

磁制动母线差动保护研究

李忠安, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在磁制动母线差动保护的基本原理基础上提出了一种实时检测电流互感器 (CT) 二次电阻 R 的方法。该方法思路是: 将 CT 二次电流进行希尔伯特变换, 通过计算波形方差, 判断 CT 饱和, 再利用电流导数最大值法确定 CT 初始饱和点, 由饱和点磁链计算出 CT 二次电阻。仿真结果表明该方法能准确确定 CT 初始饱和点, 不受电流暂态过程与谐波影响, 能有效防止磁制动母线保护因 CT 二次负载变化引起的误动。

关键词: 磁制动母线保护; 电流互感器饱和; 希尔伯特变换

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)09-0010-05

1 前言

目前微机母线保护一般采用电流差动原理, 并且大多采用瞬时值差动原理来提高保护速度。母线保护主要依赖电流互感器二次电流信号作为保护判断信息。因此电流互感器能否正确传变一次电流信息, 直接影响母线保护能否正确动作。但是在母线区外近端短路时, 故障线路电流互感器 (CT) 将产生饱和, 不能正确传变一次电流, 二次电流波形产生缺损, 差动原理将遭到破坏, 母线保护难免要误动。目前基于母线差动原理的保护, 已提出许多防止 CT 饱和后误动的方法, 如: 具有制动特性母差保护、中阻抗母差保护及 CT 线性区母差保护。具有制动特性的母线差动保护, 实质上是在保护启动后的某段时间内人为的提高动作定值, 以防保护误动, 但同时也使得对转换性故障的灵敏度下降。中阻抗母线差动保护虽然具有较好的抗电流互感器饱和的能力, 但是由于过分依赖电流互感器的非线性特性, 而使得保护对电流互感器的一致性要求过高, 同时在微机保护中实现存在困难。电流互感器线性区母线差动保护, 是在电流互感器交流每周波退出饱和的线性区内, 投入差动原理的保护, 由于此种原理的保护实质上是避开了电流互感器的饱和区, 所以能对母线故障作出正确的判定。因此为保证电流互感器线性区母线差动保护正确动作, 必须能实时检测每周波 CT 饱和时刻与退出饱和时刻。对于电流互感器饱和的判据已有很多方法提出, 但这些方法在理论上或实际应用中都存在着许多问题, 磁制动方法从电流互感器饱和的物理本质出发, 得出了一种基于电流互感器磁链的饱和判据, 从理论上得到了寻找电流互感器线性区的方法。本文对于磁制动母线差动保护在实际应用中存在的问题作进一步的研究、

讨论。

2 磁制动原理^[2]

图 1 是电流互感器示意图, 其中电流互感器漏磁阻抗已归算到二次侧负载阻抗中, $R = r_0 + r_2$, $X = x_0 + x_2$ 。

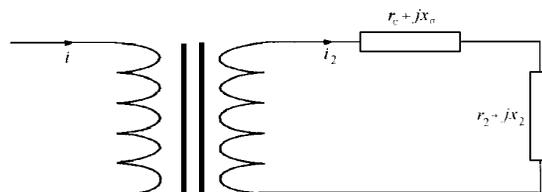


图 1 等值电路图

对于电流互感器二次侧存在电压方程:

$$\frac{d\psi}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

其中 ψ 为电流互感器磁链, $L = \frac{X}{2f}$, 对式 (1) 积分得,

$$\psi(t) - \psi(0) = R \int_0^t i(t) dt + Li(t) \quad (2)$$

上式中 $\psi(0)$ 为故障开始时电流互感器磁通, 可以通过文献^[3]的方法消除剩磁的影响, 因此不失一般性可以假设 $\psi(0) = 0$, 有

$$\psi(t) = R \int_0^t i(t) dt + Li(t) \quad (3)$$

对于给定电流互感器来说, 当磁通达到图 2 总饱和点 A 时, 即 $\psi(t) = \psi_{sat}$ 时, 电流互感器出现饱和, 所以电流互感器饱和判据可写为:

$$\left| R \int_0^t i(t) dt + Li(t) \right| = \psi_{sat} \quad (4)$$

式 (4) 就是磁制动原理的基本判别式, 满足式

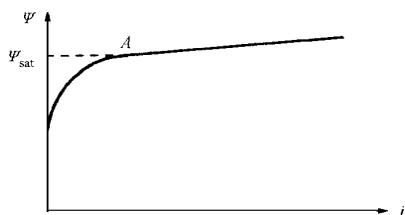


图2 磁化曲线

(4) 时闭锁差动保护, 否则说明 CT 处在线性区, 开放差动保护, 可以有效地防止 CT 饱和时母线保护误动。

由(4)式可知, 为了判断 CT 是否饱和, 需要整定 CT 三个参数: 二次负载电阻, 二次负载电感, 以及励磁曲线饱和点(拐点)磁链值。这些参数均可以通过现场测试得到, 因此磁制动原理在理论上已经不存在问题。

