

基于采样值算法的数字母线保护的研究

程利军,杨奇逊

(北京华北电力大学,北京 100085)

摘要: 母线保护装置的可靠性关系到电力系统的安全、稳定运行。文中分析了母线保护的判据,提出了一种用于数字式母线保护装置的瞬时值的母线差动保护方案。该方案实现了母线保护的快速、较高的抗CT饱和的要求。此外还介绍了与母线保护配合的电压闭锁、母线充电保护、断路器失灵保护的原理及实现。已有采用此方案的数字式母线保护装置在电力系统中运行。

关键词: 数字母线保护; 采样值保护算法; 制动系数

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)06-0004-03

1 引言

母线保护必须满足各种不同类型的主接线的要求,并且对于可靠性、安全性、选择性、高速以及测量有较高的要求。

常规母线保护的動作判据是基于对母线上流入的连接元件与流出的连接元件的电流的比较,它反映了各个连接元件电流的矢量值(或有效值)。这个方法已成功地使用多年,电力系统利用此构成比率制动式电流差动保护,并应用于低阻抗、高阻抗式电流差动保护中。

数字式继电保护是用数学运算方法实现故障量的测量、分析和判断的。而基础是若干个离散的、量化的数字采样序列。计算机保护的一个基本问题是寻找适当的离散运算方法,使运算结果的精确度能满足工程要求而计算耗时又尽可能短。为此,国内外研究人员提出了许多适合于计算机保护的计算方法,如基于纯正弦变化的算法(半周最大值法、半周积分法、Manr-Morrison 导数法、Prodar-70)的二阶导数法、采样值积算法和解微分方程算法等;基于以非周期分量、基频和倍频分量为模型的富氏算法和与之相似的沃尔希函数算法等;基于以非周期分量、随机高频分量为模型的最小二乘法 and 卡尔曼滤波算法等。

现代母线保护装置的主要特征是动作速度快,整组动作时间小于10ms,具有较强的抗CT饱和的影响。这样就要求所采用的算法要简单、计算速度快,因此较长的数据窗的保护算法也不能使用。同时考虑到母线保护判据及CT饱和的特殊性,基于采样值的比率制动式电流差动保护就成为最佳选择。本文也论证了在一定的条件下,基于采样值算法的保护判据与常规的保护判据是等效的,前者甚至还

优于后者。

本文所涉及的数字式母线保护采用基于采样值的电流差动原理、电流相位比较原理及二者的组合而构成分相差动方案,并附以快速、灵敏的复合电压闭锁方案构成跳闸逻辑,在不需双重化或增加检测回路的情况下取得较高的可靠性。

此外,数字母线保护还包括断路器失灵保护、母线充电保护等后备保护。

2 常规母线保护涉及的原理及判据

2.1 电流差动保护判据

比率制动继电器将差动电流与穿越性制动电流相比较,以鉴别差动电流是故障电流还是不平衡电流。它能保证在区外故障时有良好的选择性,在区内故障时有很高的灵敏度。其基本动作判据可归纳表示为式(1)。

$$| \dot{I}_i | - K \cdot F(\dot{I}_i) > I_0 \quad (1)$$

式中: \dot{I}_i ——线路各端电流的相量和(规定各端电流的正方向为母线流向被保护线路);

$F(\dot{I}_i)$ ——制动量函数;

K ——制动系数;

I_0 ——差动保护的整定值。

制动量函数不同,构成各种各样的差动保护判据。而现在母线电流差动保护装置几乎均采用的判据如式(2),构成母线保护的主判据。

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{i=1}^m \dot{I}_i \right| > I_{d0} \\ & \left| \sum_{i=1}^m \dot{I}_i \right| > S \cdot \sum_{i=1}^m | \dot{I}_i | \end{aligned} \quad (2)$$

其中 S 为制动系数, I_{d0} 为整定值, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

2.2 过量/欠量保护判据

作为母差保护用电压闭锁,包含相电压、线电压、零序电压和负序电压闭锁;断线闭锁是检测各个连接元件的各相电流;断路器失灵保护起动元件是检测各个连接元件的各相电流;母线充电保护检测母联元件的各相电流等,它们均可以表示为过量或欠量保护。

