

线路差动保护的相移制动能力研究

朱国防, 陆于平

(东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Studies on Phase Shift Restraint Capacity of Feeder Current Differential Protection

ZHU Guo-fang, LU Yu-ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Data synchronization is an essential issue in digital feeder current differential protection. Synchronization tolerance leads to time shift and phase shift. A new index that defined the phase shift restraint capacity of the differential protection scheme was proposed. By analyzing the phase shift restraint capacity of traditional differential protections using phasor analysis method, it was found that the phase shift restraint capacity of the triple-bias restraint criteria only reached about 20° , while that of nonlinear restraint criteria might be up to 60° . The paper presented a new phase differential protection, a novel non-linear differential protection criterion, which adopted restraint coefficient to adjust sensitivity of the criterion and used protection action boundary angle to adjust the phase shift restraint capacity. ATP simulation results indicate the new scheme has good sensitivity to inner slight fault, fine ability against current transformers saturation and excellent phase shift restraint capacity.

KEY WORDS: differential protection; data synchronization; phase shift restraint capacity; phasor analysis; non-linear restraint

摘要: 数据同步是基于通信的差动保护方案的首要问题。为从差动保护判据本身找到一个减小同步误差影响的途径, 提出描述差动保护判据耐同步误差能力的相移制动能力指标。采用相量分析法分析常规差动保护的相移制动能力, 发现常规比率制动判据的相移制动能力只能达到 20° 左右, 而非线性差动保护的相移制动能力可以达到 60° 左右, 这对基于软实时通信技术的使用场合非常有价值。提出一种新相差型的差动保护判据, 该判据采用制动系数来调整判据的灵敏度; 采用保护动作边界角来调整判据的相移制动能力, 是一种新型的非线性制动判据。仿真结果表明新判据具有良好的内部故障灵敏度、抗电流互感器(current transformer, CT)饱和能

力和相移制动能力, 是基于软实时通信技术的差动保护的理想选择。

关键词: 差动保护; 数据同步; 相移制动能力; 相量分析法; 非线性制动

0 引言

电流差动保护于 1904 年提出, 迄今为止, 已有百年历史。尽管其实现方式, 特别是制动量的构成有一些差别, 但基本保护原理沿用至今。电流差动保护已经广泛应用于输电线路保护; 基于差动原理的广域保护^[1]也得到国内学者的广泛关注; 差动保护也是分布式发电条件下配电网保护的理想方案之一, 而这些领域的差动保护都是基于数字通信技术。当前, 应用于电力系统的通信技术可以分为硬实时通信、软实时通信和非实时通信^[1]。硬实时通信技术采用硬交换技术, 包含微波、光纤专用通道、同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)等。当前线路纵联差动保护多使用此类通信技术。软实时通信技术采用软交换技术, 包含异步传输模式(asynchronous transfer mode, ATM)、改进了实时性的以太网、改进了实时性的网际协议(internet protocol, IP)网络。从成本、易获得性、拓扑的灵活性等多方面考虑, 基于差动原理的广域保护和分布式发电条件下的配电网线路差动保护采用软实时通信技术是比较现实的, 但基于软实时通信技术的应用场合中, 数据同步问题则更加突出。

目前关于数据同步的同步方法主要分为 3 类: 1) 基于数据通道的同步技术^[2]; 2) 基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的同步技术^[3-4]; 3) 参考相量同步法。基于数据通道的同步技术假设收、发通道延时一致。对于硬实时通信技术, 该假设基本成立, 但若通信路由发生改变则也会发生问题;

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577006).

