

电流互感器饱和对低压电动机保护的影响及对策

于梦瑶, 于群, 史建省, 张智宇, 王文涛

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 目前电动机综合保护装置被广泛应用于工业生产中, 但由于电流互感器参数选型不当, 在定子绕组短路电流过大时, 电流互感器容易发生饱和而使电动机综合保护装置误动作。利用 PSCAD 软件, 对低压电动机定子绕组故障时保护用电流互感器和电动机综合保护装置内微型电流互感器的性能进行仿真分析后, 提出了在电动机保护装置的继保算法中加入三采样算法的措施, 并借助 Matlab/Simulink 进行仿真验证。该措施克服了在电流互感器饱和的情况下, 因傅里叶算法采样时间过长而造成电动机综合保护装置的主保护不能可靠动作的弊端, 提高了低压电动机保护装置运行的安全可靠性能。

关键词: 电力系统; 电动机; 电动机综合保护装置; 电流互感器; 饱和特性

Influences and countermeasures for saturation of current transformers on low voltage motors protections

YU Meng-yao, YU Qun, SHI Jian-sheng, ZHANG Zhi-yu, WANG Wen-tao

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: At present motor integrated protection device is widely used in industrial production. However, when stator winding short-circuit current is too large, it is easy to lead to the current transformer in saturation state thus cause the malfunction of the motor integrated protection device, because of the improper selection of parameters of current transformer. Therefore, by using the PSCAD/EMTDC software and simulation analyzing the performance of the current transformer for protection and miniature current transformer of motor integrated protection device after the low voltage motor stator winding fault, this paper puts forward to add the three sampling algorithm in motor protection device protection algorithm. Meanwhile, it takes advantage of MATLAB/Simulink's simulation to verify the proposed measure. Besides, this measure overcomes the disadvantage of motor integrated protection device's unreliable action as the main protection in the saturation of the current transformer, which is caused by the long sampling time of Fourier's algorithm. So it could improve the safety and reliability of the low voltage motor protection device's operation.

Key words: electric power system; motor; motor integrated protection device; current transformer; saturation characteristic

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0078-05

0 引言

在石油、化工、煤炭、钢铁、冶金等工业领域的供电系统中, 低压电动机得到了广泛的应用^[1]。但由于在电网中存在负载波动等原因, 使得电动机容易出现诸如过电流等一系列的问题。此时若保护装置不能快速可靠的动作, 电动机就会被烧坏, 从而影响工业生产^[2]。因此, 继电保护装置对于低压电动机乃至整个低压供电系统来说都有非常重要的作用。

在实际生产中, 因低压电动机综合保护装置具有价格便宜、体积小等优点而得到了广泛的使用。但不同容量和规格的电机要配备不同的互感器^[3],

因而通用性差。再加上电气设备厂家间常用降价来增加竞争优势, 这就造成了一些厂家忽视保护装置中一些器件的性能, 特别是电流互感器的性能。这些问题使得电动机在负荷变化较大时^[4], 特别是在定子绕组发生故障时, 很可能因短路电流过大而造成电流互感器的饱和^[5], 引起电动机综合保护装置的拒动或误动。在这样的情况下, 铁芯的饱和又是电流互感器一个不容忽视的特性^[6]。因此, 本文将通过研究保护用电流互感器与电动机综合保护装置内微型电流互感器的饱和特性对电动机保护的影响的问题, 提出提高低压电动机综合保护装置动作可靠性^[7]的措施。

1 低压 380 V 电动机综合保护装置模型简介

针对目前低压电动机定子绕组故障时可能发生的电流互感器的饱和问题, 本文利用了 PSCAD 软件搭建了安装在低压 380 V 侧电动机综合保护装置的模型如图 1 所示, 图中包括了低压 380 V 供电系统中串入一次侧保护用电流互感器以及其配套的电动机综合保护装置中的微型电流互感器(图中与低压电网直接串联的一次侧的保护用电流互感器将在下文中简称为大 CT, 而集成于电动机综合保护装置内的微型电流互感器将在下文中简称为小 CT)。