在实际应用中, 二次回路端子在运行中可能会有所松动, 其接触电阻增大, 使回路的电阻大于整定值, 由(4)式知其后果会误增大 CT 线性区, 造成母差保护误动。

为了解决这个问题, 本文采用通过测量 CT 第一个饱和点的方法实时计算出二次电阻, 从而解决了由于 CT 二次电阻增大引起线性区扩大造成的差动保护误动问题。

假设故障开始后在 T_0 时 CT 开始饱和, 根据式(3)有:

$$\psi_{\text{sat}} = R \int_0^{T_0} i(t) dt + Li(T_0) \quad (5)$$

根据式(5)实时检测二次回路电阻

$$R = \frac{\psi_{\text{sat}} - Li(T_0)}{\int_0^{T_0} i(t) dt} \quad (6)$$

3 初始饱和点时刻 T_0 的检测方法

由式(6)知, 为了实时计算 CT 二次电阻 R , 其关键是检测饱和时刻 T_0 。理论上 CT 任何一饱和点均可用来计算 R , 即对式(4)都是有效的。CT 第一个饱和点处的电流波形饱和特征最明显, 容易判别, 由于饱和后电流波形很复杂, 以后的饱和点与退饱和点从波形上进行判别较困难, 所以本文只利用 CT 的第一个饱和点(初始饱和点)来计算 R 。

对于初始饱和点时刻的检测, 本文分两步检测。首先, 检测一周波内 CT 是否饱和, 若饱和则在此周

波内细分寻找饱和点具体位置。

3.1 希尔伯特变换与 CT 饱和判别

我们知道, 当 CT 通过较大一次暂态电流(特别含大量衰减非周期分量), CT 铁芯进入饱和时, 二次电流出现缺省现象, 产生强烈非对称畸变。利用这个特征可以进行饱和判别, 但故障时暂态过程同样也会使电流波形产生畸变, 因此必须有效区分这两种现象。希尔伯特变换是一种正交变换, 实际上是一个 90° 的移相器, 它将正弦波向后移相 90° , 而不改变正弦波幅值。它对波形畸变较敏感, 能明显地反映电流波形的非对称畸变。而计算波形方差能准确地比较波形差异, 对高频噪声不敏感, 这样, 利用 CT 二次电流与其希尔伯特变换(并移相)之间的方差可以区分出这两类波形, 准确判断 CT 是否饱和。

设 $i(n)$ 为 CT 二次电流采样值, 令

$$\hat{i}(n) = i(n) * h(n) \quad (7)$$

$$\text{其中 } h(n) = \begin{cases} \frac{2}{n} \sin^2\left(\frac{n}{2}\right), & n \neq 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases}, \hat{i}(n) \text{ 就是 } i(n) \text{ 的}$$

希尔伯特变换^[3]。

由于 $h(n)$ 为无限冲击响应, 具体实现起来有困难, 通常将其转换到频域, 采用 FFT 正变换与反变换进行计算^[3]。对其 FFT 算法简化后, 采用的实际变换公式为

$$\hat{i}(n) = \frac{2}{N} \sum_{l=0}^{N-1} x(l) s(n-l), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

其中 $s(n-l) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \sin\left[\frac{2}{N}k(n-l)\right]$, N 为一周波采样点数。易知 $s(n-l)$ 对 $n=0, 1, 2, \dots, N-1, l=0, 1, 2, \dots, N-1$ 仅为 N 个常数, 且这些常数中一半为零, 因此计算时只需储存 $N/2$ 个常数。移相公式为:

$$y(n) = \begin{cases} \hat{i}\left(n + \frac{N}{4}\right), & n + \frac{N}{4} \leq N-1 \\ \hat{i}\left(n - \frac{3N}{4}\right), & n + \frac{N}{4} \geq N \end{cases} \quad (9)$$

方差比值公式为:

$$= \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (i(n) - y(n))^2}{\sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)} \quad (10)$$

式(10) 值反应了 CT 电流波形畸变程度, 当 CT 饱和时 值变大, 饱和越严重, 值越大。因此可通过判断 CT 是否饱和。由于直流分量的希尔伯特变

换信号为零,而故障后 CT 二次电流直流分量较大,进行方差比值计算时会导致很大的误差,可能会误判为 CT 饱和。因此为了消除信号中直流分量影响,公式(9)应修正变为:

$$y(n) = \begin{cases} \hat{t}(n + \frac{N}{4}) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k), n + \frac{N}{4} & N-1 \\ \hat{t}(n - \frac{3N}{4}) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k), n + \frac{N}{4} & N \end{cases} \quad (11)$$

