤波得 $U_{k\phi}$ 。

2 保护原理

从上面分析可知，用贝瑞隆模型可以根据输电线始端电压和电流计算线路上任一点的电压和电流。如果线路上没有故障，或线路外部有故障，则线路必然满足贝瑞隆模型，计算所得的电压、电流必然均匀变化，如图 2 所示。但如果线路上发生故障，则在故障点贝瑞隆模型被破坏，这点相应的相电压

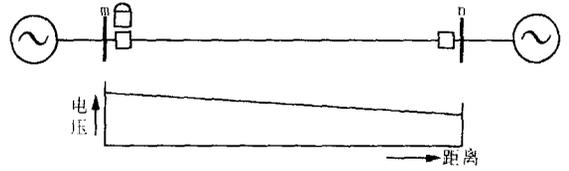


图 2 线路范围内无故障时电压分布

Fig 2 Voltage distribution without any fault on the line

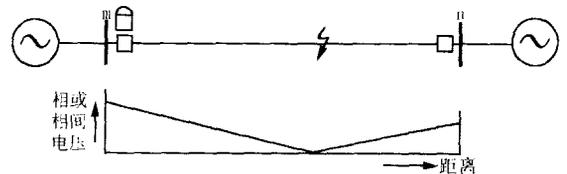


图 3 线路范围内有故障时电压分布

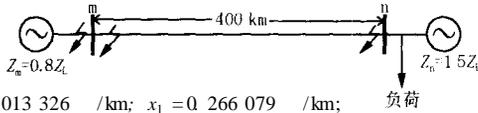
Fig 3 Voltage distribution with fault on the line

(单相接地短路)或相应相间电压(相间短路)必然等于零(无过渡电阻)或最小(有过渡电阻),如图 3 所示。但在故障点与保护安装点之间线路仍然是均匀的,满足贝瑞隆模型,计算所得的电压仍然是均匀变化的,根据这种情况,在线路故障时,保护起动,用选相元件选出故障相,开始对故障相电压或故障相间电压用贝瑞隆模型按一定步长进行计算,得出线路上各点的电压。在三相故障时,只算其中一相电压进行判断就可以(例如用 A 相电压 U_{KA})；单相故障时,我们计算故障相电压；两相故障时,计算故障环相间电压,用相间电压来判断,如 B、C 两相故障时,计算 $|U_{KBC}| = |U_{KB} - U_{KC}|$ 。可知会在故障点处出现最小的电压值,用曲线来表示就是斜率由负变正。即曲线在故障点前先是下降了过了故障点曲线又开始上升。通过程序准确找到电压最小的这一点,并找到这一点距首端的距离,将此距离与保护定值比较,即可确定故障点是否在保护范围内(如一段我们整定为线路全长的 90%)。计算步长可根据线路长度整定,这将直接决定着保护的精度,例如我们可以选择 1 km、5 km、10 km 等。由于采样率受硬件水平的影响,不可能取得太大,贝瑞隆模型在近处保护受到限制,即不能保护近处故障。针对这个问题,可附加一段常规距离保护予以解决。例如:把常规距离保护整定为线路全长的 25%,而把新原理保护范围整定为线路全长的 15% ~ 90%,即可保证可靠反应线路 90% 以内的各种故障。

3 仿真实验

利用电磁暂态仿真程序 ATP 的仿真功能和 Matlab 计算功能相结合对该原理进行了验证。仿真

选用 750 kV 双电源系统,线路全长 400 km,如图 4 所示,线路参数取自某设计中的 750 kV 线路, n 侧电源角度落后于 m 侧 44 度, m 侧和 n 侧电势分别为 1.010 62 和 1.106 9 倍的额定电压, n 侧所带的负荷等效阻抗为 $242.2839 + j34.5235$, 两侧系统传输功率约等于 2 441 MW。



