

一种适用于双端系统微机微波 电流差动保护的跳闸判据

华北电力学院 王绪昭 伍叶凯 杨奇逊

摘要 本文对国内首次研制的WBB—1型微机微波电流差动保护用于双端系统时的跳闸判据进行了理论分析。与目前国外几种数字微波电流差动保护动作判据相比,本文所提的新判据具有计算简单,区外短路防卫能力高,区内短路动作灵敏、快速等特点。

WBB—1用于三端系统时的跳闸判据与双端系统判据有所不同,笔者将另有文章做这方面的论述。

关键词 微机保护 数字微波 电流差动 跳闸判据

一 目前国外的几种动作判据

式(1)是许多微波保护参考书中谈到过的动作判据^[1]也是日本东芝公司数字微波电流差动保护的跳闸判据^[2]

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K_1 (|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n|) + K_0 \quad (1)$$

式中 \dot{I}_m , \dot{I}_n : 双端系统M、N侧电流向量,

K_1 : 制动系数,

K_0 : 定值。

英国GEC公司等欧洲电力部门常将(1)式分为以下两式使用^[3]。

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

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_0 \quad (3)$$

式中 I_0 : 定值, K : 制动系数。

以上的跳闸判据是沿用了模拟微波电流差动保护的动作判断方式,作为数字微波保护,这两种判据有两点不尽理想之处。

第一,计算量大,用数字方法完成(1)式或(2)、(3)式,需进行若干次平方及开平方运算,完成三项电流的跳闸判据要耗费大量机时,所以现在国外的数字微波保护装置多以抬高硬件造价,用多片16位或32位CPU来组成微波保护系统。

第二、(1)或(2)式右端的制动部分在区内、区外故障时的表现是一致的。为使区外故障时有足够的防卫度,区内短路时保护动作的灵敏性就会受到影响。

二 两端系统跳闸新判据

本文提出并用于“WBB-1”中的两端系统动作判据如下两式:

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (4)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_0 \quad (5)$$

两者同时满足时发跳令。(5)式是第一跳闸判据,主要用以防止线路空投或空载情况下因某种原因装置误起动,此时(4)式必满足跳闸条件而造成误跳。(4)式是跳闸主判据。

“WBB-1”的软件中,为减少计算量,将(5)式的判据分解为(6)和(7)式。其中下脚S、C表示电流向量值的实部与虚部。两式成“或”门关系,其中之一成立,便进行(4)式判断,否则不投入(4)式。

$$|I_{ms} + I_{ns}| > I_0 \quad (6)$$

$$|I_{mc} + I_{nc}| > I_0 \quad (7)$$

以上两式与(5)式稍有出入,在一定范围内相当于提高了定值。变动的最大范围相当于将(5)式的 I_0 扩大了1.4倍,这样更有利于保护的安全性,因为实际中 I_0 以躲过线路电容电流整定,其值不大,扩大1.4倍也不会对灵敏度有太大影响。

以下略做证明。

$$\begin{aligned} |\dot{I}_d| &= |\dot{I}_m + \dot{I}_n| \\ &= |(I_{ms} + I_{ns}) + j(I_{mc} + I_{nc})| \end{aligned} \quad (8)$$

令 δ 为 \dot{I}_d 与复平面坐标横轴之夹角。

$$|\dot{I}_d| \cos \delta = |I_{ms} + I_{ns}| \quad (0^\circ < \delta < 45^\circ) \quad (9)$$

$$|\dot{I}_d| \sin \delta = |I_{mc} + I_{nc}| \quad (45^\circ < \delta < 90^\circ) \quad (10)$$

当 $\delta = 0^\circ$ 或 90° 时,(6)和(7)式的联合判据与(5)式完全一致。由于(6)(7)式是或门关系,所以 δ 的变化边界只考虑到 45° ,这种情况是跳闸判据的最不灵敏点,相当于将动作量降到原值的70.7%,或者说将 I_0 扩大了1.4倍。