对于正弦信号 $i(n) = \sin(\frac{2\pi n}{N})$, N 为基波一周波采样点数。其希尔伯特变换为 $\hat{t}(n) = -\cos(\frac{2\pi n}{N})$ 。将 $\hat{t}(n)$ 移相 90 得 $y(n) = \sin(\frac{2\pi n}{N})$, 两信号相同,即理想的故障电流的值为零。由于采用一周波波形方差比较,对于高频噪声,对噪声不敏感。故障后未饱和 CT 二次电流与正弦波形接近,其希尔伯特变换再移相后波形与原波形相似,值很小。而饱和后 CT 二次电流波形含有强烈的不对称畸变,其希尔伯特再移相后的波形与原波形则相差很远,使得方差比值值很大。通过比较两者间差别就可以判断 CT 是否饱和。

3.2 导数法与初始饱和点时刻确定

上述计算方差比值方法可以判断一周波内 CT 是否饱和,但不能确定 CT 饱和后此周波内具体的饱和时刻,必须要用其他方法精确地求出饱和时刻。本文的方法是在希尔伯特变换判别 CT 饱和时,取该时刻前一周波的数据窗,在此数据窗波形内,求电流导数模最大的点,此点即为饱和点。因此可以很容易确定饱和点。但若单纯用导数法进行饱和判别,则由于导数对高次谐波较敏感,因此受故障电流暂态过程影响较大,容易造成误判。本方法采用希尔伯特变换方差法和导数法相结合,使判据的安全性、灵敏性得到了很好的结合。

4 仿真计算

首先对上述希尔伯特变换方差法的 CT 饱和检测进行数字仿真,采用通用 ATP 电磁暂态仿真程序。

图 3 中电流互感器在故障后一周波内饱和,图中 3(a) 为二次电流波形,图 3(b) 为方差比值曲线,其中横线为门限值 0.15。由于此算法判别 CT 饱和需要一周波数据,因而图 3(b) 中前 20ms 内的值无意义。图中 3(c) 为二次电流导数模曲线。计算结果为:图 3 中值在 20ms 过门限值,在 32.5ms 达

到最大值 1.02。因为 CT 在故障开始后一周波内饱和,必须在整个周波内寻找饱和点,由图 3(c) 测得第一个饱和点在 8.0ms。因此从 CT 实际饱和到判别为饱和,时间延迟 12ms。

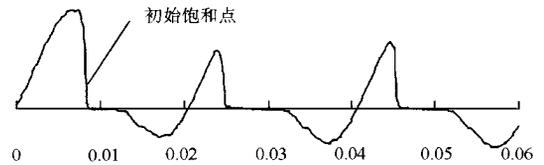


图 3(a) CT 二次电流

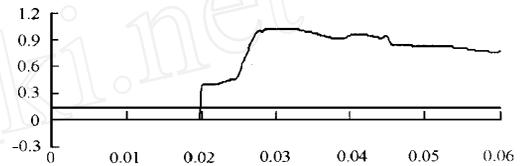


图 3(b) 方差比值

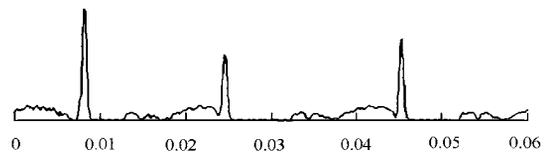


图 3(c) CT 二次电流导数模值

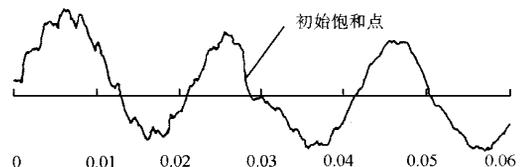


图 4(a) CT 二次电流

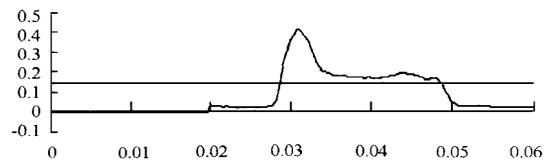


图 4(b) 方差比值

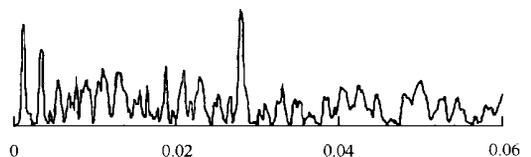


图 4(c) CT 二次电流导数模值

图 4 为长线路发生故障时情况。电流互感器在故障一周波后才开始饱和,且故障饱和前电流暂态

过程含有大量高次谐波。计算结果为：值在故障后29ms达到门槛值,在30.75ms内达到最大值0.42,测得第一个饱和点在28ms,从CT实际饱和到判别为饱和的时间延迟1ms。