$r_1 = 0.013326 \text{ } \Omega/\text{km}; x_1 = 0.266079 \text{ } \Omega/\text{km};$
 $r_0 = 0.307915 \text{ } \Omega/\text{km}; x_0 = 0.814968 \text{ } \Omega/\text{km};$
 $c_1 = 0.0138776 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}; c_0 = 0.00977857 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$

图 4 系统仿真图

Fig 4 Simulation system

下面给出几种典型内外部故障的仿真结果,采样频率取每周 200 点,计算范围是 30 ~ 360 km,计算步长根据精度要求取 10 km,过渡电阻取 400 Ω 。故障类型考虑了三相故障、两相故障、单相故障和两相接地故障。仿真证明:对以上各种情况保护均可正确动作。由于篇幅有限本文只给出部份仿真结果。仿真数据见表 1,线路电压分布见图 5、6、7、8。由图 5 可见在正常运行时,线路电压曲线沿线路呈下降趋势,没有拐点;由图 6、7、8 可见,线路电压曲线分别在 360 km、360 km、370 km 处出现最低点,两侧电压基本趋势都是上升的,故可精确测得故障点。可知本保护原理在两相故障和两相接地故障时,故障点位置相同时所测结果相同,完全不受对地过渡电阻影响。

表 1 保护发生各种故障时线路上各点相电压或相间电压幅值

Tab 1 Amplitude of phase voltage or phase to phase voltage at many points of transmission lines at various fault

参考点位置 /km	正常运行时 U_A	360 km 处 ABC 三相故障 U_A	360 km 处 A 相接地故障 U_A	在 370 km 处 BC 两相经 400 Ω 过渡电阻故障 $ U_B - U_C $
30	4.4523e+005	2.6571e+005	2.3544e+005	4.5357e+005
40	4.4495e+005	2.5935e+005	2.2805e+005	4.4375e+005
50	4.4471e+005	2.4981e+005	2.2118e+005	4.2035e+005
60	4.445e+005	2.4306e+005	2.1423e+005	4.0998e+005
70	4.4422e+005	2.3016e+005	2.0805e+005	3.9314e+005
80	4.4399e+005	2.2243e+005	2.0127e+005	3.8139e+005
90	4.4378e+005	2.1266e+005	1.9498e+005	3.7051e+005
100	4.435e+005	2.0786e+005	1.8775e+005	3.5707e+005
110	4.4328e+005	2.0421e+005	1.8045e+005	3.4969e+005
120	4.4306e+005	1.9824e+005	1.7335e+005	3.3539e+005
130	4.4279e+005	1.86e+005	1.6621e+005	3.3669e+005
140	4.4258e+005	1.779e+005	1.5916e+005	3.2124e+005
150	4.4235e+005	1.6158e+005	1.522e+005	3.0455e+005
160	4.4209e+005	1.5294e+005	1.4514e+005	2.8349e+005
170	4.4188e+005	1.3718e+005	1.3807e+005	2.7063e+005
180	4.4165e+005	1.29e+005	1.3109e+005	2.5636e+005
190	4.4139e+005	1.161e+005	1.2421e+005	2.6202e+005
200	4.4119e+005	1.0856e+005	1.173e+005	2.4767e+005
210	4.4095e+005	1.0121e+005	1.1063e+005	2.3211e+005
220	4.4071e+005	97563	1.0401e+005	2.0394e+005
230	4.4051e+005	89945	97003	1.913e+005
240	4.4027e+005	86608	89439	1.8957e+005
250	4.4003e+005	78902	82199	1.79e+005
260	4.3985e+005	75659	74054	1.861e+005
270	4.396e+005	67733	66674	1.7203e+005
280	4.3937e+005	64665	57678	1.6121e+005
290	4.392e+005	56277	50139	1.4273e+005
300	4.3895e+005	52807	41228	1.1863e+005
310	4.3873e+005	44010	33913	98906
320	4.3856e+005	38994	26724	81583
330	4.3831e+005	29411	20023	66015