跳闸判据的关键部分是(4)式,现将该式写成 I_s 、 I_c 形式如下:

$$\sqrt{(I_{ms} + I_{ns})^2 + (I_{mc} + I_{nc})^2} > K \sqrt{(I_{ms} - I_{ns})^2 + (I_{mc} - I_{nc})^2} \quad (11)$$

整理后:

$$(PI_{ms} + I_{ns})(I_{ms} + PI_{ns}) + (PI_{mc} + I_{nc})(I_{mc} + PI_{nc}) > 0 \quad (12)$$

式中 $P = (1 + K) / (1 - K)$

(式12)中已没有平方、开方运算,K值的选取也以计算简单为宜,如 $K = 0.6$,则

$P = 4$ ，对CPU来讲，只需做几次移位计算而已。

三 新判据运行特性分析

1. 区外故障

首先分析制动特性，令M、N侧电流反相 180° ，用余弦定理将(4)、(5)式展开，写成以 I_0 为基准值的标么值表达式。

$$I_{m*}^2 + I_{n*}^2 - 2 I_{m*} I_{n*} (1 + K)^2 / (1 - K^2) > 0 \quad (13)$$

$$I_{m*}^2 - I_{n*}^2 - 2 I_{m*} I_{n*} > 1 \quad (14)$$

式中： $I_{m*} = I_m / I_0$ $I_{n*} = I_n / I_0$

从以上两式不难解出，当 $K = 0.6$ 时，两侧电流幅值相对允许误差可达75%； $K = 0.43$ 时，误差裕度达60%。这两个制动系数在“WBB-1”中都得到了应用。图1示出两种K值的制动特性。

