

纵联差动保护动作行为分析

刘力军¹, 常宝波², 张进²

(1. 河北经贸大学信息技术学院, 河北 石家庄 050061;

2. 烟台东方电子信息产业股份有限公司保护部, 山东 烟台 264000)

摘要: 分析了差动保护的制动特性在 I_N/I_M 的复平面上的分布情况, 并利用该坐标系分析了各差动保护的制动判据在通道对称及通道不对称情况下的安全性和灵敏性, 得出故障分量差动保护(包括零、负序差动)抗通道不对称的性能要比相电流差动保护优越这一结论。

关键词: 纵路电流差动保护; 比例制动; 复平面; 通道延时

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)09-0004-05

0 引言

随着光纤数字网络在电力系统中逐步形成, 线路电流差动保护也越来越多地应用到各电压等级的电网中。目前的差动通道有光纤直连通道、复接PCM光纤(或微波)通道、SDH数字同步网, 电流差动保护如何适应各种通道方式以及同一差动保护装置应用到不同的通道方式时, 在设计、整定计算差动保护时需要注意些什么问题, 这些都是保护装置的开发商和电力系统用户都十分关心的问题。其中一个比较突出的问题, 就是在数字同步网络中可能会出现收发时延不相等的情况, 此时线路两端差动保护装置的采样时钟一般是不同步的(除非差动保护用GPS对时), 这样会在系统正常运行时出现比较大的差流, 易造成差动保护误动, 此时差动保护抗通道不对称的性能如何呢?

针对上述情况, 将相电流差动、故障分量差动、零序差动、负序差动保护制动判据转换到各自的 I_N/I_M 复平面上, 分析了各制动判据在忽略电容电流、收发通道时延相等及不相等情况下的制动性能。

1 I_N/I_M 复平面

差动保护的制动方程一般是按下面两式给出的:

$$|I_M + I_N| \geq I_{dz} \quad (1)$$

$$|I_M + I_N| \geq k|I_M - I_N| \quad (2)$$

上面两式对应的函数关系为动作电流标量与制动电流标量之间的关系, 其对应的坐标平面上的任意一点不能表示两侧电流相量的相位和幅值关系, 也不能表示差动保护如何从正常的运行点进入到保护动作区的(距离保护中的阻抗平面具有此功能),

简单地说就是不够直观。为此, 本文利用线路两端电流的复数比 I_N/I_M 来分析差动继电器的动作特性, 具体定义如下:

$$\frac{I_N}{I_M} = a + jb = \left| \frac{I_N}{I_M} \right| \cdot e^{j\theta} \quad (3)$$

式中: I_N 为线路 N 端的电流相量(相电流、或故障分量电流、或序分量电流), I_M 为线路 M 端的电流相量, a 表示 I_N/I_M 的实部, b 表示 I_N/I_M 的虚部, 表示两端电流相量的相位差。

通过上面的定义, 我们就可以将式(2)的比例制动方程转化成 a, b 的函数, 推导如下:

将式(2)两端除以 $|I_M|$ 可得:

$$\left| 1 + \frac{I_N}{I_M} \right| \geq k \left| 1 - \frac{I_N}{I_M} \right| \quad (3)$$

将式(3)用 a, b 来表示可得:

$$|1 + a + jb| \geq k|1 - a - jb| \quad (4)$$

当 $0 < k < 1$ 时, 将式(4)展开可得:

$$a^2 + b^2 + 2\frac{1+k^2}{1-k^2}a + 1 \geq 0 \quad (5)$$

当 $k > 1$ 时, 将式(4)展开可得:

$$a^2 + b^2 + 2\frac{1+k^2}{1-k^2}a + 1 \leq 0 \quad (6)$$

(5)、(6)两式等号部分表示的图形为一圆, 圆半径为 $r = \left| \frac{2k}{1-k^2} \right|$, 圆心位置为 $\left(-\frac{1+k^2}{1-k^2}, 0 \right)$

当 $k = 1$ 时, 由式(4)可得:

$$a \geq 0 \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)对应的 I_N/I_M 复平面分别为图1、图2、图3。

从图1~3可以看出: 当比例制动系数 $k < 1$ 时, 制动区域为包围 $(-1, 0)$ 点的一个圆(系统正常运行时, 线路两端电流大小相等, 方向相反, 即 $I_N/I_M =$

- 1)。当 k 值增大时,制动面积也增大;当 $k = 1$ 时,比例制动判据转变成一个比相判据,可能动作区为复平面的 1、4 象限 ($-90^\circ \sim 90^\circ$);当 $k > 1$ 时,可能动作区为圆内部分, k 越大动作区越小,但在实际整定时, k 值一般是不大于 1 的。