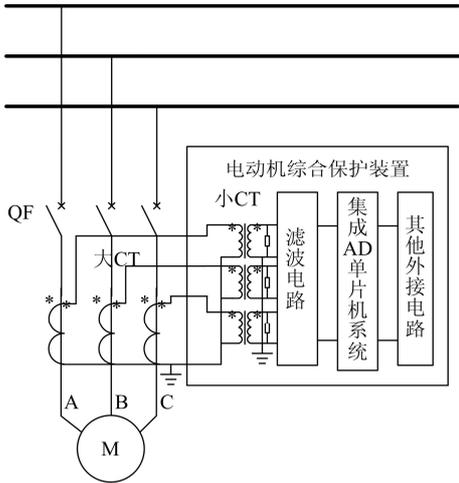


图 1 低压 380 V 电动机综合保护装置模型简介

Fig. 1 Model of the low voltage 380 V motor integrated protection device

2 利用 PSCAD 软件对电流互感器性能进行仿真分析

2.1 仿真模型的建立

本文利用 PSCAD 软件搭建了针对低压 380 V 电动机运行时定子绕组故障的简单模型, 如图 2 所示。

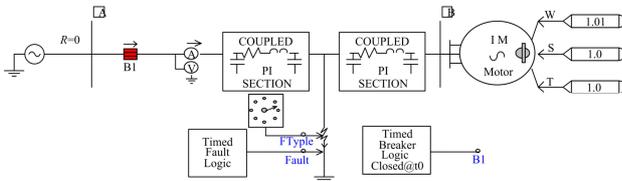


图 2 低压电动机定子绕组故障模型

Fig. 2 Stator winding fault model of low voltage motor

由于常用的电磁暂态仿真程序 PSCAD 中, 没有提供一个较为完善的保护用电流互感器模型, 而其自带元件库中使用较为广泛的是基于 Langevin 函数的 JA 模型^[8]。为模拟实际运行时电流互感器

的电磁过程, 本文利用基于 JA 模型的自定义模块来进行电流互感器特性的仿真, 如图 3、图 4 所示。

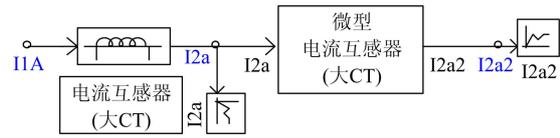
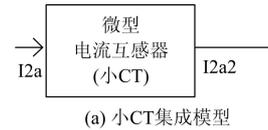
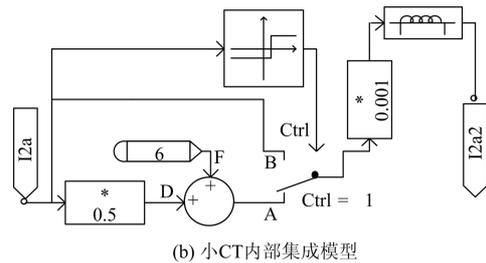


图 3 电流互感器模型

Fig. 3 Current transformer's model



(a) 小 CT 集成模型



(b) 小 CT 内部集成模型

图 4 微型电流互感器(小 CT)模型

Fig. 4 Miniature current transformer's model

2.2 仿真结果与分析

由于定子绕组的相间短路故障是电动机的主要故障^[9], 因此, 在一切电动机上都必须装设相间短路的保护作为主保护^[10]。故本文将故障设置为电动机定子绕组的 AB 两相短路故障, 通过观察大 CT 和小 CT 采集出的 A 相的电流波形, 来说明电流互感器在故障时对低压电动机综合保护装置的影响。

其中, 针对低压线路用于 380 V 侧串接电动机综合保护装置用的保护用电流互感器的饱和程度的不同, 可将电流互感器对电动机综合保护装置的影响分为以下三种情况。

(1) 保护用电流互感器(大 CT)未饱和

当对大 CT 参数的选择特别是变比的选择考虑到实际运行的情况时, 即使发生故障, 两个电流互感器均不会发生饱和, 二次侧能正确反映故障信息(如图 5、图 6 所示)。此时, 低压电动机综合保护装置中依据电流整定值动作的主保护^[10]能够正确动作。

(2) 保护用电流互感器(大 CT)轻度饱和

当电流互感器的变比选择过小, 且在低压电动机定子绕组发生故障时, 大 CT 很可能发生饱和。当大 CT 饱和程度不大时, 大、小 CT 仿真波形如图 7、图 8 所示。