过量保护可表示为式(3),欠量保护可表示为式(4),其中 Set 为定值, Y 代表电流、电压值。

$$|Y| \text{ Set} \quad (3)$$

$$|Y| \text{ Set} \quad (4)$$

3 基于采样值的母线保护判据

现代母线保护要求动作速度快的根本原因在于:当母线发生内部故障时,即使 CT 饱和母线保护也能抢在其饱和之前动作。根据分析,即使 CT 完全饱和,CT 的二次电流在故障开始时至少有 3 ~ 5ms 以上的线性传变区,因此母线保护整组动作时间小于 10ms 这一重要指标很自然地提出来。如果考虑出口继电器动作时间及其他因素,这就要求 5 ~ 8ms 内必须完成差动保护判据的计算并决定母线保护动作行为。这样,许多计算机保护的计算方法,如基于纯正弦变化的算法、基于以非周期分量、基频和倍频分量为模型的富氏算法和与之相似的沃尔希函数算法、基于以非周期分量、随机高频分量为模型的最小二乘法 and 卡尔曼滤波算法等等均不能很好地应用于母线保护中。

基尔霍夫第一定律所描述的“流入任何一个节点的各支路电流之和为零”的理论从根本上就是基于各个支路电流的瞬时值的,事实上,在任何时刻、任何节点(或封闭曲面)均满足上述定律,数学表达式如(5)。基尔霍夫第一定律的矢量形式如式(6),它是式(5)的一个特例。式(6)还指出“流入任何一个节点的各支路电流矢量在任意正交的坐标系的坐标轴上投影分量之和为零”。

$$\left| \sum_{j=1}^m I_j(k) \right| = 0 \quad (5)$$

$$\left| \sum_{j=1}^m I_j \right| = 0 \quad (6)$$

基于采样值算法的母线差动保护判据就是基尔霍夫定律的推广。

3.1 过量/欠量保护

过量保护的采样值判据可表示为式(7),欠量保护可表示为式(8),其中 Set 为定值, Y(k) 代表电流、电压量 Y 第 k 时刻的采样值。

$$|Y(k)| \text{ Set} \quad (7)$$

$$|Y(k)| \text{ Set} \quad (8)$$

用式(7)可以构成采样值的母联充电保护以及交流电流断线检测。

作为与母线保护配合的电压闭锁,为保证母差保护整组动作时间要短,电压闭锁的动作时间也要很快。整定时,按母线短路时考虑。用式(8)可以构成采样值的相电压、线电压、零序电压和负序电压闭锁。此外,采用式(9)的低电压突变判据,其中 U(k)、U(k-T) 分别为相电压、线电压、零序电压第 k、k-T 时刻的采样值, U_{set1} 为定值。

$$|U(k) - U(k - T)| U_{set1} \quad (9)$$

3.2 比例制动的差动判据

采用瞬时值比例制动电流差动保护方案,其判据为(10)。

$$\left| \sum_{j=1}^m I_j(k) \right| > I_{d0} \quad (10)$$

$$\left| \sum_{j=1}^m I_j(k) \right| > S * \sum_{j=1}^m |I_j(k)|$$

其中, S 为制动系数, I_{d0} 为整定值, I_j(k) 为第 j 个连接元件 k 时刻的电流采样值, j = 1, 2, ... m。

4 采样值判据的分析及实现

下面将推导出基于采样值算法的保护判据与常规的保护判据等效的条件。假设所有的电流、电压的波形是严格的正弦波。由于常规继电保护的惯例,上述的定值均为有效值,即为一个不随时间变化的确定值。由于正弦波是完全对称的,从理论上讲,如果采用覆盖 1/4 周波信息的采样值就能完全描述整个正弦波的信息。所以采用采样值判据时,如果连续 1/4 周波内有 (N/4 + 1) 个采样点均满足动作判据时,就能作出正确的判别。

4.1 过量/欠量保护判据

a) 过量保护

设 y = Y_m sin , Y_m 为正弦波的峰值。

要满足式(5),则 Y_m |sin| S

即 |sin| S/ Y_m

所以在 (0, /2) 内, arcsin(S/ Y_m)。

由于采样值是随时间而周期变化的,不是每个采样点均满足动作判据。设采样率为每周波 N 个采样点,在 N/4 个采样点中(设(0, /2)的 1/4 个周期内)仅当 k ·(2 · / N) > arcsin(S/ Y_m) 时,才满足动作条件。

b) 欠量保护

与过量判据分析相同,在 $N/4$ 个采样点中(设 $(0, \pi/2)$ 的 $1/4$ 个周期内)仅当 $k \cdot (2 \cdot \pi / N) < \arcsin(S/Y_m)$ 时,才满足动作条件。