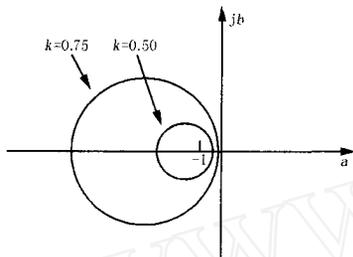


图 1 $k < 1$ 时的制动特性,圆内为制动区域

Fig 1 Differential operating characteristics when $k < 1$

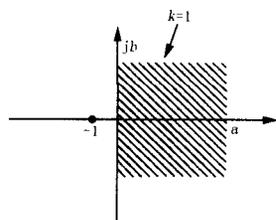


图 2 $k = 1$ 时的制动特性,阴影部分为动作区域

Fig 2 Differential operating characteristics when $k = 1$

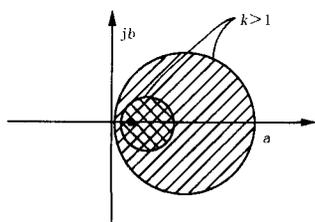


图 3 $k > 1$ 时的制动特性,圆内为动作区域

Fig 3 Differential operating characteristics when $k > 1$

2 各差动保护在复平面上的动作区域

目前,线路电流差动保护广泛应用的判据有分相电流差动保护、零序差动保护、故障分量差动保护、负序电流差动保护。利用各种故障电流构成的差动保护判据在各自的复平面上的动作区域是不一样的,现分析如下。

2.1 分相电流差动

寻找区内故障时在复平面上的故障点区域的关键就是比较线路两侧相电流的相位关系。

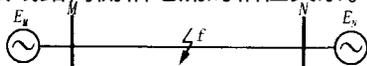


图 4 两端电源线路

Fig 4 Simple power system with double sources

以一两机单相系统为例,来分析区内故障时两侧相电流的相位关系。

其等效电气图如图 5。

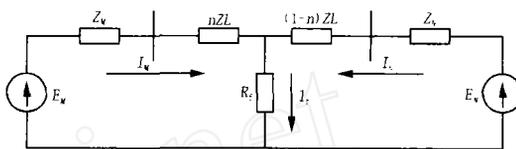


图 5 两端电源线路的故障状态等值电路

Fig 5 Equivalent circuit of two sources when fault

由图 5 可得:

$$E_M = Z_M \cdot I_M + nZL \cdot I_M + R_f \cdot (I_N + I_M) \quad (8)$$

$$E_N = Z_N \cdot I_N + (1-n)ZL \cdot I_N + R_f \cdot (I_N + I_M) \quad (9)$$

由 (8)、(9) 两式可以得出:

$$\frac{I_N}{I_M} = \frac{K_E (Z_M + nZL) + (K_E - 1) R_f}{Z_N + (1-n)ZL + (1 - K_E) R_f} \quad (10)$$

其中: $K_E = E_N / E_M$ 。

如果忽略过渡电阻,则两侧相电流之间的相位差可表达为

$$= \arg \frac{I_N}{I_M} = \arg \frac{E_N}{E_M} + \arg \frac{Z_M + nZL}{Z_N + (1-n)ZL} \quad (11)$$

由上式可知两侧值由两部分组成,一部分为两端电源电势之间的角度,其值一般不会超过 70° ;第二部分为两端网络阻抗之间的角度,其值一般在 10° 左右。因此相电流差动保护在没有过渡电阻或过渡电阻较小时,区内故障时的动作区域一般在复平面的右边,与左边的制动区域泾渭分明,其动作特性很好。

(10)、(11) 两式基本可以用来分析三相系统相电流差动保护的制动特性。在发生区内三相短路故障时,两侧三相电流的相位差只与电源电势角相关,动作特性较好,但在特殊工况下也可能出现拒动,如系统振荡两端电势角度差大于 90° 时发生区内故障,此时差动保护可能拒动,只有两端电势角度差回摆到小于 90° 时差动元件才能动作,上述现象在 RTDS 和动模实验时,已屡见不鲜。

对于不对称短路故障,在过渡电阻较小时,依据对称分量法也可以分析出故障相两端电流之间的角度一般也不会超出 $-80^\circ \sim 80^\circ$ 范围之外。但当过渡电阻较大时,两端相电流的相位差可能大于 90° ;由式 (10) 可以看出,在最极端的情况下,如过渡电阻 R_f 足够大 (如 500 kV 电压等级, 300 Ω 左右的过渡电阻),会出现 $K_E (Z_M + nZL) \ll (K_E - 1) R_f$, $Z_N + (1-n)ZL \ll (1 - K_E) R_f$ 的情况,此时式 (10) 可以表

