

基于暂态电流谱能量的母线保护新原理

李海锋, 王 钢, 李晓华

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 提出了一种基于故障暂态电流的母线保护新原理。利用小波变换提取母线上各回路故障暂态电流高频分量, 通过比较各暂态高频电流在一定时窗内的谱能量实现母线内、外部故障的快速、可靠判别, 从根本上避免了电流互感器饱和问题的影响; 结合一个半断路器母线接线方式, 给出了相应的母线保护方案; 通过 ATP-EMTP 对实际电网的大量仿真计算, 验证了所提出原理的正确性和有效性。

关键词: 母线保护; 小波变换; 暂态电流; 谱能量

中图分类号: TM772

0 引言

现有的微机母线保护主要基于电流差动和电流比相式两种原理, 其最大缺点是抗电流互感器(TA)饱和能力差。解决这一问题的主要方法是检测 TA 的饱和程度, 在 TA 饱和阶段闭锁保护装置。但这些 TA 饱和检测算法^[1~3]并没有从保护原理上根本解决问题。

实际上, 系统发生故障后, TA 并不会立刻发生饱和, 从故障前的线性传变区变化到故障后的严重饱和需要一定时间, 在最严重的情况下, 这一时间不会少于 5 ms^[4]。因此, 如果能够在 TA 过渡到严重饱和状态之前, 完成母线内外部故障的快速判别, 则可从原理上避免 TA 饱和问题的影响。传统的基于工频量的保护方案显然不能满足这一要求。为此, 人们提出了基于故障行波的母线保护原理, 通过比较母线上各回路的行波波头信息实现内、外部故障判别^[5~8], 可实现母线保护的超高速动作, 但都依赖于故障初始行波波头极性的准确捕捉。本文提出了一种基于故障暂态电流的母线保护新原理。该原理基于小波变换提取母线上各回路故障暂态高频电流, 利用其在一定时间窗内的谱能量构成暂态母线保护判据, 能在 TA 饱和之前快速、可靠地识别母线的内、外部故障, 从根本上避免了 TA 饱和问题的影响。

1 基本原理

图 1 所示为一单相母线模型, 其中 $L_1, L_2, \dots, L_N$ 分别为母线所连接的 N 个回路, C_s 为母线的等效杂散电容, 其大小由母线上所连接的互感器、断路

器等设备的对地电容决定, 典型值为 $0.1 \mu\text{F}$ 。 C_s 的存在将使流经母线的暂态高频电流产生衰变。

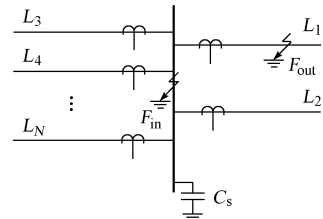


图 1 母线结构
Fig. 1 Busbar configuration

系统中某点发生故障时, 根据叠加原理可将故障量分解为两部分的叠加: 故障前负荷分量和故障附加分量, 即短路电流由负荷分量和故障分量合成^[9]。图 2(a) 和图 2(b) 分别为图 1 所示系统在 F_{in} (母线内部) 和 F_{out} (母线外部) 处故障时, 所对应的系统故障附加分量等值电路图。

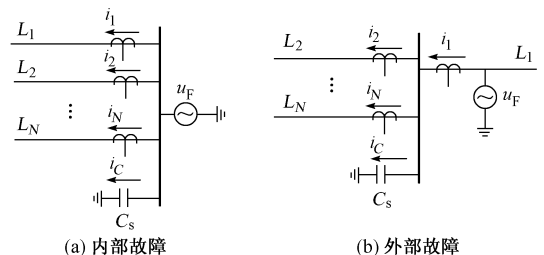


图 2 母线的故障附加电路
Fig. 2 Superimposed components used for fault

由图 2(a) 可见, 当母线上 F_{in} 点发生内部故障时, 故障附加电源 u_F 产生的暂态电流是直接由母线流向各回路, 每个回路的暂态电流大小相近。对于其中高频分量而言, 尽管 C_s 的存在使流入各回路的暂态高频电流减少, 但并不会改变上述的特征。而