续表 1

参考点位置 /km	正常运行时 U_A	360 km处 ABC三相		在 370 km处 BC两相经 400	
		故障 U_A	故障 U_A	过渡电阻故障 $ U_B - U_C $	
340	4.381e+005	21 865	13 299	48 176	
350	4.3794e+005	11 327	6 588.9	38 103	
360	4.3769e+005	784.23	171.54	11 883	
370	4.3749e+005	10 716	6 863.5	3 056.8	
380	4.3733e+005	23 260	13 722	33 718	
390	4.3709e+005	34 868	20 730	58 487	
400	4.369e+005	45 552	29 175	77 339	

通过仿真可知,该原理具有良好的动作特性。如果计算步长足够小,保护具有极高的精度,通过测得故障点的位置,可准确区分区内、外故障。

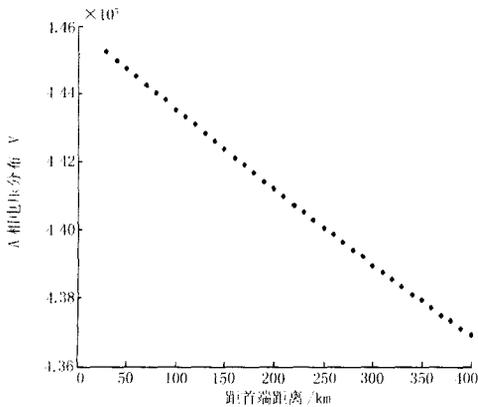


图 5 正常运行时输电线电压分布

Fig 5 Voltage distribution on transmission line without fault

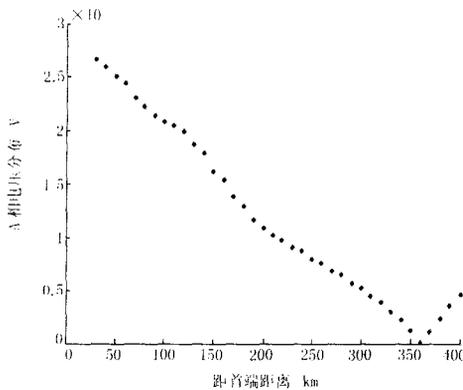


图 6 在 360 km处 ABC三相故障电压分布

Fig 6 Voltage distribution on transmission line with three phase fault(a, b, c) at 360 km from relaying point

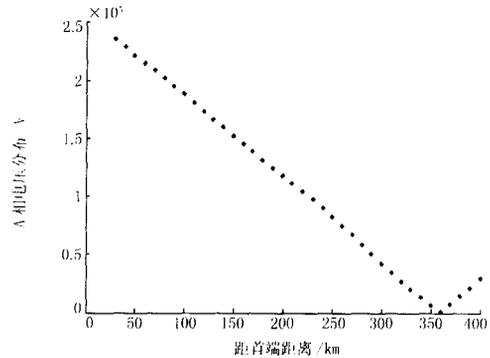


图 7 360 km处 A相接地故障时电压分布

Fig 7 Voltage distribution on transmission line in case of single phase (a) to ground fault at 360 km from relaying point

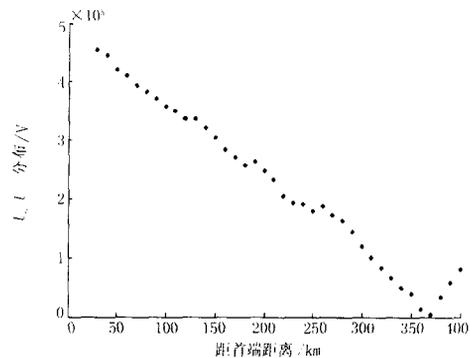


图 8 在 370 km处 BC两相经 400 过渡电阻故障时电压分布

Fig 8 Voltage distribution on transmission line in case of two phases(b, c) to ground fault through transition resistance 400 at 370 km from relaying point

4 结论

1) 本保护原理不受线路分布电容的影响,特别适用于超高压和特高压长距离输电线路作为后备保护;

2) 保护具有很高的精度,随着采样频率的增加和计算步长的增加,保护的精度进一步提高。

3) 和传统距离保护相比,此原理的缺点是计算量较大,对硬件要求较高;受硬件性能的限制,近处故障须利用常规距离保护。

参考文献:

- [1] 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.