对于软实时通信技术,该假设则会引起很大的同步误差。GPS 对时也会出现失步或误差增大的情况,所以深入研究同步误差对差动保护的影响意义重大。对于 SDH 复用通道带来数据同步问题^[5],文献[6]提出了通道法和时钟法相结合的解决方案;文献[7]提出了一种基于相关分析的新型电流差动保护,通过被保护线路两端电流相应的瞬时值相乘再积分的方法来比较电流波形的一致性,该方法降低了对信号同步的要求;在电子式互感器应用环境下,文献[8]基于时域连续有限冲激响应滤波器构造连续数字低通滤波器,把离散采样数据恢复成连续信号,重新计算出任意时刻的采样值以完成采样数据站间同步;针对 GPS 短时失步问题,文献[9]提出了自适应比率制动判据的解决方案,然而对于差动保护判据对同步误差的忍耐能力方面还未见系统性的研究成果。为了系统地研究差动保护判据忍耐同步误差的能力,并从判据本身出发开辟出减小同步误差影响的另一个途径,本文提出了差动保护的相移制动能力指标,并采用相量法分析常规比率制动判据、三折线制动判据^[10]、相差保护、双 K 值差动保护^[11]的相移制动能力。分析表明,完全可以找到全范围相移制动能力达到 60° 以上的差动保护判据。这为基于软实时通信技术的差动保护的应用奠定了理论基础,也部分解决了因同步误差引起的线路纵联差动保护的安全性问题。

1 电流差动保护的相量分析方法简介

利用差动保护表达式两侧的量,可以容易地得到差动保护在差动电流-制动电流平面上的动作特性,如图 1(a)所示。这种动作特性描述方式,比较清楚地反映了差动电流和负荷电流的比例关系,对于分析制动特性是比较方便有效的,但工程应用中,继电保护工作者习惯采用两侧电流的幅相关系进行差动特性测试,因此这种忠实于原始判据的描述方法对运行分析来说不够直观,需要经过转换才能观察到两侧电流 I_m 和 I_n 处于什么状态时,才会引起保护误动作或者正确动作。为了能更好地反映差动保护制动原理的运行特性,文献[11]提出的基于 ρ 平面的相量分析法克服上述不足。

为了表述和分析方便,本文在分析两侧电流时,假设分析前已知两侧电流的大小,并将较大的记为 $\dot{I}_m$ (假定流入被保护设备的电流为正方向,下同),较小的记为 $\dot{I}_n$, I_m 和 I_n 分别为其幅值。

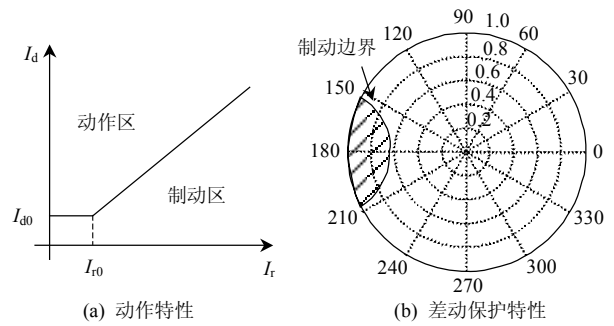


图 1 差动保护动作特性示意图

Fig. 1 Characteristic of differential protection

若以较大电流 $\dot{I}_m$ 作为基准值,令 $\rho = \dot{I}_n / \dot{I}_m$, 则 $|\rho| \leq 1$ 是 $\dot{I}_n$ 相对于 $\dot{I}_m$ 归一化后的相对值。这样两侧电流间的幅相关系可用一个以 $\dot{I}_m$ 为基准值的单位圆来完整表示,即在任意运行工况和故障类型下,两侧电流之间相对的幅相关系均落在此单位圆内,因此对差动保护的动作特性分析就转化为在单位圆内分析差动保护动作边界。运行点落在此单位圆平面上不同区域表征了设备处于不同的运行工况。如:正常运行时两侧电流幅值相等,相位相差 180°,即 $\rho = -1$ 。区外故障由于 CT 误差可能不一致,使得两侧电流幅值不再相等,相对误差可能不一致,使得两侧电流幅值不再相等,相位相差偏离 180°,但只要 CT 饱和程度不太严重,两侧电流幅值和相角误差不是很大,运行点落在单位圆靠近 (-1,0) 的区域;内部故障的运行点位置取决于负荷电流与故障电流之间相对关系。在无负荷或轻负荷的情况下,两侧电流主要是故障电流,内部故障运行点靠近 (1,0) 的区域;随着负荷电流的加大,两侧电流中故障电流所占的份额减小,运行点向单位圆的负半平面偏移。在重负荷内部轻微故障时,两侧电流中负荷电流分量占主导,使得运行点靠近 (-1,0) 的区域。在单侧电源运行区内故障时,负荷侧电流为零,即 $\rho = 0$ 。因此在单位圆平面上,差动保护的动作边界越远离 (-1,0) 制动性能越强,外部故障的安全性越高,但另一方面,对重负荷下轻微区内故障灵敏度也越低。图 1(b) 给出了幅相平面下的差动保护特性,阴影部分为制动区。