由图4知,对于未饱和的CT二次电流(含有暂态分量),值很小,最大不超过5%。对于CT饱和后的二次电流,开始时由于 $x(n)$ 与 $y(n)$ 相差很小,也较小。随着时间推移,二次电流畸变逐渐增大,随之也逐渐增大,直至达到最大值。大量的仿真试验证明二次电流的值在CT饱和后10ms内均会超过15%,因此本文选择门槛值为15%是安全可靠的。

此外由图4知,尽管暂态过程二次电流含有高次谐波,但饱和点电流导数仍明显大于其他点的导数,导数法依然能够在一周波内精确地确定饱和点位置。

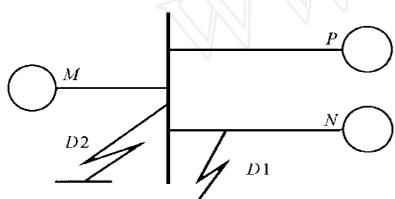


图5 系统接线图

下面对采用饱和点判别法计算 R 的磁制动母线保护进行仿真,采用的母线接线如图5所示, $D1$ 为区外故障点, $D2$ 为区内故障点。图6、图7分别为母线区外故障、区外转区内故障的情况。母线保护采用带制动特性的瞬时值差动保护,制动系数0.6,饱和点磁通取为1.1倍的 Ψ_{sat} (磁化曲线拐点磁通)。从图6中可以看出,母线区外故障CT未饱和时差动电流很小约为零,远小于制动电流,保护不误动,CT饱和后差动原理误动区在CT磁制动区以内,保护可靠不误动。图7中,母线在0.1s后由区外转为区内故障,CT在区外故障时已经饱和,在转化后一周波内虽然CT仍然饱和,但在CT线性区内,CT仍能判断为区内故障。保护在5ms内动作,切除故障母线。由图7(b)中可以看出,由于磁通 Ψ_{sat} 整定保守的缘故,CT线性区较实际略有缩小,但不影响保护的正確动作。

5 磁制动母线保护方案

根据以上研究结果,本文设计了如图8的磁制动母线差动保护方案。保护启动后在5ms内CT肯

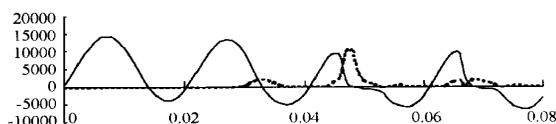


图6(a) 二次电流(实线)、差动电流(虚线)

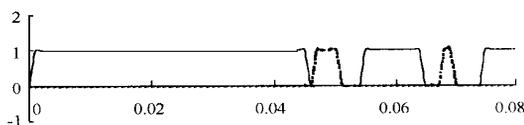


图6(b) 线性区(实线)、差动作区(虚线)

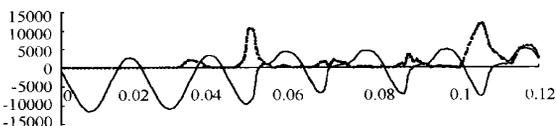


图7(a) 二次电流(实线)、差动电流(虚线)

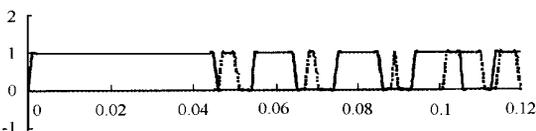


图7(b) 线性区(实线)、差动作区(虚线)

