

工频突变量距离继电器稳态超越的研究

张 廷, 李晓明

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为进一步加深对工频突变量距离继电器动作特性的认识, 利用故障分量法对单端电源输电线路中工频突变量距离继电器的动作特性进行了详细分析。分析表明当输电线路保护区外发生两相短路经小过渡电阻接地故障时, 两故障相中的超前相存在稳态超越现象。同时, 针对以上稳态超越现象, 提出了两种预防措施。

关键词: 工频突变量; 稳态超越; 阻抗继电器; 距离继电器

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)17-0023-05

0 引言

工频突变量距离继电器的发展与应用是近十多年来电力系统继电保护领域的重大进展。工频突变量距离继电器不但继承了传统距离保护不受运行方式变化影响的特点, 同时具有较高的灵敏性、可靠性、自适应性。其耐受过渡电阻的能力强, 方向性明确; 工频突变量判据简单, 特别适用于实现微机保护。因此工频突变量距离继电器在实际应用中取得了良好的效果。但经过分析, 发现在输电线路保护区外发生两相短路经小过渡电阻接地时, 超前相存在稳态超越现象。

1 工频突变量距离继电器动作性能分析

为分析方便, 假设电力系统为单端电源辐射网络。单端电源输电线路发生短路故障时, 把发生短路的系统视为正常运行状态与故障附加状态的叠加, 如图1所示。相应的短路电流、电压为正常运行状态的工频分量和故障附加状态的工频分量的叠加。

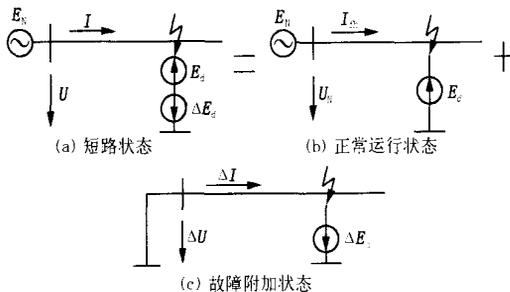


图1 单端电源输电线路短路故障时计算图
Fig. 1 Calculating diagram of short circuit fault in transmission line of single-terminal power supply

其中: E_N 、 E_d 、 E_f 分别为系统电势、正常运行状态故障点电势以及故障点电势变化量; I 、 I_{fh} 、 I_d 分别为故障线路电流、正常运行负荷电流、电流的工频变化量; U 、 U_N 、 U 分别为故障线路电压、正常运行电压、电压的工频变化量。

工频突变量距离继电器反映的是工频变化量的特性, 因此只需在故障附加状态进行相关分析即可。工频突变量距离继电器的动作判据为:

$$|U_{op}| > U_z \quad (1)$$

对接地距离继电器有:

$$U_{op\phi} = U_{\phi} - (I_{\phi} + 3K_L I_0) Z_{zd} \quad (\phi \text{ 表示单相如: a、b、c})$$

其中: Z_{zd} 为线路整定阻抗; U_z 为整定门坎, 取故障前工作电压绝对值的记忆量; U_{op} 为故障状态时保护范围末端电压的整定值; $K_L = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$ 为零序补偿系数; U_{ϕ} 、 I_{ϕ} 、 I_0 分别为相电压、相电流和零序电流。

下面对系统发生区内、区外短路故障时, 工频突变量距离继电器动作判据的动作特性分别进行分析。图2、图4和图3、图5分别为正方向区内、区外发生短路时的故障附加状态计算图和电压分布图, 通过电压分布图, 可以简洁直观地得出动作判据的动作情况。

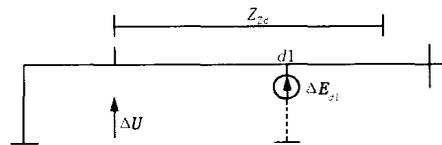


图2 正方向区内故障附加状态计算图
Fig. 2 Calculating diagram of fault subjoined state inside the orientated region

由图3的电压分布可知, 系统在发生正方向区

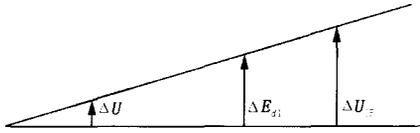


图3 正方向区内故障电压分布图

Fig. 3 Distributing diagram of fault voltage inside the orientated region

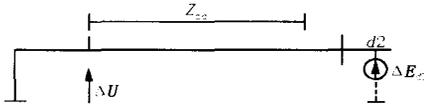


图4 正方向区外故障附加状态计算图

Fig. 4 Calculating diagram of fault subjoined state outside the orientated region