当取相同K值时，上文提及的传统判据与本文新判据的制动特性基本一致。

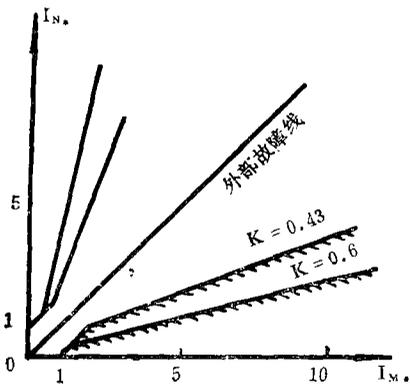


图1 式(4)、(5)制动特性

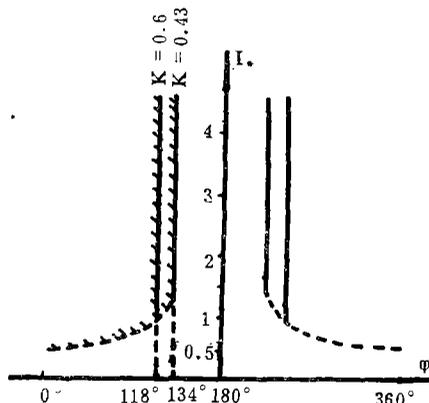


图2 式(4)、(5)相位特性

令 $I_* = I_m / I_0 = I_n / I_0$ 来分析新判据的相位特性，经化简整理后，(4)、(5)式可写为如下形式。

$$(1 - K^2) / (1 + K^2) + \cos \phi > 0 \quad (15)$$

$$I_*^2 (1 + \cos \phi) > 1 / 2 \quad (16)$$

式中 ϕ ： \dot{I}_m 、 \dot{I}_n 之间的相位角

从以上两式解出， $K = 0.6$ 时，允许两侧电流相位偏差 62° ； $K = 0.43$ 时，允许相位误差在 46° 以内，图2是新判据的相位特性。

同理分析(2)、(3)式相位特性， $K = 0.6$ 时，其角度裕度为 72° 。稍强于新判据的角差范围。

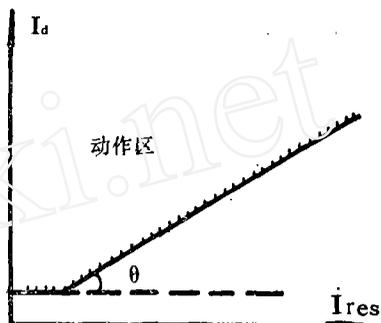
2. 区内故障

令 \dot{I}_m 、 \dot{I}_n 同相位，式 (2)、(3) 传统判据在区内短路时的动作特性显示于图 3 中。

再看式 (4) 的新判据，在两侧电流同相的条件下，可将其改写成下面的形式。

$$I_m + I_n > K(I_m + I_n) - 2KI_n \quad (17)$$

图 3 显示，传统判据的动作曲线斜率取决于制动系数 K ，而新判据动作斜率不但受 K 影响，而且与 $-2KI_n$ 有关。若两种判据 K 与 I_0 相同，新判据动作斜率低，灵敏度得到提高。只有当 $I_n = 0$ 时，(单电源内部故障)，两种判据的动作行为才一样。 $I_m = I_n$ 时，新判据制动部分为零，动作最灵敏， I_m 与 I_n 不等时，动作斜率在 0 与 $\text{tg}\theta$ 之间变化，但任何时候新判据的灵敏度都高于传统判据。



$$\begin{aligned} \dot{I}_d &= |\dot{I}_m + \dot{I}_n| \\ \dot{I}_{res} &= |\dot{I}_m| + |\dot{I}_n| \\ K &= \text{Tan}\theta \end{aligned}$$

图 3 式 (2)、(3) 动作特性

负荷情况下发生区内短路，保护的行动特性不易用二维空间来描述。因为两种判据的动作用量完全相同，所不同的是制动量，制动量越小，灵敏度越高。

令传统判据与新判据制动量之比为灵敏比较系数 K_s ，当 K 为相同值时，其表达式如下。

$$K_s = \frac{(|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n|)}{\sqrt{(|\dot{I}_m|^2 + |\dot{I}_n|^2 - 2|\dot{I}_m||\dot{I}_n|\cos\phi)}} \quad (18)$$

式中： ϕ 为 \dot{I}_m 、 \dot{I}_n 之相位角

(18) 式表明，只有 $\phi = 180^\circ$ 时 $K_s = 1$ ，其他任何时候 K_s 均大于 1，即新判据灵敏度高于传统判据。当然，区内短路不可能出现 $\phi = 180^\circ$ 的情况。

令 $Q = |\dot{I}_m| / |\dot{I}_n|$ ；将 (18) 式写成下面形式。

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{1 - 2Q(1 + \cos\phi)/(1 + \phi)^2}} \quad (19)$$