2 电流差动保护的相移制动能力指标

在正常工况下或区外故障时,因数据同步误差或 CT 饱和等原因,致使保护所得单侧或双侧电流相对于一次电流出现了相移。忽略 CT 传变的相角误差,考虑 CT 引起的幅值误差在 $\pm 10\%$ 内,导致差

动保护误动作的最小相移角可以定义为电流差动保护的相移制动能力, 下文用符号 ϕ_{sr} 表示。

下文在幅相平面上分析差动保护方案的相移制动特性。假设 I_m 为正误差+10%, I_n 为负误差-10%, 则 $\rho = I_n / I_m = 81.8\%$ 。在复平面上, 制动区与 $0.818 \leq |\dot{\rho}| \leq 1$ 区域的交集即反映了差动保护的相移制动能力。即

$$\begin{cases} \phi_{sr} = \min |\arg(\dot{\rho}) - 180^\circ| \\ \dot{\rho} \in B \cap 0.818 \leq |\dot{\rho}| \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 B 为制动区域的边界曲线。差动保护的相移制动能力 ϕ_{sr} 如图2所示。

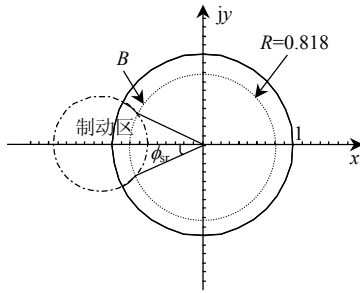


图2 相移制动能力角示意图

Fig. 2 ϕ_{sr} example of differential protection

3 差动保护的相移制动能力分析

3.1 比率制动判据的相移制动特性

差动保护常见的动作判据有: 幅值和制动、相量和差制动、标识制动、最大值制动和固定门槛制动。表达式分别为

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K/2(|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n|) \quad (2)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K/2|\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (3)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n|^2 > -S|\dot{I}_m| \cdot |\dot{I}_n| \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K|\dot{I}_m| \quad (5)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_0 \quad (6)$$

式中: $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ 为两侧电流相量; $|\dot{I}_m|$ 、 $|\dot{I}_n|$ 为两侧电流相量的幅值; K 、 S 为整定的差动制动系数; θ 为两侧电流相量的夹角; I_0 为整定的差动电流动作门槛。

由解析数学的知识可知: 在幅相平面上, 相量和差制动、幅值和制动判据和标记制动量的特性相同, 其制动区是一个圆, 圆心为 $(-\frac{4+K^2}{4-K^2}, 0)$, 半径

为 $\frac{4K}{4-K^2}$ 。图3(a)给出了当 $K=0.5$ 时相量和差制动的特性图。单位圆与制动圆相交的弧线是差动

保护的制动边界; 弧线与单位圆之间相交的阴影区表示差动保护的制动区。图3(b)给出了最大值制动判据在幅相平面上的特性图, 其制动圆的圆心为 $(-1, 0)$, 半径为 K 。

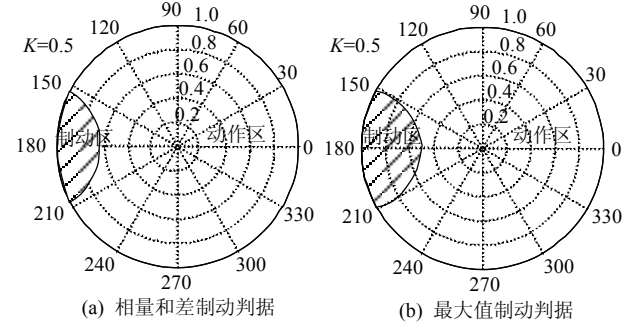


图3 比例制动判据在幅相平面上的动作特性

Fig. 3 Characteristic of differential protection

在线路差动保护中, 一般 K 的取值范围为 $0.3 \leq K \leq 0.9$, 图4给出了 K 取不同数值时, 2种制动区的相移制动能力。从图4可以看出, 其相移制动能力 ϕ_{sr} 随制动系数 K 的增大而增强; 相比而言, 在相同的 K 值条件下, 最大值制动判据的相移制动能力稍强一些。