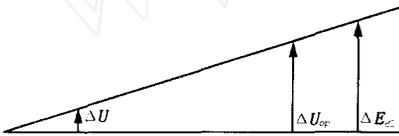


图5 正方向区外故障电压分布图

Fig. 5 Distributing diagram of fault voltage outside the orientated region

内短路故障时,有

$$|U_{op}| > |E_{d1}|$$

满足动作方程(1),保护能够可靠动作。

由图5的电压分布可知,系统发生正方向区外短路故障时,有

$$|U_{op}| < |E_{d2}|$$

不能满足动作方程(1),保护可靠不动作。

2 两相短路经过渡电阻接地分析

以单端电源输电线路发生正方向BC两相短路经过渡电阻接地为例,对工频变化量距离继电器的动作特性进行分析。

2.1 动作特性分析

假设系统正常运行时沿线路各点电压相同,系统阻抗 Z_S 与线路阻抗 Z_L 都为感性阻抗。下面给出单端电源输电线路BC两相短路经过渡电阻接地时故障分量计算图,如图6所示。

其中: E_B 、 E_C 为正常运行时故障点处的电压, E_B 、 E_C 为故障点处电压变化量, I_B 、 I_C 为B、C两相中电流变化量。 Z_F 为保护安装处至短路点之间输电线路的正序阻抗。

由图6可知

$$E_B = - E_B \quad (2)$$

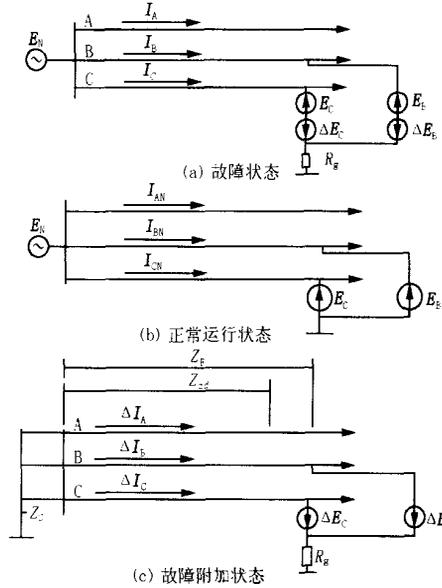


图6 BC两相短路经过渡电阻接地故障分量计算图

Fig. 6 Calculating diagram of fault components of BC two-phase to ground fault through transition resistance

根据式(1)中的定义知对于B相有:

$$U_Z = |E_B| \quad (3)$$

又由图6(c)可知:

$$E_B = - (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} - (I_B + 3 K_L I_0) Z_F - 3 I_0 R_g \quad (4)$$

$$\text{其中: } K_S = \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{3 Z_{S1}}; K_L = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3 Z_{L1}}$$

$$\text{令 } Z_K = Z_F + 3 I_0 R_g / (I_B + 3 K_L I_0) \quad (5)$$

式(4)化简为:

$$E_B = - (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} - (I_B + 3 K_L I_0) Z_K \quad (6)$$

根据式(2)、(3)和(6)得到:

$$U_Z = - (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} - (I_B + 3 K_L I_0) Z_K \quad (7)$$

由式(1)中的定义以及图6得到:

$$U_{op} = - (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} - (I_B + 3 K_L I_0) Z_{Zd} \quad (8)$$

将式(7)、(8)带入式(1)中得到:

$$\begin{aligned} & | (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} + (I_B + 3 K_L I_0) Z_{Zd} | = \\ & | (I_B + 3 K_S I_0) Z_{S1} + (I_B + 3 K_L I_0) Z_K | \end{aligned}$$

为分析问题方便,假设 $K_S = K_L$, 上式化简得到:

$$| Z_S + Z_{Zd} | > | Z_S + Z_K | \quad (9)$$

式(9)在复平面上表现为以 $-Z_S$ 为圆心, $Z_S + Z_{Zd}$ 为半径的圆,如图7所示。显然,当 Z_K 在动作特性圆内时工频突变量距离继电器可靠动作, Z_K 在动作特性圆外时工频突变量距离继电器可靠不动作。对于B相输电线路上的工频突变量距离继电器有

$$Z_K = Z_F + 3 I_0 R_g / (I_B + 3 K_L I_0)$$

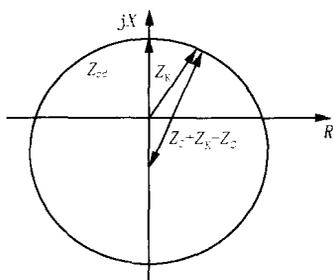


图7 工频突变量距离继电器动作特性圆
Fig.7 Z_K operating characteristic circle of power frequency variation distance relay