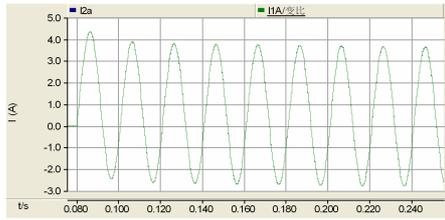


图 5 故障后大 CT 两侧波形对比

Fig. 5 Waveform comparison of large CT after failure

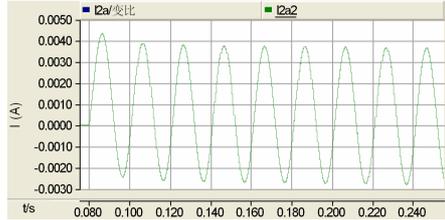


图 6 故障后小 CT 两侧波形对比

Fig. 6 Waveform comparison of small CT after failure

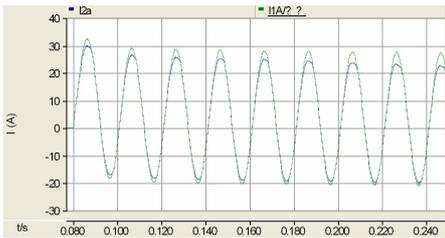


图 7 故障后大 CT 两侧波形对比

Fig. 7 Waveform comparison of large CT after failure

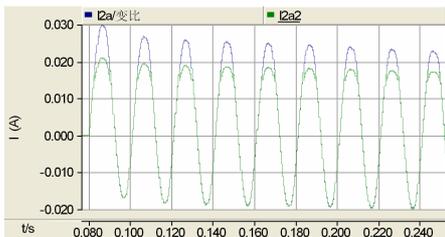


图 8 故障后小 CT 两侧波形对比

Fig. 8 Waveform comparison of small CT after failure

通过 PSCAD 中的“Single Phase RMS Meter”模块测量后经计算得出，图 7 中由大 CT 的饱和造成的电流误差为 13.185%。

同样，图 8 中由于小 CT 的饱和造成的电流误差为 4.142%。通过对图 7、图 8 两电流互感器仿真特性进行分析可以看出：大 CT 发生饱和程度不大时，其二次侧的电流值超过了小 CT 的额定准确限值一次电流，引起小 CT 发生饱和。经误差分析可知：由大 CT 引起的误差比小 CT 要大。因此，低压电动机综合保护装置能否正确动作主要取决于大

CT 在线路故障时的特性。经分析可知在此种情况下，有可能引起低压用电动机综合保护装置中基于电流整定值动作的主保护不动作。

(3) 保护用电流互感器（大 CT）深度饱和
当低压电动机定子绕组发生故障大 CT 的饱和程度比较严重时，大、小 CT 的仿真波形如图 9、图 10 所示。

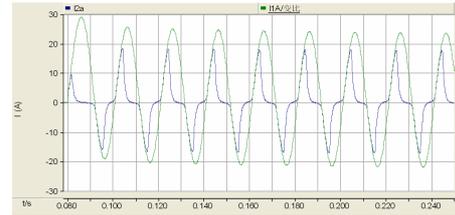


图 9 故障后大 CT 两侧波形对比

Fig. 9 Waveform comparison of large CT after failure

同样，通过 PSCAD 的测量模块测量后经计算得出：图 9 中由大 CT 的饱和造成的电流误差为 50.231%。

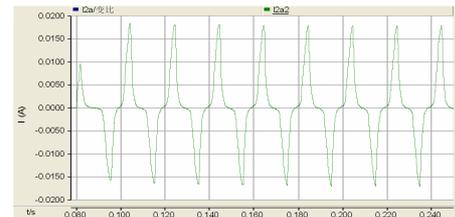


图 10 故障后小 CT 两侧波形对比

Fig. 10 Waveform comparison of small CT after failure

由图 10 可以看出，大 CT 发生严重饱和时，二次侧电流值很小，不足以引起小 CT 发生饱和，故小 CT 可以正确传变电流。经误差分析可知：此时，互感器测量值比实际值要小很多。这样经互感器采集出的故障电流值就会明显小于此电动机保护装置内部设置的电流整定值，与(2)相比，此种情况对低压电动机保护产生的不利影响更为严重。

通过三组 PSCAD 软件的仿真结果对比可知：低压电动机定子绕组发生故障时，与集成于电动机综合保护装置中的微型电流互感器（小 CT）相比，低压线路直接串联的保护用电流互感器（大 CT）的性能对电动机综合保护装置能否正确动作起着主要的作用。

3 利用三采样算法来提高低压电动机综合保护装置动作的可靠性

针对第 2 节中分析的低压电动机定子绕组发生故障时，两电流互感器不能正确传变故障电流而引

起的电动机综合保护装置可能误动作的问题。考虑到产品硬件改良工艺的实现比较困难, 故本文从微机继保装置软件的角度提出了通过改善电动机综合保护装置的继保算法来提高保护装置动作准确性的措施。