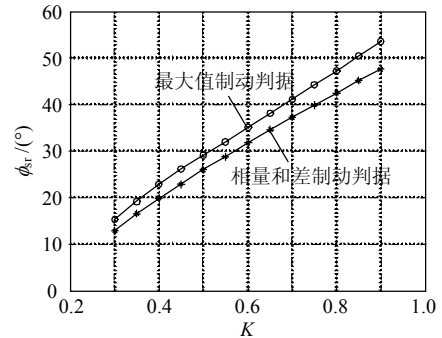


图4 不同 K 值下的比例制动判据的相移制动特性

Fig. 4 Phase shift resistant ability of sum resistant current scheme vs. max resistant current scheme

在微机比率差动保护中常采用的判据为 $(I_d > KI_r) \cap (I_d > I_{d0})$ 和 $(I_d > K(I_r - I_{r0}) + I_{d0}) \cap (I_d > I_{d0})$ 。前者的比率制动判据经过坐标原点, 其相移制动特性如前所述; 后者的比率制动特性不再经过原点, 其相移制动特性的瓶颈取决于折线的拐点。拐点与坐标原点连线的斜率 K 对应的相移制动能力角即整个判据的相移制动能力角; 同理, 多折线比率差动保护中的相移制动能力取决于折线上斜率最小的点。

微机三折线比率差动继电器按故障特征将特性分段, 既保持了对轻微故障的灵敏度, 又解决了CT饱和引起的安全性问题。为了简化, 以具体数值的例子讨论该继电器的特性。图5(a)给出了差动

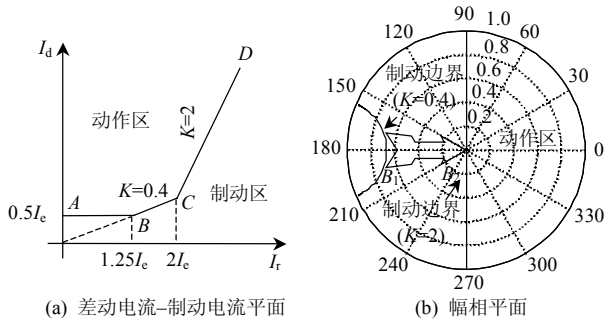


图 5 三折线比率制动动作特性示意图

Fig. 5 Triple-bias differential protection characteristic

电流-制动电流平面上的动作特性为折线 ABCD。三折线特性的动作判据为

$$\begin{cases} I_d \geq 0.5I_e, & \text{当 } I_r \leq 1.25I_e \text{ 时} \\ I_d \geq 0.4I_r, & \text{当 } 1.25I_e \leq I_r \leq 2I_e \text{ 时} \\ I_d \geq 2I_r - 2BI_e, B=1.6, & \text{当 } I_r \geq 2I_e \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

式中：\$I_d\$ 为差动电流；\$I_r\$ 为制动电流；\$I_e\$ 为额定负荷电流。

第 1 段的相移制动能力从左向右呈现减小趋势，与第 2 段连接的拐点处最小。第 2 段的制动系数为 \$K=0.4\$，该段的相移制动能力最小，因其过坐标原点，该段保持一致的相移制动能力。第 3 段的相移制动能力随着 \$I_r\$ 的增大呈增大趋势，最大达到 \$90^\circ\$，变化趋势在图 5(b) 中表现为从边界 \$B_1\$ 变化为边界 \$B_2\$，所以整个判据的相移制动能力局限在第 2 段，该保护的相移制动能力在 \$20^\circ\$ 左右。