当母线上某一回路(这里是 L_1) F_{out} 点发生外部故障时(见图 2(b)), 暂态电流是先流过故障回路 L_1 , 再经母线流向其他非故障回路, 此时尽管各非故障回路的暂态电流仍然保持大小相近的特点, 但故障回路暂态电流则变得远大于其他非故障回路, 且近似等于各非故障回路之和。对于其中的高频分量, 由于母线杂散电容 C_s 衰减作用明显, 更将使故障回路的暂态高频电流明显大于各非故障回路之和。

因此, 故障发生后, 可通过比较母线上各回路暂态电流高频分量的大小, 有效地区分母线的内外部故障。亦即: 若存在某一回路的暂态高频电流远大于剩余回路暂态高频电流之和, 判为外部故障; 反之, 则为内部故障。

2 基于小波变换的母线保护判据

暂态电流高频分量的可靠、准确提取是实现上述母线保护原理的关键所在。小波理论为此提供了有效的手段^[10]。信号的小波变换在各尺度下的输出反映了该信号各频段成分随时间变化的规律。故障暂态电流小波变换在小尺度上的输出, 反映了暂态电流的高频特性, 可用以构成母线保护判据。

首先给出各回路暂态电流小波变换谱能量 I_j 的算式为:

$$I_j = \sum_{k=1}^P W i_j^2(k) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $W i_j$ 为母线上回路 j 暂态电流的小波变换输出; P 为计算谱能量的时窗所对应的小波变换输出点数。

由此可得, 发生故障时母线上各回路暂态高频电流谱能量的最大值为:

$$M(I) = \max(I_1, I_2, \dots, I_N) \quad (2)$$

剩余回路的谱能量之和为:

$$R(I) = \sum_{j=1}^N I_j - M(I) \quad (3)$$

当满足式(4)时, 可判为母线外部故障, 否则为内部故障:

$$M(I) > \lambda_1 R(I) \quad (4)$$

式中: λ_1 为可靠系数, 其值大于 1。

实际计算中, 对于三相系统应利用模量变换把三相系统从相空间变换到模空间, 以去除各相间的电磁耦合。

3 保护原理的性能分析

3.1 开关操作的影响

输电线路的开关操作包括线路跳闸、空载合闸、重合闸等。开关开合时, 同样会产生暂态高频电流, 基于暂态高频分量的保护原理都必须考虑其影响。开关操作暂态不会使本文所提出的母线保护误动,

下面以图 3 所示开关操作时的附加电路图说明这一问题。

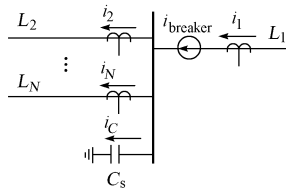


图 3 开关操作时的附加电路

Fig. 3 Superimposed components used for switching

假设对线路 L_1 进行开关操作, 不管是分还是合, 根据叠加原理, 其对应的附加电路都可用图 3 表示^[9]。对图 3 分析可知, 从暂态电流的大小看, 尽管附加暂态电流源在保护区内, 但其产生的暂态电流分布还是等效于暂态电流先经过线路 L_1 , 再经过母线流向其他线路, 这与母线外部故障时的情况是相同的。因此, 线路开关的操作不会引起保护的误动。

3.2 母线结构的影响

母线保护的连接元件为母线上的输电线路和电力变压器回路。其中, 变压器本身为一电感元件, 对于暂态高频分量而言, 相当于开路。尽管它也存在一定数值的对地电容(约几 nF), 但与输电线路相比, 故障时流入变压器回路的暂态高频电流还是比较小。因此, 主要考虑输电线路变化对判据的影响。

当母线上接有 3 回及以上输电线路时, 即使不考虑母线杂散电容, 对于母线的内、外部故障, 保护都能正确动作; 当母线上接有 2 回输电线路时, 母线杂散电容的存在, 使母线外部故障时仍然有故障回路的暂态高频电流大于其余的非故障回路这一特征, 保护不会误动; 当母线上只接有 1 回输电线路时, 母线的内部故障也将具有外部故障的特征, 基于暂态高频电流的母线保护判据将无法对其进行区分, 即母线保护失效。当然, 对于实际的超高压变电站, 很少出现只有一回输电线路的情况。