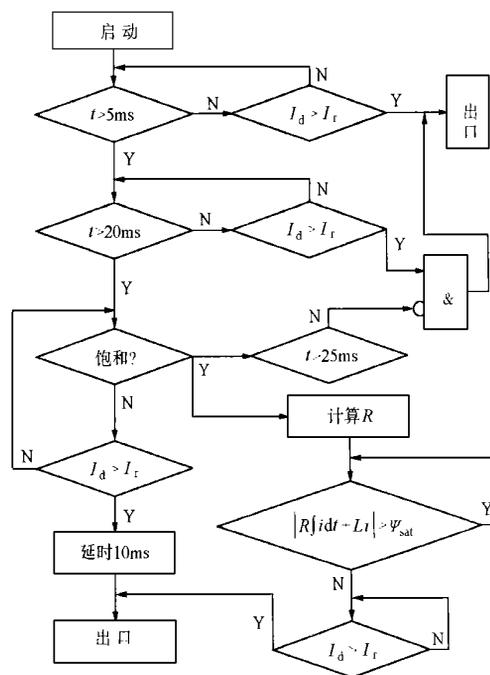


图8 保护框图

定没有饱和,可直接快速动作。一周波后开始根据式(10)计算,根据判断CT是否饱和。若CT饱和,则此刻前10ms内保护闭锁,同时通过导数法

求初始饱和点计算出二次电阻,以后根据式(4)决定CT线性传变区而开放母差保护;若CT未饱和,开放母差保护,延时10ms动作(10ms内判断CT没有饱和和动作),并继续计算、判断CT饱和。一旦判别CT饱和后,利用式(6)计算出 R ,然后采用磁链即式(4)判断CT的线性区,开放母差保护。

对于故障开始后的20ms内差动元件动作时,只要在故障开始后的25ms内没有判断为CT饱和,就可直接动作。

整个流程图中,对于各种故障情况动作时间:区内故障保护在5ms动作直接出口,没有延迟;区外故障(CT已经饱和)转区内故障,由于CT线性区开放,保护也直接出口;区外故障(CT没有饱和)转区内故障,保护最大延时10ms动作。

6 结语

(1)采用希尔伯特变换方差比值方法能正确地判断CT是否饱和,并能精确确定饱和点时刻。此方法不受暂态过程谐波影响,具有较高灵敏度与可靠性。

(2)利用实时测量CT二次电阻的方法,可以实时跟踪二次负载的变换,减少负载变换引起的线性区误判,从根本上解决了磁制动母线保护在实际应用中存在的问题。

(3)根据以上提供的保护方案,母线保护除故障开始一周波内饱和最多需要20ms动作外,在其他各种故障条件下CT饱和时最大延时为10ms。

参考文献:

- [1] 罗姗姗,贺家李,王荣琴,等. 母线保护中电流互感器饱和和检测性判据[J]. 电力系统及其自动化学报,1996,(3).
- [2] 马永生,何奔腾. 磁制动母线差动保护原理初探[J]. 继电器,1998,(9).
- [3] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 清华大学出版社,1997.

收稿日期: 1999-12-29

作者简介: 李忠安(1975-),男,硕士,从事母线保护的研究; 何奔腾(1959-),男,博士,副教授,从事电力系统及其自动化研究。

Study on the differential protection of busbar with magnetic restraint

LI Zhong-an, HE Ben-teng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: It proposes a method of detecting the secondary resistance R of CT on real time based on the principle of magnetic restraint differential protection for busbar. The simulation result shows that with this method, the initial saturation point of CT can be found correctly in despite of the influence from current transient and harmonics. It also can protect the magnetic restraint busbar protection from mal-operation possibly caused by variation of the secondary load of CT.

Keywords: magnetic restraint busbar protection; CT saturation; Hilbert transformation

欢迎订阅《继电器》杂志

《继电器》(月刊)是机械工业许昌继电器研究所主办的,《继电器》杂志社编辑出版的全国性综合技术期刊,是国家科技部中国科技论文统计源期刊,全国中文核心期刊,河南省优秀科技期刊。

本刊专业范围:近年来在加强传统的继电保护及自动装置的基础上,已拓宽到电网调度自动化;配电自动化;电力系统远动、通信;厂、站自动化;信息管理;电力系统稳定控制;电力电子在电力系统中的应用等整个电力相关自动化专业。

主要栏目有:理论研究及计算;设计开发与应用;专家论坛;新产品、新技术;现场经验交流;讨论园地;信息动态;综述等。本刊素以面向应用,为科研、生产第一线服务为宗旨,力求做到即有较高的学术性,又注重实用性,为科研、生产第一线的广大读者提供一个活跃的学术(技术)交流园地。为推广电力系统自动化科技成果,交流经验,发挥专业指导,促进生产,繁荣学术,培养人才,为加速我国电力工业发展,促进现代化建设服务。

本刊主要读者对象为电力行业从事科研、设计、运行、试验、制造、管理和营销等专业技术人员、技工以及相关专业的各大专院校师生,电力产品广大用户等。

欢迎广大读者订阅《继电器》杂志。邮发代号:36—135。

地址:河南省许昌市建设路183号(461000)

电话:(0374)3212254,3212554 E-mail: relay @ public 2. zz. ha. cn

订价:6元/期 72元/全年 鼓励个人订阅,50元/年(与编辑部直接联系)。