3.2 相位差动与双 K 值差动保护的相移制动特性

利用两侧电流相位的特征差异，比较两端的相位关系构成的电流相位比较式纵联保护。考虑电流、电压互感器的误差以及输电线分布电容等影响，以及故障前两侧电动势有一定的相角差，为了可靠动作，相差保护的動作角度范围为 \$120^\circ > \phi > -120^\circ\$。保护的闭锁角 \$\beta = 60^\circ\$。动作区如图 6 所示。根据

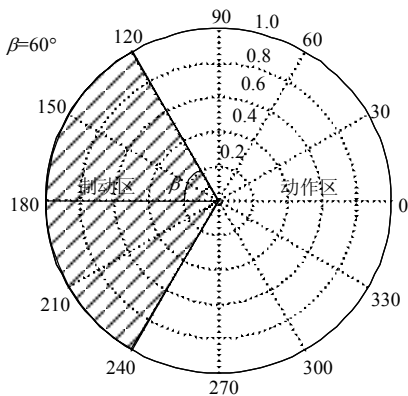


图 6 相差保护的動作特性

Fig. 6 Operate area sketch of phase differential protection

相移制动能力的定义可知相移制动能力角等于相差保护的闭锁角，即 \$\phi_{sr} = \beta\$。

3.3 双 K 值差动保护的相移制动特性

双 K 值差动保护使用 2 个 K 值，利用两侧电流间的幅相关系自动调整制动系数，是一种非线性制动的差动保护。其全电量的差动保护判据为

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > |K_1 \dot{I}_m - K_2 \dot{I}_n| \quad (8)$$

式中 \$K_1\$、\$K_2\$ 为 2 个制动常数。

与传统的和差原理判别式相比，传统的和差原理只设置 1 个 K 值即 \$K = K_1 = K_2\$，因此，不能随心所欲地在幅相平面上选择动作区，顾此失彼，无法协调灵敏度和安全性之间的矛盾。双 K 差动保护在抗 CT 饱和、大过渡电阻接地故障时的灵敏度等方面表现出理想的效果。

当 \$K_1 = -0.3846\$、\$K_2 = 1.308\$ 时，图 7 给出了双 K 差动保护在幅相平面上的动作区示意图，其相移制动能力可达到 \$\phi_{sr} = 63^\circ\$。可以看出，该判据在相移制动能力指标方面性能良好。

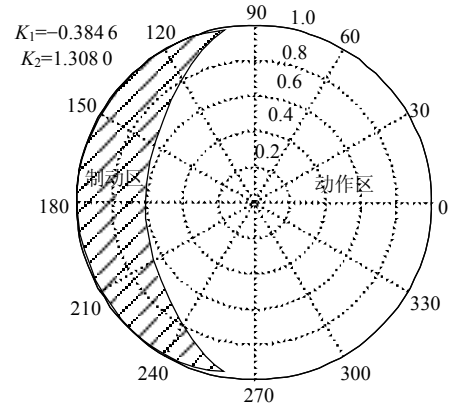


图 7 双 K 值差动保护的動作特性

Fig. 7 Operate area sketch of double K differential protection

4 新的差动保护判据

为了提高差动判据的相移制动能力，本文提出一种新的判据表达式。平移相差保护的边界，使其通过幅相平面上的 \$(-K, 0)\$ 点，制动区成扇形。该判据表达式的制动特性如图 8 所示，新判据表达式可以写成

$$|\arg(K\dot{I}_m + \dot{I}_n) - \arg(\dot{I}_m)| < \phi_{op} \quad (9)$$

式中 \$\phi_{op}\$ 为保护动作边界角，\$I_m \geq I_n\$。

新判据表达式有 2 个参数：一个是对应着常规比率制动判据的制动系数 \$K\$，可以用来调整判据内部轻微故障的灵敏度；另一个是保护动作边界角，可以用来调整判据的相移制动能力。两者共同作用，