4 一个半断路器接线方式的母线保护方案

一个半断路器母线接线方式是超高压变电站高压母线常用的接线方式^[11](见图 4)。图中, 母线组 I, II 各连接 3 个回路, 分别为 L_{I1}, L_{I2}, L_{I3} 和 $L_{II1}, L_{II2}, L_{II3}$ 。在这种接线方式下, 母线保护除了具有很好的区分内部和外部故障的选择性外, 还应具备区分出故障母线组的选择性。

对于一个半断路器母线接线, TA 的配置有多种方式, 所对应的母线保护方案也有所不同。既可以利用线路侧 TA 构成对整个母线系统(两组母线)的保护方案, 也可以利用母线侧 TA 分别实现对每组母线的保护, 如图 4 所示。这里以后者为例讨论

一个半断路器母线接线的保护方案。

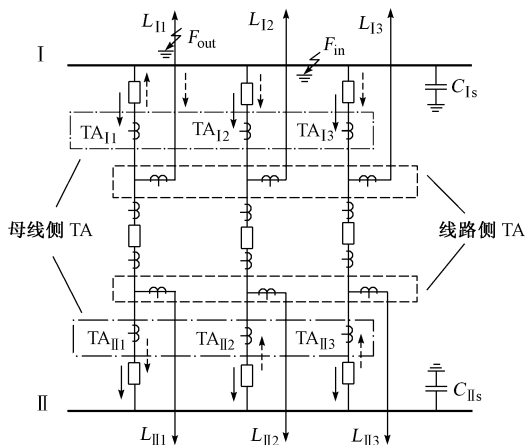


图4 一个半断路器母线接线

Fig. 4 Busbar configuration of one and half breaker

由图4可见,由 TA_{I1} , TA_{I2} , TA_{I3} 构成母线组I的保护;而 TA_{II1} , TA_{II2} , TA_{II3} 则构成母线组II的保护。

回路 L_{I1} 发生母线区外故障时,对于母线组I,暂态高频电流是先流经 TA_{I1} ,再经过母线I流向 TA_{I2} , TA_{I3} ,见图4中的虚线箭头。此时 TA_{I1} 所检测到的暂态高频电流将远大于 TA_{I2} 和 TA_{I3} 所检测到的暂态高频电流,利用式(4)的判据可以准确判别为母线组I的外部故障。同理,对于母线组II也有相似的过程。

母线组I发生内部故障时,暂态高频电流则是直接流向 TA_{I1} , TA_{I2} 和 TA_{I3} ,如图4中实线箭头所示。此时,各TA所检测到的暂态高频电流大小相近,利用式(4)的判据可判为母线组I的内部故障。而对于母线组II,由于其母线杂散电容的存在,使 TA_{II1} , TA_{II2} , TA_{II3} 检测到的暂态高频电流不为0,当母线结构对称时,各暂态电流还将具有大小相近的特点,从而使母线组II的保护误动。因此,为了保证母线内部故障时对故障母线组的选择性,必须采用附加判据。

母线组I内部故障所产生的暂态高频电流,在流经 TA_{II1} , TA_{II2} , TA_{II3} 前都必先经过所连接回路的分流,其大小必然远小于 TA_{I1} , TA_{I2} , TA_{I3} 中的暂态电流,利用这一特点可以区分故障母线组。计算母线组I, II所属各回路暂态高频电流谱能量之和:

$$S(I_i) = \sum_j I_{ij} \quad (5)$$

式中:下标 i 表示母线组别,分别取I和II。

则母线组I故障的判据为:

$$S(I_I) > \lambda_2 S(I_{II}) \quad (6)$$

式中: λ_2 为可靠系数,其值大于1。

5 实际系统的仿真分析

本文利用ATP-EMTP对实际母线系统进行了大量的仿真计算,以验证本文所提出的母线保护原理。图5所示为某500 kV变电站高压母线系统的接线图,该母线系统采用了一个半断路器的接线方式,共接有8个回路,其中6回为输电线路,2回为变压器。仿真计算中,采样频率为200 kHz,采用db4小波对暂态电流进行小波变换,取尺度1上的输出计算暂态高频电流的谱能量,能量时间窗长度取1 ms,即 $P=100$ 。