4.2 比例制动的差动判据

a) 设 $|I_1| = |I_2| = I$, I_1 与 I_2 反相, α 为两电流的误差角。

从矢量方面考虑:

$$I_d = I \cdot \sin(\alpha) / \sin[(180 - \alpha)/2]$$

化简后得:

$$I_d = I \cdot \sin(\alpha) / \cos(\alpha/2) = 2 \cdot I \cdot \sin(\alpha/2)$$

$$I_f = 2 \cdot I$$

所以制动系数 S 为:

$$S = I_d / I_f = \sin(\alpha/2)$$

从采样值方面考虑,假设

$$i_1 = I \cdot \sin(\alpha) \quad i_2 = I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

则,

$$I_f = i_1 + i_2 = I \cdot \sin(\alpha) + I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

$$I_d = i_1 - i_2 = I \cdot \sin(\alpha) - I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

化简后得:

$$I_d = 2 \cdot I \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha - \alpha/2)$$

$$I_f = 2 \cdot I \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha - \alpha/2)$$

所以制动系数 S 为:

$$S = I_d / I_f = \text{tg}(\alpha/2) \cdot \text{tg}(\alpha - \alpha/2)$$

比较 S 、 S' , 如果采样值判据与矢量判据等效, 则 $S = S'$,

$$\sin(\alpha/2) = \text{tg}(\alpha/2) \cdot \text{tg}(\alpha - \alpha/2)$$

因为 $0^\circ < \alpha < \pi/2$, $\cos(\alpha/2) > 1$, 所以,

$$\text{tg}(\alpha - \alpha/2) = 1$$

即在 $(0, \pi/2)$ 内 $(\alpha - \alpha/2) = \pi/4$, 采样值判据与矢量判据等效。根据正切函数的单调性, 在 $(0, \pi/2)$ 的区间内, 当 $\pi/4 < (\alpha - \alpha/2) < 3 \cdot \pi/4$ 时, 采样值判据的制动效果比矢量判据制动效果好, 它覆盖了 $1/4$ 周期的信息。同理, 在 $(\pi/2, \pi)$ 的区间内仍然存在上述结论。

这样从采样值的制动效果方面看, 如果充分利用 $1/4$ 周期的有效采样值, 就能保证基于采样值的比例制动差动判据的可靠性至少不低于常规的基于矢量的比例制动差动判据。即每周波采样点数 M 必须满足式(11), 其中 N 为每周波采样点的数目, T 为正弦波的周期, T_s 为采样周期。

$$M \cdot \frac{1}{4} \cdot N + 1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{T}{T_s} + 1 \quad (11)$$

b) 设 $|I_1| = n \cdot |I_2| = n \cdot I$, I_1 与 I_2 反相, α 为

两电流的误差角。

从矢量方面考虑:

$$I_d = I \cdot \sqrt{1 + n^2 - 2 \cdot n \cdot \cos(\alpha)}$$

$$I_f = I \cdot (n + 1)$$

所以制动系数 S 为:

$$S = I_d / I_f = \frac{\sqrt{1 + n^2 - 2 \cdot n \cdot \cos(\alpha)}}{1 + n}$$

从采样值方面考虑, 假设

$$i_1 = n \cdot I \cdot \sin(\alpha) \quad i_2 = I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

则,

$$I_f = i_1 + i_2 = n \cdot I \cdot \sin(\alpha) + I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

$$I_d = i_1 - i_2 = n \cdot I \cdot \sin(\alpha) - I \cdot \sin(\alpha - \alpha)$$

化简后得:

$$I_d = I \cdot [\sin(\alpha) \cdot (n - \cos(\alpha)) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha/2)]$$

$$I_f = I \cdot [\sin(\alpha) \cdot (n + \cos(\alpha)) - \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha/2)]$$

所以制动系数 S 为:

$$S = I_d / I_f = \frac{\text{tg}(\alpha) \cdot (n - \cos(\alpha)) + \sin(\alpha/2)}{\text{tg}(\alpha) \cdot (n + \cos(\alpha)) - \sin(\alpha/2)}$$