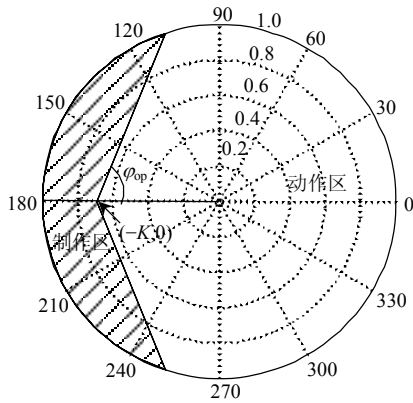


图8 新保护判据的动作特性示意图

Fig. 8 Operation character of new differential protection

形成灵活的制动区设定方法。

给定参数 K (当 $0 \leq K \leq 0.818$ 时) 和期望指标 ϕ_{sr} 后, 新判据的另一个参数保护动作边界角 ϕ_{op} 的求取公式为

$$\phi_{op} = \arccos\left(\frac{K - 0.818 \cos \phi_{sr}}{\sqrt{K^2 - 1.636K \cos \phi_{sr} + 0.669}}\right) \quad (10)$$

借鉴三折线比率制动判据的思想, 根据故障特征构成以下三段复合判据(判据中 I_0 为整定的动作门槛, I_e 为额定负荷电流), 即:

第 I 段 ($I_m < I_0$) 的动作判据为

$$\begin{cases} |\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_0 \\ I_0 = 0.3I_e \sim 0.5I_e \end{cases} \quad (11)$$

第 II 段 ($I_0 \leq I_m < 2I_e$) 的动作判据为

$$\begin{cases} |\arg(K_1 \dot{I}_m + \dot{I}_n) - \arg(\dot{I}_m)| < \phi_{op1} \\ 0.7 \leq K_1 \leq 0.8, 60^\circ \leq \phi_{op1} \leq 80^\circ \end{cases} \quad (12)$$

第 III 段 ($I_r \geq 2I_e$) 的动作判据为

$$\begin{cases} |\arg(K_2 \dot{I}_m + \dot{I}_n) - \arg(\dot{I}_m)| < \phi_{op2} \\ 0.1 \leq K_2 \leq 0.4 \\ 80^\circ \leq \phi_{op2} \leq 120^\circ \end{cases} \quad (13)$$

第 I 段两侧的电流都很小, CT 误差小, 相移来源主要是同步误差, 无需采用制动特性, 就是简单的差动电流判据。与三折线比率制动不同时, 第 I 段的范围控制在与门槛值成一倍关系。目的是保持该段的相移制动能力不低于 $K=1$ 的比率制动(相移制动能力角约为 60°)。

第 II 段的特点也是 CT 误差小, 要考虑轻微内部故障有电流流出时的灵敏度。所以制动区越小越好 (K 值越大制动区越小), 考虑到相移的主要来源也是同步误差, 相移制动能力保持与第 I 段一致即可。

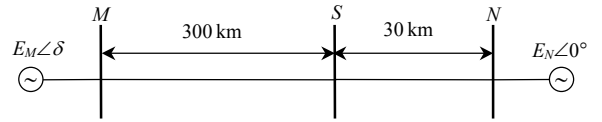
第 III 段的参数设置主要考虑严重故障时 CT 可

能饱和, 相移的主要来源为同步误差和 CT 传变误差, 所以相移制动指标要求更高一些。

5 仿真分析

5.1 区内故障的灵敏度实验

在如图 9 所示的 500 kV (50 Hz) 系统模型上, 运用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真程序对本文提出的新判据和三折线比率制动判据(如式(7))进行对比仿真计算。新判据的门槛电流 I_0 取 50% 的额定负荷电流; 判据的第 2 段参数 K_1 取 0.8, 期望指标 ϕ_{sr} 为 60° , 由式(10)知 ϕ_{op1} 取 61° ; 判据的第 3 段参数 K_2 取 0.4, 期望指标 ϕ_{sr} 为 60° , ϕ_{op2} 取 91° 。



系统参数: $Z_{M1}=1.05+j43.18 \Omega$, $Z_{N1}=1.06+j44.92 \Omega$; $Z_{M0}=j29.09 \Omega$, $Z_{N0}=j37.47 \Omega$; $E_M=408 \text{ kV}$, $E_N=428 \text{ kV}$ 。