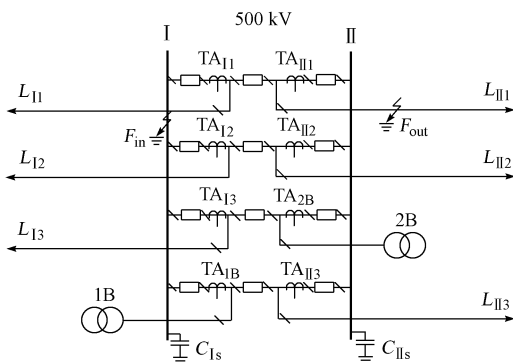


图5 500 kV 母线接线

Fig. 5 500 kV busbar configuration

表1给出了输电线路 L_{II1} 上 F_{out} 点发生母线外部故障时的部分仿真计算结果。由表1可见,对于各种类型的母线外部故障,利用判据式(4)均能准确识别。表2给出了母线组I发生内部故障时的计算结果。在发生内部故障时,利用判据式(4),母线组I和II都将判为各自的内部故障,此时利用附加判据式(6)即能可靠地识别发生故障的母线组。

表1 母线外部故障时的计算结果
Table 1 Results of busbar external faults

故障位置	故障类型	母线组别	$M(I)$	$R(I)$	内、外部故障判别
母线外部故障 F_{out} 点故障	A相接地短路	I	25.60×10^6	0.94×10^6	外部故障
		II	74.13×10^6	2.12×10^6	外部故障
	AB接地短路	I	38.58×10^6	1.41×10^6	外部故障
		II	111.86×10^6	3.51×10^6	外部故障
	AB短路	I	30.14×10^6	1.12×10^6	外部故障
		II	87.42×10^6	2.75×10^6	外部故障
	三相短路	I	60.00×10^6	2.27×10^6	外部故障
		II	174.04×10^6	5.48×10^6	外部故障

上述仿真计算表明,基于暂态高频电流的母线保护方案能在故障发生后几ms内可靠地判别出母线的内外部故障,不但保证了母线保护的動作速度,也避免了TA饱和问题的影响。此外,母线保护在进行故障判别时,只需获取各回路的谱能量信息,所需交换的信息量很小,具备了实用的可能性。

表 2 母线内部故障时的计算结果
Table 2 Results of busbar internal faults

故障位置	故障类型	母线组别	M(I)	R(I)	内、外部故障判别	S(I)	故障母线组判别
母线组 I 内部 F _{in} 点故障	A 相接地短路	I	4.50×10 ⁶	12.20×10 ⁶	内部故障	16.70×10 ⁶	母线组 I
		II	2.89×10 ⁶	7.36×10 ⁶	内部故障	10.25×10 ⁶	
	AB 相接地短路	I	6.88×10 ⁶	18.51×10 ⁶	内部故障	25.39×10 ⁶	母线组 I
		II	4.34×10 ⁶	10.95×10 ⁶	内部故障	15.29×10 ⁶	
	AB 相短路	I	5.39×10 ⁶	14.76×10 ⁶	内部故障	20.15×10 ⁶	母线组 I
		II	3.39×10 ⁶	8.12×10 ⁶	内部故障	11.51×10 ⁶	
	三相短路	I	10.74×10 ⁶	28.90×10 ⁶	内部故障	39.64×10 ⁶	母线组 I
		II	6.75×10 ⁶	16.79×10 ⁶	内部故障	23.54×10 ⁶	

6 结语

本文提出了一种基于故障暂态电流的母线保护新原理。该原理利用小波变换提取母线上各回路故障暂态电流高频分量,通过比较各暂态高频电流在一定时窗内的谱能量实现母线内、外部故障的快速、可靠判别,从根本上避免了 TA 饱和问题的影响。ATP-EMTP 对实际电网的大量仿真计算结果表明:所提出的母线保护方案正确、有效,具有实用的可能性。

参考文献

[1] ANDOW F, SUGA N, MURAKAMI Y et al. Microprocessor Based Busbar Protection Relay. In: Proceedings of 5th International Conference on Developments in Power System Protection. London (UK); IEE, 1993. 103—106.