从 2.2 节的仿真波形可以看出: 故障后两电流互感器采集的波形虽然畸变, 但在每周波开始的一段时间内, 互感器二次侧的电流几乎是可以正确跟随一次侧电流的变化而变化的, 只不过这段时间比较短暂。因此, 对要求快速动作的主保护而言, 在电流互感器发生饱和时, 如果继续采用傅里叶算法, 由于二次侧不能正确反映故障电流, 就会使保护误动。所以, 本文提出了在电动机综合保护装置的继保算法程序中加入三采样算法的措施。因为这种算法最少只需要三个采样点的时间便可完成参数的计算^[9], 采样时间缩短, 能够一定程度上减小电流互感器的饱和对保护装置中主保护的影响。

同时由 2.2 节分析可知: 低压 380 V 电动机所配置的综合保护装置能否正确动作的主要影响因素是与低压线路直接相连的保护用电流互感器 (大 CT) 的性能。而为有效地说明大 CT 饱和时, 电动机综合保护装置中的主保护采用三采样算法要优于傅里叶算法的结论。并依据直观说明问题、简化论证过程的思想。本文通过 Matlab 软件编程仿真不同算法下, 经 PSCAD 仿真的大 CT 饱和后存在的误差。

在不考虑非周期分量的情况下, 低压电动机定子绕组故障的电流波形如图 11 所示。利用目前微机继保通常所采用的 24 点采样^[11], 经傅里叶算法计算结果如图 12 所示, 三采样算法计算结果如图 13 示。

由图 12 可以看出: 傅里叶算法需要 20 ms 才能完成参数的计算。经 Matlab 中的“Workplace”窗口^[12]中得到仿真结果 (如表 1 示), 误差比较大。

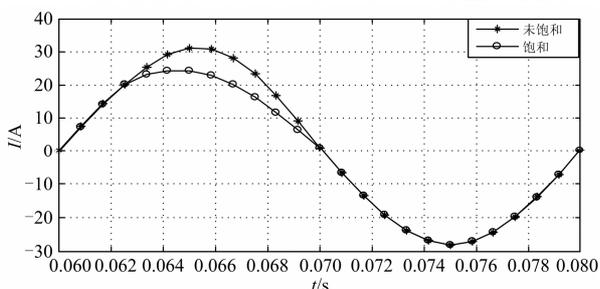


图 11 故障后大 CT 二次侧波形对比

Fig. 11 Waveform comparison of large CT after failure

表 1 不同算法的仿真结果

Table 1 Simulation results of different algorithms

算法	未饱和电流/A	饱和电流/A	误差/%
傅里叶算法	20.824 3	18.649 3	10.44
三采样算法	20.266 4	20.264 1	0.01

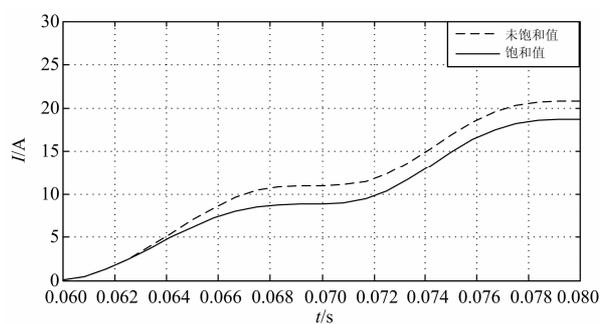


图 12 傅里叶算法的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of Fourier algorithm

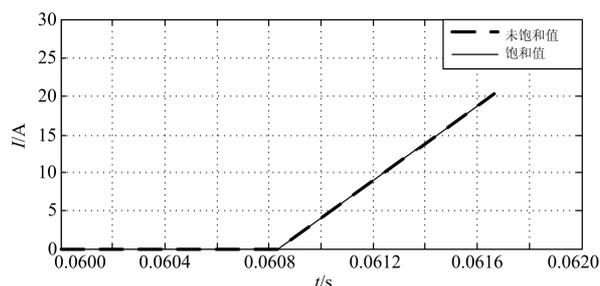


图 13 三点采样算法的仿真结果

Fig. 13 Simulation results of three sampling algorithm

$$\frac{24}{360} \times 2 \times 20 \text{ ms} = 1.67 \text{ ms} \quad (1)$$

而三采样算法只需要 1.67 ms 便可完成参数的计算。经 Matlab 中的“Workplace”窗口中得到仿真结果 (如表 1 所示), 电流误差为: 0.01%, 几乎可以看作 0。通过图 13 中的波形也可以看出, 大 CT 二次侧在饱和时几乎能够正确反映一次侧的电流。