线路参数: $r_1=r_0=0.0208 \Omega/\text{km}$, $l_1=l_0=0.8984 \text{ mH/km}$, $c_1=c_0=0.0129 \mu\text{F/km}$ 。

图9 ATP-EMTP 仿真模型

Fig. 9 ATP-EMTP simulation model of 500 kV power system

仿真电源电势角差分别为 -5° 、 10° 、 25° 、 40° 、 55° 和 70° 时, 线路 MS 中间位置发生单相接地故障, 并且过渡电阻在 $0 \sim 300 \Omega$ 范围内取 15 种变化时情况, 图 10 给出了两侧电流的幅相关系在幅相平面上的轨迹。从图 10 可以看出, 新型差动保护可以反映 300Ω 过渡电阻单相接地故障, 而三折线判据只能反映 150Ω 过渡电阻单相接地故障。

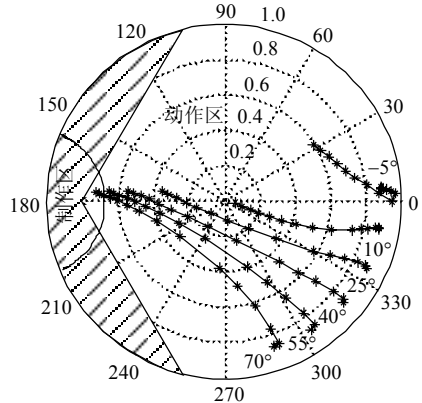


图10 区内单相接地故障时的两侧电流幅相关系轨迹

Fig. 10 Current changing trajectory of inner SLG fault with different transition resistor

5.2 相移制动特性比较实验

仿真线路满负荷运行, 区内无故障, CT 工作在理想状态(未饱和), 两侧装置的时间误差在 $0 \sim 5 \text{ ms}$ (50 Hz 系统) 均匀分布的 10 种情况。图 11 给出

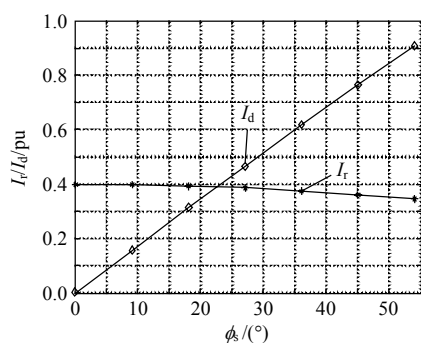


图 11 不同相移下三折线差动的差动电流和制动电流

Fig. 11 Differential current vs. restrain current of triple-bias differential protection due to different phase shift

了三折线比率制动判据的制动电流与差电流的比较,可以看出,三折线比率制动判据在相移 ϕ 等于 27° (1.5 ms)时已误动。新判据在相移达到 54° (3 ms)还没有误动。这表明新判据的相移制动能力远远大于常规的比例差动判据。

5.3 抗外部故障 CT 饱和的性能

利用 ATP 建立考虑铁磁元件的 CT 模型,考虑一侧电流完全被线性传变,另一侧出现 CT 饱和而导致二次电流波形出现畸变的情况,两侧电流如图 12 所示,差动保护在幅相平面上的工作点如图 13 所示。由图可知,因为 CT 饱和引起的波形畸变会