当 ϕ 从 0° 到 120° 间变化时，两种判据的灵敏度比较见图 4。

可见，若取相同 K 值，新判据与传统判据在区外短路时具有基本一致的防卫能力，而在区内短路时，动作的灵敏度得到明显提高。

四 数字仿真验证

本文提出的双端系统动作判据利用 EMTP 仿真程序进行了验证。仿真线路是

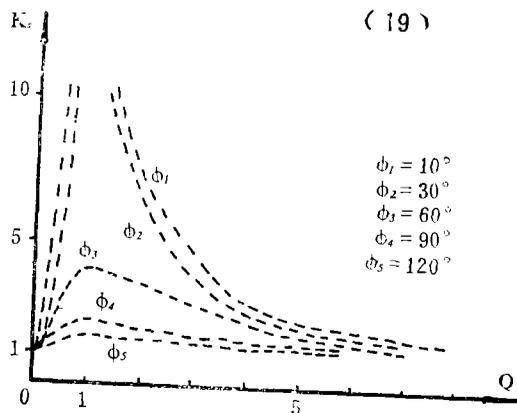


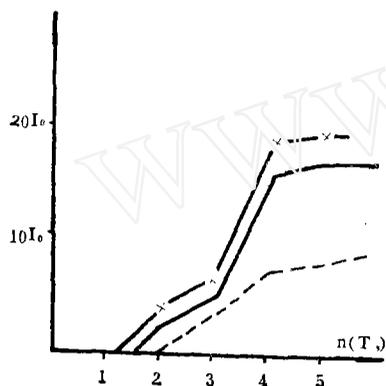
图 4 新判据与传统判据的灵敏度比较

一条500kV、400kM单回线路。大量仿真结果说明了以下两点结论。

1. 在各种运行方式下，K值相同时，新判据的动作灵敏度均高于传统判据。一般情况下，新判据反映过渡电阻的能力达200Ω以上。重负荷下的高阻接地故障，新判据在K = 0.6时动作灵敏度减弱，但K = 0.43时仍能可靠动作。

2. 采用经VFC后的半周差分富氏算法，每周六点采样，大部分区内故障在短路后一至两点便满足跳闸条件，高阻故障动作有所推迟。

图5示出一种典型动态跳闸曲线，其中横轴采样间隔 T_s 为3.33ms，纵轴是(4)式动作量与制动量之差。图中动态曲线越过横轴的时刻即说明保护已满足跳闸条件。



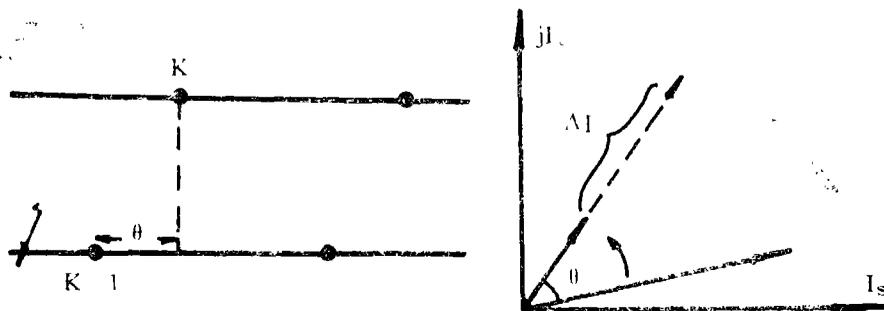
— × — × — 新判据 $k = 0.43$
 ————— 新判据 $k = 0.6$
 - - - - - GEC判据 $k = 0.6$

图5 距M侧150kM，故障电阻100Ω，运行角度20°时的几种跳闸判据数字仿真结果

五 动态跳闸方式

采用VFC数据采集系统后，利用半周差分富氏法需故障后5点采样才能算出准确值，但从仿真结果看，在这之前两侧保护均已满足跳闸条件。因此，在故障后第一个数据窗未完之前，利用富氏法的动态计算结果进行判断，可以加速保护跳闸。

但问题的另一方面，在区外短路的动态计算过程中，一定要保证不误动的可靠性，当K = 0.6时的新判据，幅值误差裕度为75%，相位误差裕度是 62° 。当两侧CT一次流过相同电流，不考虑CT饱和问题，两侧电流在同一时刻的计算误差是不会超过上述误差范围的。然而线路两侧微波保护的采样系统是不同步的，需经同步调整后才能进行跳闸判断。同步调整过程中总是将对侧滞后的数据旋转 θ 角，与本侧超前方向的数据对齐。调整 θ 角最大可达 60° 。在这种情况下，相当于用第K次计算值与第K - 1次计算值相比较，见图6所示，从仿真结果看，两者之间的相对差别可达60%左右。因此，东芝、GEC等跳闸判断都是在故障数据窗稳定后才开始进行的。有关同步调整问题^[4]做了详细论述。



为了加速区内短路跳闸时间，同时防止区外故障误动，“WBB—1”在故障启动后，半周差分富氏数据窗未完成前投入一种保守判据，其表达式如(20)式。

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (20)$$

写成 I_s, I_c 分量形式：

$$I_{ms}I_{ns} + I_{mc}I_{nc} > 0 \quad (21)$$

式(21)实际上是一种比相式动作判据，用本章前文的分析方法，不难得出其相位误差裕度为 90° ，区外短路的防卫能力极高，在动态过程中不会误动。

对于大部分区内金属性或小电阻故障，(20)式能够可靠动作，快速发跳令。当重负荷下发生短路或某些高阻故障时，可以用其他高灵敏判据进行处理。

“WBB—1”中共使用三种判据，除保守判据外，还有前述的 $K=0.6$ 时的(4)式，称低灵敏判据， $K=0.43$ 时为高灵敏判据，三种判据间的配合关系见图7。