为了有效地说明问题, 将经三采样算法采样出的饱和时电流的有效值与经傅里叶算法采样出的未饱和时波形结果进行比较, 误差为

$$\left| \frac{20.8243 - 20.2641}{20.8243} \right| \times 100\% = 2.69\% \quad (2)$$

此误差要比利用傅里叶采样时饱和引起的误差要低很多, 说明三采样算法在发生故障时, 与傅里叶算法相比能够一定程度上减小电流互感器饱和对继电保护装置的影响。虽然三采样算法不具滤波功能^[10], 但根据本文所分析的情况: 三采样算法所需的时间要比傅里叶算法所需的时间少很多, 暂不考虑谐波的影响, 所以加入三采样算法对提高低压电动机综合保护装置中主保护的速动性有很好的效果。

此措施存在两方面的优点: 一方面, 只要改进电动机综合保护装置内部的继保算法即可, 操作简

单;另一方面,因为只需采样几点,有效地提高了电动机综合保护装置内基于电流整定值动作的主保护的速动性。

4 结论

本文利用 PSCAD 软件在电动机定子绕组发生故障时,对 380 V 低压线路上装设的用于串接电动机保护装置的保护用电流互感器(大 CT)和电动机综合保护装置内的微型电流互感器(小 CT)的性能进行仿真分析。并针对仿真结果,提出了在电动机综合保护装置的继保算法中加入三采样算法的措施。此措施经 Matlab 软件仿真证明可以有效地克服在电流互感器饱和的情况下,因傅里叶算法采样时间过长而造成电动机综合保护装置的主保护不能可靠动作的弊端,提高了保护装置运行的安全可靠。

参考文献

- [1] 王红. 新型低压电动机综合保护装置原理与实现[J]. 低压电器, 2006(3): 43-47.
WANG Hong. Principle and implementation of a new micro-processor protection device for low voltage motors[J]. Low Voltage Apparatus, 2006(3): 43-47.
- [2] 唐颖, 李玉林. 基于 ARM 技术的新型低压电动机保护控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 38(15): 119-122.
TANG Ying, LI Yu-lin. Design of new low-voltage motor protection controller based on ARM technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(15): 119-122.
- [3] 韩守亮, 崔淑梅. 一种新型模块化级联电机系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 155-162.
HAN Shou-liang, CUI Shu-mei. A new modular cascade machine system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 155-162.
- [4] 王德林, 郭成. 电力系统连续体和离散模型中机电扰动传播的一致性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 161-167.
WANG De-lin, GUO Cheng. Study on consistency of electromechanical disturbance propagation in continuum and discrete-models for power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 161-167.
- [5] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 59-64.
TONG Yue, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 59-64.
- [6] DL/T 866-2004 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[S].
DL/T 866-2004 the guide for selection and calculation of current transformers and voltage transformers[S].
- [7] 李嘉, 王雪, 姚晴林. WDH-825A 微机同步电动机保护装置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 75-79.
LI Jia, WANG Xue, YAO Qing-lin. WDH-825A microprocessor based motor protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 75-79.
- [8] 黄莉, 杨卫星, 张雪松. 基于 PSCAD/EMTDC 的带气隙电流互感器建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 178-182.
HUANG Li, YANG Wei-xing, ZHANG Xue-song. Modeling and simulation of current transformer with air-gap based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 178-182.
- [9] 李斌, 范瑞卿, 贺家李. 电动机磁平衡式差动保护的整定计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 79-82.
LI Bin, FAN Rui-qing, HE Jia-li. Setting calculation of magnetic balanced differential protection of motor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 79-82.
- [10] 于群, 曹娜. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
YU Qun, CAO Na. Micro-processor based protective relay in power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [11] 孙丽玲, 许伯强, 李志远. 基于 MUSIC 与 SAA 的笼型异步电动机转子断条故障检测[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 205-212.
SUN Ling-li, XU Bo-qiang, LI Zhi-yuan. A MUSIC-SAA-based detection method for broken rotor bar fault in induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 205-212.
- [12] 于群, 曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
YU Qun, CAO Na. MATLAB/Simulink modeling and simulation of the power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

收稿日期: 2013-12-21; 修回日期: 2014-02-24

作者简介:

于梦瑶(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究。E-mail: yslstdpx@163.com