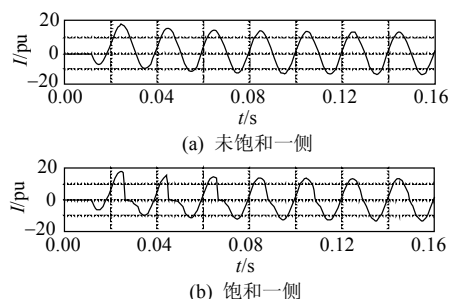


图 12 外部故障单侧 CT 饱和

Fig. 12 CT saturation at only one side during an external fault

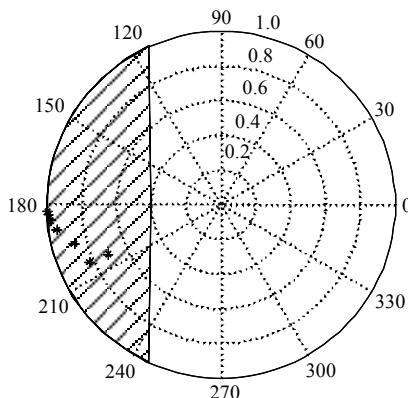


图 13 外部故障单侧 CT 饱和的工作点

Fig. 13 Operation points of new method

导致两侧所得电流相量幅值误差变大,并出现相移,新判据的第 3 段能可靠制动。

6 结论

1) 提出差动保护的相移制动能力指标,为采用新差动判据以减小同步误差的影响提供了理论依据。

2) 采用相量法分析了常规比率制动判据、三折线制动判据、相差保护、双 K 值差动保护的相移制动能力。分析表明:三折线制动判据的相移制动能力只有 20° 左右;而相差保护和双 K 值差动保护的相移制动能力则在 60° 左右。

3) 构造了一种新型的差动保护制动判据表达式。与传统的差动判据相比,新的判据的保护制动区设置更加灵活,新判据可以兼顾内部故障灵活性,抗 CT 饱和能力和相移制动能力。这为差动保护非线性制动的工程应用和推广提供了新思路。仿真实验表明:这种新差动判据具有良好的内部故障灵活性,抗 CT 饱和能力和相移制动能力。

参考文献

- [1] 吴崇昱,孙雷波,张军.一种基于软实时通信的广域保护原理[J].电力自动化设备,2006,26(12):21-24.
Wu Chongyu, Sun Leibo, Zhang Jun. Wide area protection principle based on soft real-time communication[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 21-24(in Chinese).
- [2] 许建德,陆以群.新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式[J].电力系统自动化,1993,17(4):23-26.
Xu Jiande, Lu Yiqun. A new scheme of sampling synchronization and communication for digital current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(4): 23-26(in Chinese).
- [3] Li H Y, Southern E P, Potts S, et al. A new type of differential feeder protection relay using the global positioning system for data synchronization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1090-1099.
- [4] 高厚磊,江世芳,贺家李.输电线路新型电流差动保护的研究[J].中国电机工程学报,1999,19(8):49-53.
Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53(in Chinese).
- [5] 金华峰,余荣云,朱晓彤,等.用于线路纵联保护的双向复用段倒换环动态延时特性研究[J].电力系统自动化,2006,30(6):65-70.
Jin Huafeng, Yu Rongyun, Zhu Xiaotong, et al. Research on dynamic transmission delay of bidirectional multiplex section switching ring used for line pilot relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 65-70(in Chinese).
- [6] 沈冰,何奔腾,张雪松.基于时钟差的线路电流差动保护数据同步方法[J].电网技术,2006,30(24):78-83.
Shen Bing, He Benteng, Zhang Xuesong. A new device clock error based data synchronization method for current differential protection of transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 78-83(in Chinese).

- [7] 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9-13.
Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Zhang Zhe. Study on a new differential protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13(in Chinese).
- [8] 吴崇昊, 陆于平, 侯喆. 基于时域连续有限冲激响应滤波器的电子互感器采样数据站间同步算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 50-54.
Wu Chonghao, Lu Yuping, Hou Zhe. Time-domain continuous FIR filter based electronic instrument transducers sampling data inter-substation synchronization arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 50-54(in Chinese).
- [9] Villamagna N, Crossley P A. A symmetrical component-based GPS signal failure-detection algorithm for use in feeder current differential protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1821-1828.
- [10] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 复式电流比例差动保护判据的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 98-102.
Lin Xiangning, He Zhanhu, Liu Shiming, et al. Reliability evaluations on complex current percentage differential criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 27(7): 98-102(in Chinese).
- [11] 李晓华, 柳焕章, 尹项根, 等. 新型双K值差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 49-55.
Li Xiaohua, Liu Huanzhang, Yin Xianggen, et al. Novel differential protection with double restraint coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (25): 49-55(in Chinese).



朱国防

收稿日期: 2008-12-25。

作者简介:

朱国防(1975—), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电系统的保护与控制, zhuguofang@gmail.com;

陆于平(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统数字保护、智能设备与诊断、电力系统综合自动化等。

(责任编辑 刘浩芳)