因为 $0^\circ < \alpha < \pi/2$, $\cos(\alpha/2) > 1$, $\sin(\alpha/2) > 0$, 所以近似得到 $S = S'$ 即采样值的比例制动差动判据与矢量的比例制动差动判据几乎相等, n 值越大, 效果越明显, 仅当 $n=1$ 时, 得到与 (a) 节相同的结论。

4.3 采样值算法的实现

总之, 采样值算法的比例制动差动判据, 只要满足式(11), 在任何情况下效果均很明显。考虑到正弦波过零点时判据的可靠性, 使用此判据时, 所采用的数据窗的长度取为 $M+1$, 保守时数据窗的长度取为 $M+2$, 即在连续 $(M+2)$ 个采样值中, 如果有 M 个采样点满足动作判据, 则构成出口条件。

过量/欠量保护判据为了同差动判据统一, 也采用相同的方法。由于采样的离散性, 采样值保护判据的精度不是象矢量判据那样高, 但一般能达到 $\pm 10\%$ 的误差范围。

此外, 采样值算法受系统谐波影响较大, 对数据采集系统有一定的要求。同时一味地增大采样点数目不可能无限地提高动作效果。

采用采样值算法, 可以提高保护动作速度, 即直接利用电流瞬时值进行计算比较, 只要 CT 能真实传变二次电流, 差动保护判据对每个采样点都是有效的。

为了提高保护的可靠性和抗干扰能力, 应提高采样率以增加计算比较次数。例如 (下转第 18 页)

版社,1997.

- [4] 周强,易先举等. 三峡左岸电站发电机-变压器组保护方案. 电力系统自动化,1999,(11).
- [5] 尹项根,陈德树等. 故障分量差动保护. 电力系统自动化,1999,(11).

收稿日期: 1999-12-02

作者简介: 邵能灵(1972-),男,博士生,研究领域为大机组保护; 尹项根(1956-),男,博导,主要从事继电保护、配网自动化的研究。

Analysis and application of injection voltage scheme against generator stator ground faults

TAI Neng-ling, YIN Xiang-gen, HU Yu-feng, CHEN Hao, CHEN De-shu
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stator ground fault protection with injection voltage can provide 100% winding's protection. Based on detailed analysis of fault current with the internal resistance of voltage source considered, the more effective fault contribution current is induced, and the application of it is also highlighted, which can obtain higher sensitivity.

Keywords: stator ground fault protection; injection voltage; sensitivity

(上接第6页)

采样率是16点/周,连续计算、判断7点,如果有5点电流满足式(10),就判为母线内部故障,这样故障检测时间为5~7ms。

对于双母线系统,利用式(10)分别进行大差和各段母线的小差电流计算、判断,大差电流计算使用母线上除母联和分段外所有连接元件,作为故障启动元件。小差电流计算用各段母线上所有连接元件,作为故障选择元件。只有大差、小差同时动作,才启动母线保护出口跳闸回路。

5 结论

基于采样值算法的计算机保护方案已成功运用于快速母线保护、光纤电流差动的线路保护和变压器保护中,并有大批基于此原理的保护装置应用于实际电力系统中。实践证明,这是一种切实可行的方案。

参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理及技术. 水利电力出版社,1992.
- [2] 陈德树等. 采样值电流差动微机保护的一些问题. 第六届全国继电保护学术研讨会论文集,1996,11.
- [3] 程利军. 广东茂名500kV变电站220kV微机母线保护装置的研究. 继电器,2000,(2).
- [4] 程利军等. 自适应式微机母线保护装置的研究. 电网技术,1996,(9).

收稿日期: 2000-01-04; 改回日期: 2000-02-18

作者简介: 程利军(1966-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为计算机在电力系统继电保护及自动控制中的应用; 杨奇逊(1937-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事电力系统继电保护与自动化的研究开发与教学工作。

The research of the sampling arithmetic for numeric busbar protection

CHENGLi-jun, YANG Qi-xun

(Beijing North China Electric Power University, Beijing 100085, China)

Abstract: The reliability of busbar protection has influenced the safe and stable operation of electric power system. Analyzed the criteria of busbar protection, the sampling arithmetic used for numeric busbar protection is presented in this paper. Using this theory, the high speed for operation and stability for CT saturation of busbar protection is satisfied. The theories for voltage protection, charging protection and current break failure protection are also introduced. Hundred of protections using the sampling arithmetic have been served in electric power system.

Keywords: numeric busbar protection; sampling arithmetic; slope for differential relay