[2] CESAREO F. An Impedance-based CT Saturation Detection Algorithm for Busbar Differential Protection. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 468—472.

[3] 李贵存,刘万顺,贾清泉,等.利用小波原理检测流互感器饱和的新方法.电力系统自动化,2001,25(5):36—44.

LI Gui-cun, LIU Wan-shun, JIA Qing-quan et al. A New Method for Detecting Saturation of Current Transformer Based on Wavelet Transform. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 36—44.

[4] 何奔腾,马永生.电流互感器饱和对母线保护的影响.继电器,1998,26(2):16—20.

HE Ben-teng, MA Yong-sheng. The Influence for Current Transformer Saturation on Bus Protection. Relay, 1998,

26(2): 16—20.

[5] 陈青,潘贞存,江世芳.极性比较式母线保护的研究.电力系统及其自动化学报,1996,8(1):41—46.

CHEN Qing, PAN Zheng-cun, JIANG Shi-fang. The Study of Bus Protection of Polarity Comparison. Proceedings of the EPSA, 1996, 8(1): 41—46.

[6] 葛耀中,董杏丽,董新洲,等.基于小波变换的电流行波母线保护的研究(一)——原理与判据.电工技术学报,2003,18(2):95—99.

GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou et al. A New Busbar Protection Based on Current Traveling Waves and Wavelet Transform (1)——Principle and Criterion. Transactions of CES, 2003, 18(2): 95—99.

[7] 李海锋,王钢,丁宇.超高速暂态方向母线保护的研究.继电器,2003,31(6):13—18.

LI Hai-feng, WANG Gang, DING Yu. Study of Transient Based Directional Comparison Ultra-high-speed Bus Protection. Relay, 2003, 31(6): 13—18.

[8] 段建东,张保会,张胜祥.利用线路暂态行波功率方向的分布式母线保护.中国电机工程学报,2004,24(6):7—12.

DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHANG Sheng-xiang. A Distributed Bus Protection Using Transient Traveling Wave Power Directions of Transmission Lines. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 7—12.

[9] 贺家李,葛耀中.超高压输电线故障分析与继电保护.北京:科学出版社,1987.

HE Jia-li, GE Yao-zhong. Fault Analysis and Protective Relaying for EHV Transmission Line. Beijing: Science Press, 1987.

[10] 杨福生.小波变换的工程分析与应用.北京:科学出版社,1999.

YANG Fu-sheng. Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform. Beijing: Science Press, 1999.

[11] 王春生,卓乐友,艾素兰.母线保护.北京:中国电力出版社,1997.

WANG Chun-sheng, ZUO Le-you, AI Su-lan. Busbar Protection. Beijing: China Electric Power Press, 1997.

李海锋(1976—),男,博士,研究方向为电力系统继电保护。E-mail: lihf@scut.edu.cn

王 钢(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、电力电子。

李晓华(1975—),女,博士,讲师,主要从事电力系统继电保护的学科科研工作。

A Novel Busbar Protection Based on Transient Current Spectrum Energy

LI Hai-feng, WANG Gang, LI Xiao-hua
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper proposes a novel transient current based protection technique for busbar. The proposed technique uses wavelet transform to extract the high-frequency components of fault-generated transient currents in all circuits connected to the busbar. By comparing their spectrum energies in a given time, an internal or external fault can be identified before current transformer saturation occurs. The protection scheme for busbar configuration of one and half breaker is also discussed. The EMTP simulation shows that the scheme is correct and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: busbar protection; wavelet transform; transient current; spectrum energy