上式利用序分量来表示为:

$$Z_K = Z_F + 3 I_0 R_g / (I_1 + I_2 + I_0 + 3 K_L I_0)$$

因为故障前负荷电流为零,因此上式可以等效为:

$$Z_K = Z_F + 3 I_0 R_g / (I_1 + I_2 + I_0 + 3 K_L I_0) \quad (10)$$

当单端电源系统发生两相短路经过渡电阻接地时,其复合序网如图8所示。

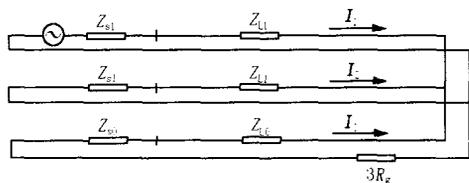


图8 两相短路经过渡电阻接地复合序网图
Fig.8 Diagram of compound components of two-phase to ground fault through transition resistance

由图(8)可知存在以下关系:

$$I_1 = \frac{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{S0} + Z_{L0} + 3 R_g}{Z_{S1} + Z_{L1}} I_0 \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{Z_{S0} + Z_{L0} + 3 R_g}{Z_{S1} + Z_{L1}} I_0 \quad (12)$$

将式(11)和(12)代入式(10)中,并令

$$K_Z = \frac{Z_{S0} + Z_{L0}}{Z_{S1} + Z_{L1}}$$

$$Z_{S1} + Z_{L1} = mj \quad (m > 0):$$

整理后得到:

$$Z_K = Z_F + \frac{m}{1 - \frac{[(\frac{\sqrt{3}}{2} - 3 K_L - 2) + j(-K_Z - \frac{1}{2})] m}{3 R_g}} \quad (13)$$

式(13)中的分式化成

$$P = \frac{1}{1 - w e^j} \quad (14)$$

其中:

$$w = \left| \frac{[(\frac{\sqrt{3}}{2} - 3 K_L - 2) + j(-K_Z - \frac{1}{2})] m}{3 R_g} \right|$$

$$= \arctan \left[(-K_Z - \frac{1}{2}) / (\frac{\sqrt{3}}{2} - 3 K_L - 2) \right]$$

因为 K_Z 可近似认为是实数,由于 $\frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} = 1 + 3 K_L$,

故 K_Z 可取两个极限值 $1 + 3 K_L > K_Z > 0$ 。假设取 $3 K_L = 2.5$,并认为 Z_S 、 Z_L 均为纯电抗。计算式(13)得到: $188^\circ < \angle < 228^\circ$ 因此,将式(13)化成式(14)的形式时,对于阻抗 Z_K 相当于固定,而幅值 w 的变化区间为 $[0, 1]$ 。

根据文献[2]第七章知,对应于取 $[188^\circ; 228^\circ]$ 内一固定值时,由式(14)所表示阻抗 Z_K 的轨迹为一圆弧,如图9所示。

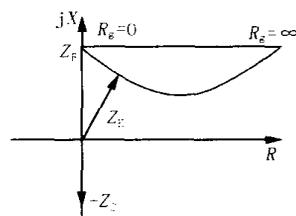


图9 阻抗 Z_K 随过渡电阻变化时的轨迹曲线

Fig.9 Curve of resistance Z_K as transition resistance changes

2.2 工频突变量距离继电器稳态超越现象分析

根据以上结论,下面绘出了输电线路保护范围末端区外发生两相短路经过渡电阻接地时阻抗 Z_K 的轨迹曲线,如图10所示。

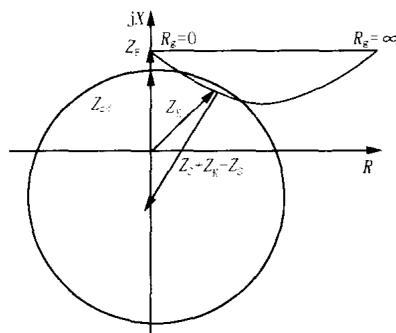


图10 故障点位置在区外变化时阻抗的轨迹

Fig.10 Curve of resistance Z_K as fault locality changes outside the region

由图10可知,当故障点位于图10所示输电线路保护范围末端区外位置时,阻抗 Z_K 的轨迹与动作特性圆有两个交点。当过渡电阻的值落在对应两交点的过渡电阻范围之内时,阻抗 Z_K 将位于动作圆内,保护误动作,工频突变量距离继电器发生稳态超越现象。