示为,

$$\frac{I_N}{I_M} = \frac{K_E (Z_M + nZL) + (K_E - 1) R_f}{Z_N + (1 - n) ZL + (1 - K_E) R_f}$$

$$\frac{(K_E - 1) R_f}{(1 - K_E) R_f} = -1 \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出, 两侧相电流相位可能完全反相 (与正常运行情况相似), 此时差动保护将被制动。实验表明, 在重负荷情况下, 过渡电阻可能不到 300 Ω, 相电流差动保护就可能被制动。

当 M 侧为弱馈且零序阻抗很大时, 发生区内高阻接地故障时, 两侧电流相量之间的关系可依据图 6 进行分析。

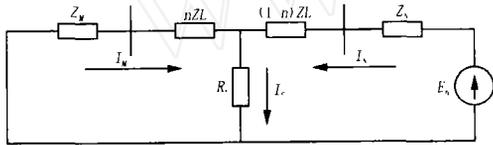


图 6 单端电源线路的故障状态等值电路

Fig 6 Equivalent circuit of single sources when fault

由图 (6) 可得下面的关系式:

$$\frac{I_N}{I_M} = - \left(\frac{nZL + Z_M}{R_f} + 1 \right) \quad (13)$$

由于 M 侧为负荷端, 其电阻分量较大, 当高阻接地时, 两端电流相位比接近 180°, 电流比的幅值大于 1。

同理, 当 N 侧为弱馈且零序阻抗很大时, 可得下面的关系式:

$$\frac{I_N}{I_M} = \frac{1}{- \left(\frac{(1 - n) ZL + Z_N}{R_f} + 1 \right)} \quad (14)$$

式 (14) 电流比的相位接近 180°, 幅值小于 1。

当一端弱馈侧零序阻抗较小时, 单相系统与三相系统的两端电流分配关系差异较大, 弱馈侧零序电流较大, 相电流差动保护能很好地动作。

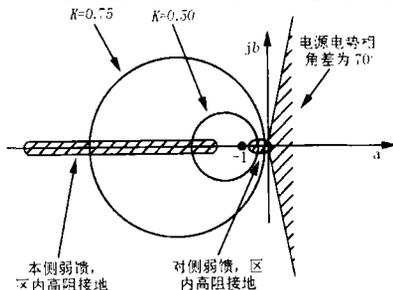


图 7 相电流差动保护的制动和动作区域

Fig 7 Restraint and operating characteristics of phase current differential protection

通过上面的分析我们就可以得出各种情况下线路区内故障时, 两端电流相量比在复平面上的分布情况, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 故障区域为阴影所示部分, (-1, 0) 点附近的区域为正常运行点及区外故障点 (在比例制动的范围之内); 同时也可以看出, 无论 k 值如何选都可能出现区内故障时, 按比例制动原理的相电流差动保护都很难躲开一重负荷区内高阻接地故障的情况, 且区内故障范围受两端电源电势相角差的影响较大。

2.2 分相故障分量差动

图 4 区内故障附加分量电气图为:

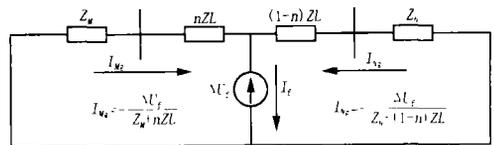


图 8 故障附加状态等值电路

Fig 8 Equivalent circuit of fault component

由图 8 可得下面的关系式:

$$\frac{I_{N_g}}{I_{M_g}} = \frac{Z_M + nZL}{Z_N + (1 - n) ZL} \quad (15)$$

由式 (12) 可以看出, 在线路内部时, 两端故障分量电流之间的角度仅与故障点两侧的等值阻抗的阻抗角有关, 与过渡电阻、哪端是否弱馈、两端电源电势角度差均无关系, 其值在超高压系统中通常不会大于 10°, 中低压系统也不会超过 25°, 而在区外故障时, 图 8 的故障分量电压 U_f 由区内移到区外, 此时线路两端故障分量电流大小相等方向相反 (忽略电容电流), 其运行点在复平面 (-1, 0) 点附近。

故障分量电流相量比在其复平面上的分布情况如图 9 所示:

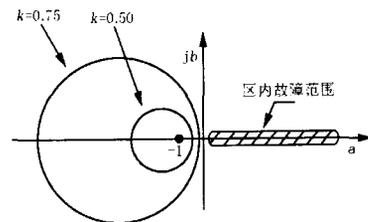


图 9 故障分量差动保护的制动和动作区域

Fig 9 Restraint and operating characteristic of fault components differential protection

从图 9 可以看出, 圆内制动区域与系统实际动作范围界限非常明显, 保护动作的灵敏性非常高, 同时也可以适当地增大制动系数 k 来提高保护的安全

性。

2.3 零(负)序差动

图 4区内故障附加的零(负)序等效电路图如图 10所示。

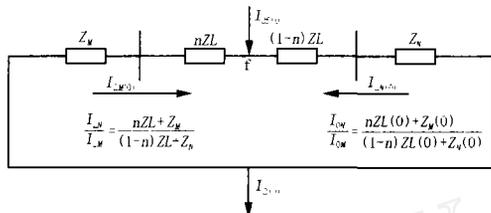


图 10 零(负)序等值电路

Fig 10 Equivalent circuit of zero or negative sequence network

从图 10可以得出与故障分量相似的关系式:

$$\frac{I_{2N}}{I_{2M}} = \frac{nZL + Z_M}{(1-n)ZL + Z_N} \quad (16)$$

$$\frac{I_{0N}}{I_{0M}} = \frac{nZL(0) + Z_M(0)}{(1-n)ZL(0) + Z_N(0)} \quad (17)$$

(16)、(17)两式的动作性能与故障分量差动基本一致,所不同的是零(负)序电流分量在故障切除之前始终存在,而故障分量存在的时间比较短,但分相故障分量差动保护与相电流差动保护一样具有天然的选相能力,而零(负)序电流差动保护不具备选相能力(需配选相元件,进行分相跳闸),同时对三相短路故障无能为力。另外,负序差动保护对于任何不对称故障都能动作,而零序差动只能适应于接地故障。

零(负)序电流差动保护在复平面上的动作特性与故障分量电流差动保护相同,如图 9所示。

3 通道不对称对各差动保护的影响

由于纵联通道的时延造成两端的电流相量不是同一时刻的值,这样就会造成系统正常运行时差流的存在。为了弥补此缺陷,通常用乒乓法来计算通道时延,从而找到对端的电流相量与本端什么时候的电流相量是一致的。乒乓法的前提条件是假设收发通道的时延相等,但纵联通道为数字同步网时,可能会出现收发通道时延不相等的情况,此时通过乒乓法算出来的通道时延就会比较大的误差。例如,收发通道的时延差为 2 ms时,对于 50 Hz的系统来说,两端电流相量的相角差就是 18°。通道的不对称对各差动保护的影响可用下面的公式来表示:

$$\varphi_h = \arg \frac{I_N}{I_M} = \arg \frac{E_N}{E_M} + \arg \frac{Z_M + nZL}{Z_N + (1-n)ZL} + \varphi_h \quad (18)$$

$$\varphi_g = \arg \frac{I_{Ng}}{I_{Mg}} = \arg \frac{Z_M + nZL}{Z_N + (1-n)ZL} + \varphi_h \quad (19)$$

$$\varphi_0 = \arg \frac{I_{0N}}{I_{0M}} = \arg \frac{nZL(0) + Z_M(0)}{(1-n)ZL(0) + Z_N(0)} + \varphi_h \quad (20)$$

$$\varphi_2 = \arg \frac{I_{2N}}{I_{2M}} = \arg \frac{nZL + Z_M}{(1-n)ZL + Z_N} + \varphi_h \quad (21)$$

图 11表明了通道时延的不相等(2 ms)对各差动保护判据的影响程度。

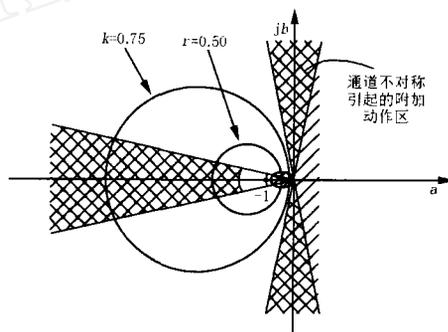


图 11 相电流差动保护在通道不对称情况下的制动和动作区域

Fig 11 Restraint and operating characteristics of phase current differential when channel asymmetry