(下转第 13页 continued on page 13)

小,功率 $U_0 I_0$ 小,继电器有可能拒动,死区较大。而绝对值比较式零序方向继电器反映的是电压,其本质是电压模值的比较;当匝间短路的匝数很小或内部单相接地点的位置非常靠近中性点时,同样继电器测量的 U_0 小、 I_0 小,但继电器的动作量 $|U_0 - I_0 Z_{L0}| = |I_0 (Z_{S0} + Z_{L0})|$ 大。原因是 I_0 虽小,但 Z_{L0} 很大,致使以电压为量纲的动作量大,而制动电压为零,因而继电器仍可能动作,死区较小,这是本文提出的绝对值比较式零序方向继电器在原理上的本质优点。

采用上述方案的 750 kV 并联电抗器微机保护装置在北京清河国家电力公司电力科学研究院主持的“西北 750 kV 系统电网动模试验”中获得圆满成功,性能优良。

Research and design on 750 kV parallel connection reactor new theories of the turn-to-turn short circuit and single phase earthing protection

GUO Bao-fu¹, ZHANG Jian-guo², ZHAO Ying-bing¹, YAO Qing-lin³

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Ningdong Power Supply Bureau, Ningdong 751001, China; 3. Hefei Technical University, Hefei 230009, China)

Abstract: A new type zero-sequence directional protection based on the comparison of absolute value is presented in the paper. It can protect not only the reactor turn-to-turn short circuit, but also the internal single phase earthing protection. From the point of view of the theory, the sensitivity and reliability of this new type protection are higher than the traditional zero-sequence directional protection or the compensatory zero-sequence directional protection.

Key words: parallel connection reactor; zero-sequence directional relay; turn-to-turn short circuit

(上接第 4 页 continued from page 4)

GUO Zheng, HE Jia-li Novel Principle of Pilot Differential Relay Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.

[2] 郭征. 特高压长线路分相电流差动保护新原理(博士学位论文)[D]. 天津:天津大学, 2004.

GUO Zheng New Principle of Phase Segregated Current Differential Protection for UHV Long Transmission Lines, Doctoral Dissertation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

Distance protection based on Bergeron model for UHV transmission lines

XUE Shi-min, HE Jia-li, LI Yong-li

(School of Electric Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: New principle of distance protection of ultra high voltage (UHV) transmission lines based on a Bergeron model is proposed. Method of calculating transmission line faults by using Bergeron model is presented. A new principle of distance protection and its criterion are advanced. The protection performances at various fault conditions are deduced. Simulation results by ATP and MAT-LAB confirm that the principle is correct.

Key words: distance protection; Bergeron model; UHV transmission lines

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
WANG Wei-jian Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2005-05-20; 修回日期: 2005-08-10

作者简介:

郭宝甫(1973-),男,大学本科,工程师,主要从事继电保护装置研究与开发; E-mail: baofug@xjgc.com

张建国(1968-),男,工程硕士,高级工程师,主要从事继电保护应用工作;

赵应兵(1973-),男,本科,工程师,主要从事继电保护装置研究与开发。

收稿日期: 2005-07-23

作者简介:

薛士敏(1980-),女,博士,主要研究方向电力系统继电保护; E-mail: xsm@tju.edu.cn

贺家李(1925-),男,教授,中国电机工程学会名誉理事, IEEE 高级会员,俄罗斯工程院外籍院士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护;

李永丽(1963-),女,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化。