由以上分析可知,单端电源输电线路保护范围末端区外发生两相短路经过渡电阻接地时,工频突变量距离继电器是否发生误动现象,取决于故障点的位置与过渡电阻数值的大小。阻抗 Z_K 处于动作特性边界时存在如下关系:

$$|Z_{S1} + Z_{Zd}| = |Z_{S1} + Z_K| \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)中,

由于 $Z_F = Z_{L1}$ 得到:

$$Z_{S1} + Z_F = mj$$

并令 $Z_{S1} + Z_{Zd} = nj \quad (n > 0)$

式(15)化简得到:

$$|mj [(6R_g - 2mK_Z - m) + j(2m + 6mK_L + \sqrt{3}m + 6R_g)]| = |nj [(2m + 6mK_L + \sqrt{3}m + 6R_g) + j(2mK_Z + m)]|$$

$$\begin{aligned} \text{令} \quad 2m + 6mK_L + \sqrt{3}m &= w \\ 2mK_Z + m &= p \end{aligned}$$

化简得到

$$(72m^2 - 36n^2)R_g^2 + [12w(m^2 + n^2) - 12pm^2]R_g + (w^2 + p^2)(m^2 - n^2) = 0 \quad (16)$$

由于假设 $K_S = K_L$, 因此 $Z_{0s}/Z_L = Z_{0s}/Z_S$ 成立, 即 $K_Z = 1 + 3K_L$ 。故障点位于保护范围末端区外时, 为分析问题方便可以近似认为 $m = n$, 将其代入式(16)中得到: $R_g = 0$ 或 $R_g = (1 + 2K_L)m$ 。对应于图 10 阻抗 Z_K 的轨迹曲线, 当过渡电阻 R_g 取 $[0, m + 2K_Lm]$ 内的值时, 阻抗 Z_K 将位于动作特性圆内, 符合式(1)动作判据, 保护动作, 工频突变量距离继电器发生稳态超越现象。

3 C 相输电线路工频突变量距离继电器动作特性分析

单端电源输电线路 C 相的分析过程与 B 相相似。对于 C 相工频突变量距离继电器有

$$Z_K = Z_F + 3I_0 R / (I_C + 3K_L I_0)$$

利用序分量来表示为:

$$Z_K = Z_F + 3I_0 R / (I_1 + I_2 + I_0 + 3K_L I_0) \quad (17)$$

将式(11)和(12)代入式(17)中, 整理后得到

$$Z_K = Z_F - \frac{m}{1 - \frac{I(-\frac{\sqrt{3}}{2} + 3K_L + 2) + j(-K_2 - \frac{1}{2})Im}{3R_g}} \quad (18)$$

将式(18)中的分式化成式(14)的形式时, 仍然取 $3K_L = 2.5$, 化简得到 $312^\circ < \angle < 352^\circ$ 。因此, 对于

C 相输电线路的阻抗 Z_K 同样相当于固定, 而幅值 w 的变化区间为 $[0, I_0]$ 。

根据文献 [2] 中第七章知, 此时对应于取 $\angle [312^\circ; 352^\circ]$ 内某一个固定值, 阻抗 Z_K 的轨迹为一圆弧, 如图 11 所示。

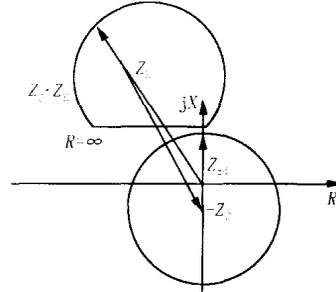


图 11 C 相线路阻抗 Z_K 的轨迹曲线

Fig. 11 Curve of resistance Z_K of phase C transmission line

由图 11 可以看出, 当输电线路保护范围末端区外发生两相短路经过渡电阻接地时, 无论过渡电阻取何值, 阻抗 Z_K 都不会落在动作特性圆内, 工频突变量距离继电器不发生稳态超越现象。

4 预防措施

通过本文以上分析可知, 输电线路发生两相短路经小过渡电阻接地时, 两故障相中超前相的工频突变量距离继电器存在稳态超越现象。为保证保护的可靠动作, 针对于以上超越现象本文提出以下两种预防措施:

- 1) 在两相接地短路故障时采用相间阻抗继电器作用于保护跳闸, 而闭锁单相阻抗继电器;
- 2) 在两相接地短路故障时采用工频突变量接地距离继电器外加电抗特性, 从而实现对其预防的目的。

5 结论

输电线路发生两相短路经小过渡电阻接地时, 工频突变量距离继电器存在稳态超越现象。同时, 两故障相中总是超前相发生稳态超越, 而落后相不超越。

参考文献:

[1] 陈曙玲, 温阳东 (CHEN Shu-ling, WEN Yang-dong). 单电源短距离输电线路微机距离继电器的研究 (Study of the Microcomputer Distance Relay in One-terminal Power Supply and Short Distance Transmission Line) [J]. 继电器 (Relay), 2003, 31(2): 23-26.

[2] 朱声石 (ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技

- 术 (Theory and Technology of Relay Protection of HV Transmission System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press), 1995.
- [3] 沈国荣 (SHEN Guo-rong). 工频变化量距离继电器的研究 (Study of Power Frequency Variation Distance Relay) [A]. 中国电机工程学会第四次继电保护及安全自动装置学术会议 (Proceedings of the 4th Relay and Auto Installation Academic Institute of the CSEE). 1986.
- [4] 戴学安 (DAI Xue-an). 综论工频变化量距离继电器 (Summarization of Power Frequency Variation Distance Relay) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(5): 41-47.
- [5] 刘万顺 (LIU Wan-shun). 电力系统故障分析 (Fault Analysis of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press), 1986.

收稿日期: 2003-12-09; 修回日期: 2004-04-15

作者简介:

张廷 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zt1979.student@sina.com

李晓明 (1956 -), 男, 本科, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、计算机在电力系统中的应用。

Research on steady-state overreach of power frequency variation distance relay

ZHANG Ting, LI Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To penetrate into the characteristics of power frequency variation distance relay, this paper employs fault components to analyse exactly the operating characteristics of power frequency variation distance relay applied in transmission line of single terminal power supply. It shows that there is a steady state overreach with the distance relay in the surpassed phase when two phase short circuit ground fault with small transition resistance occurs outside the orientated region of transmission line. At the same time, two methods to defend the steady state overreach are presented.

Key words: power frequency variation; steady-state overreach; resistance relay; distance relay

(上接第 22 页 continued from page 22)

求解是非凸的, 这给 LMI 的求解带来了一定的困难, 同时也是 LMI 研究的热点, 因此, 低阶控制器的设计是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 田立军, 郭雷, 陈衍 (TIAN Li-jun, GUO Lei, CHEN Yan). H 电力系统稳定器的设计 (Design of H Power System Stabilizer) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 319(3): 59-62.
- [2] Chung C Y, Tse C T, Chui W T. Robust Control Design in AC/DC System [A]. Proceeding of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong: 2000.
- [3] Boyd S P, Elghaoui L, Feron E. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control theory [A]. Studies in Applied Mathematics. Philadelphia: 1994.
- [4] Chilali M, Gahinet P. H_∞-design with Pole Placement Constraints: A LMI Approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 3(3): 358-367.
- [5] Gahinet P, Nemirovski A. LMI Control Toolbox for Use with Matlab [M]. The Mathworks Inc, 1995.
- [6] Werner H, Korba H, Yang T C. Robust Tuning of Power System Stabilizers Using LMI technique [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2003, 1(1): 147-152.

收稿日期: 2003-12-12; 修回日期: 2004-01-17

作者简介:

杨秀 (1972 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 HVDC 的小信号分析与控制; E-mail: yangxiu72@263.net

陈晓 (1938 -), 女, 电力系统及其自动化专业教授, 主要从事电力系统稳定与控制研究;

王西田 (1972 -), 男, 博士, 研究方向为电力系统鲁棒控制。

Robust control design in AC/DC system based on LMI technique

YANG Xiu, CHEN Chen, WANG Xi-tian

(Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Linear Matrix Inequality (LMI) technique provides a new approach for the synthesis of multiojective controller. Based on the LMI for mixed H_2/H_∞ design under pole region constraints, this paper develops a HVDC damping controller for increasing the electromechanical damping. The eigenvalue analysis and simulation show that the controller can provide enough damping in a wide operating condition.

Key words: damping controller; HVDC; LMI