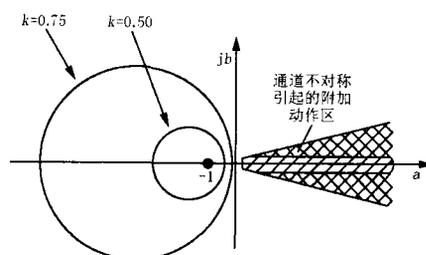


图 12 故障分量(包括零负荷)差动保护在通道不对称情况下的制动和动作区域

Fig 12 Restraint and operating characteristics of fault components differential when channel asymmetry

从图 11可以看出,通道不对称程度越严重,相电流差动保护的区内故障动作区域就越大,线路两端都有电源时的区内故障点就可能偏入制动区域造成保护的拒动,此时希望制动系数 k 减小来抵御通道不对称的影响。但减小 k 会造成区外故障及正常的运行点 $(-1, 0)$ 向制动区域的边界靠近,甚至可能越出制动区域,此时差动保护误动的可能性就增大。实际工程的一般处理方法是增大制动系数 k ,减小相电流差动保护的灵敏性,以获取其安全性。

从图 12可以看出,故障分量差动保护(包括零、负序)在通道不对称以后的动作区域要远小于

相电流差动,但是如果制动系数 k 值整定的较小也可能造成区外故障及系统正常的运行点偏离制动区域内部,造成该差动保护的误动。因此在实际应用时,可以将故障分量的差动保护制动系数整定的比较大,来抵御通道不对称对其动作性能的影响。

4 总结

通过以上分析可以得出以下结论:

1) 用 I_N/I_M 复平面来分析差动保护的動作性能,可以达到其可视化的效果。系统正常运行时,可通过观察正常运行点在制动区域内位置,以评估差动保护的安全性;系统故障时,可描绘系统的运行点是以怎样的运动轨迹从制动区域到动作区域的。

2) 当不考虑纵联通道的不对称性时(即通道是对称的),从 I_N/I_M 复平面上看,相电流差动保护的動作范围受两端电源电势角、一端弱馈的影响比较大,而故障分量的差动保护不受这两方面的因素影响,動作区域与制动区域之间的界限分明。

3) 当通道不对称时,相电流差动保护受其影响最大,特别是制动系数 k 整定的较小时,易造成相电流差动保护的误动;故障分量的差动保护受通道的不对称影响比较小,可以通过适当地放大其制动系

数来抵御其影响,而又不会造成区外故障误动及区内故障拒动。

参考文献:

- [1] Roberts J, Tziouvaras D, Benmouyal G, et al. The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security[A]. Southern African Power System Protection Conference Johannesburg(South Africa): 2000.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 1996.
- GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location: Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2005-10-31; 修回日期: 2005-11-17

作者简介:

刘力军(1968-),女,硕士,讲师,研究方向为电子技术;E-mail: llj1995@163.com

常宝波(1971-),男,硕士,工程师,研究方向为高压继电保护产品开发;

张进(1978-),男,学士,工程师,研究方向为高压继电保护产品开发。

Analysis of pilot differential relay operating characteristic

LIU Li-jun¹, CHANG Bao-bo², ZHANG Jin²

(1. School of Information Technology, Hebei University of Economy & Business, Shijiazhuang 050061, China;

2. Yantai Dongfang Electronics Information Industry Co., Ltd, Yantai 264000, China)

Abstract: This paper plots percentage-differential relay characteristic curves in current-ratio plane and analyses line current differential relay performance during communications channel asymmetry and weak-infeed end of a transmission line. It reaches the conclusion that fault components differential relays are more secure and sensitive than phase current differential relays.

Key words: line current differential protection; percentage-ratio restraint; current-ratio plane; communication channel delay

《继电器》杂志文摘编写要求

根据国际检索的要求,《继电器》杂志对投稿摘要的编写作以下修改说明:

1. 摘要应是一篇独立的短文,应包含与论文同等量的主要信息,主要由三部分组成,即:研究的问题、过程和方法、结果。
2. 摘要中应排除本学科领域已成为常识的内容,切忌把引言中出现的内容写入摘要,一般也不要对论文内容作诠释和评价,尤其是自我评价。
3. 摘要应用第三人称编写,不必使用“本文”“作者”等作主语。应尽量取消或减少背景信息。
4. 摘要应使用规范化的名词术语,不用非公知公用的符号和术语,新术语或尚无合适汉文术语的,可用原文或译出后加括号注明原文。
5. 摘要一般不用数学公式或化学结构式,不出现插图、表格,不用引文。缩略语、略称、代号首次出现时必须加以说明。
6. 中文摘要一般在 200~250 个字之间,英文一般 150 个单词左右,关键词一般应列出 5~8 个。