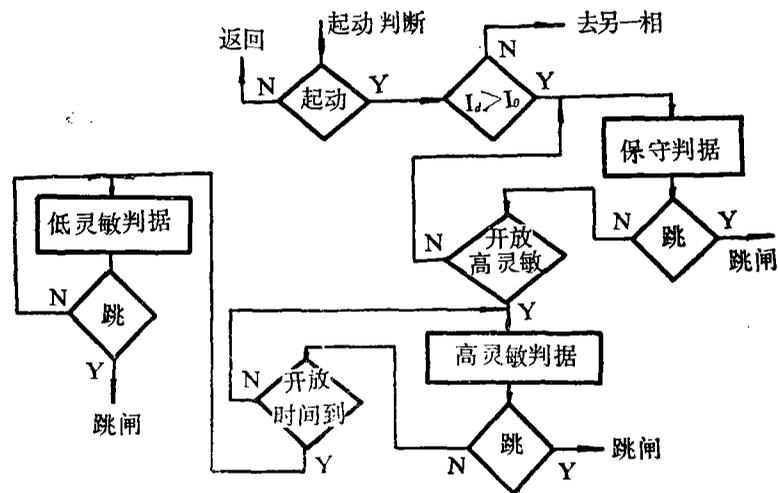


图7 WBB—1跳闸判断程序示意图

故障初始，投入保守判据，大部分区内短路都可以得到处理，四点采样后，投入高灵敏判据，用以处理各种不利情况下的区内故障，一周或稍后的时间，投入低灵敏判据，直到整组复归。

低灵敏判据的制动特性与传统判据在大电流区的制动特性基本相同。这些判据在国外已运行数年，效果良好，而新判据在内部故障时又有其更高的灵敏性，所以适合于故障处理的全过程。

高灵敏判据用于数据窗动态过程结束，而CT可能深度饱和前这段时间，以提高整机的动作灵敏性。

六 动模试验

“WBB—1”在一条220kV、300kM的双电源单回模拟线路上进行了动模试验。试

验共使用五个模拟短路点：两个区外故障点和三个区内故障点。所有这些点上都进行了金属性单相接地，两相短路，三相短路和单相高阻接地试验。负荷状态下共做模拟短路30次，其中区外短路10次，内部故障20次，线路两侧装置均无错误动作现象。区内故障装置发跳令最快时间是13.3ms，最慢26.7ms，平均跳闸时间17.2ms。这个时间不包括出口继电器的动作时间。

七 结论

“WBB—1”微波电流差动保护采取了动态跳闸方式，加速了区内故障的切除时间。保守、高灵敏和低灵敏三种跳闸判据在故障后分段切换投入，既保证了区外故障时保护具有足够的防卫能力，又提高了内部故障时的动作灵敏性。与传统判据相比，新判据在外部故障防卫能力相同的情况下，区内短路的动作灵敏度有明显提高。另外，这种判据计算简单，节省机时。

数字仿真和动模试验的结果使本文的理论分析得以验证。

参考文献

- [1] 贺家李、葛耀中. 超高压线路故障分析与继电保护. 科学出版社.
- [2] (INSTRUCTION MANUAL DIGITAL CURRENT DIFFERENTIAL RELAY) TOSHIBA CORPORATION.
- [3] W·S·Kwong, M·J·Layton and A. Newboud(A Microprocessor—Based Current Differential Relay for uses with Digital Communication systems) Third Internitonal Conference on Deve lopments in power system protection.
- [4] 王绪昭. 并行处理式单片机微波保护的研究. 华北电力学院博士论文.