

# 电动机磁平衡式差动保护的整定计算

李斌, 范瑞卿, 贺家李

(天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 传统纵联差动受电流互感器饱和特性的影响, 实际应用中可能出现误动的情况。在与传统纵联差动保护相比较的基础上, 分析研究了电动机磁平衡式差动保护的工作原理及性能特征。通过对电动机正常运行、起动、以及区内故障的分析, 给出了磁平衡式差动保护的整定原则。研究表明磁平衡式差动保护能够大大提高电动机保护的灵敏性和可靠性。

**关键词:** 电动机; 纵联差动保护; 磁平衡式差动保护; 电流互感器; 中性点不接地系统

## Setting calculation of magnetic balanced differential protection of motor

LI Bin, FAN Rui-qing, HE Jia-li

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Affected by saturation characteristics of current transformer, traditional differential protection may mis-operate sometimes. Based on the analysis of traditional differential protection, this paper introduces a novel magnetic balanced differential protection. According to the investigation of normal operation, start and external or internal fault for motor, the paper researches the performance of magnetic balanced differential protection. Furthermore, the setting principle is proposed. Theoretical research and industrial application show that magnetic balanced differential protection can improve sensitivity and reliability of motor protection greatly.

**Key words:** motor; pilot differential protection; magnetic balanced differential protection; current transformer; neutral ungrounded system

中图分类号: TM401.1; TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0079-04

## 0 引言

电动机的故障形式多种多样, 其中主要故障是定子绕组的相间短路、单相接地和匝间短路<sup>[1]</sup>。定子绕组的相间短路会导致供电网络电压显著下降, 且故障电流大, 一般对于容量为 2 000 kW 以上或容量小于 2 000 kW 的重要电动机, 需要装设纵联差动保护以反应电动机的相间短路故障<sup>[2]</sup>。然而, 传统纵联差动保护受两侧电流互感器饱和特性、互感器二次负载、剩磁大小不定等原因的影响, 可能出现外部故障时误动的情况<sup>[3-5]</sup>。这也使得传统纵联差动保护较难, 同时保证电动机起动过程中的可靠性与内部故障的灵敏度。另一方面, 大型电动机一般接入中性点不接地系统中, 当电动机发生单相接地故障时, 故障电流很小<sup>[1]</sup>, 传统纵差保护不能动作。

本文讨论了一种新型的电动机差动保护——磁平衡式纵差保护, 对其原理进行详细的分析, 并研究了它的整定计算的原则。

## 1 电动机差动保护的方案

### 1.1 传统纵联差动保护

传统的电动机纵联差动保护原理接线示意图如图 1 所示。图中  $\dot{I}_{TP}$ 、 $\dot{I}_{TS}$  分别为电动机供电侧的一、二次侧电流,  $\dot{I}_{NP}$ 、 $\dot{I}_{NS}$  为中性点侧的一、二次侧电流。

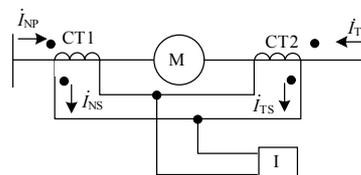


图 1 传统电动机纵差保护接线图

Fig.1 Diagram of conventional differential protection for motor

二次差动回路中的差电流为:

$$I_{op} = \left| \dot{I}_{TS} + \dot{I}_{NS} \right| \quad (1)$$

电动机正常运行和外部故障情况下, 电流互感

器 CT1、CT2 二次侧回路差电流为零，保护装置不会动作。而当电动机发生内部故障时，差电流很大，此时保护动作。显然，要实现电动机三相纵差动保护，则需要 6 个电流互感器与 3 个电流继电器。

为了保证差动保护动作的灵敏性和外部故障的可靠性，纵差动保护一般都采取比率制动方法。现场运行经验表明，传统纵差动保护受互感器特性的影响，可能会发生误动<sup>[6]</sup>。例如当控制室离电动机操作现场很远时，中性点侧 CT 要承载过多电缆电阻负载，这样会使得其提前进入饱和，从而差电流增大，保护误动。

### 1.2 磁平衡式差动保护基本原理

磁平衡式差动保护，又叫自平衡式差动保护，是利用磁平衡原理实现差动保护的一种方法，其基本原理接线图如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

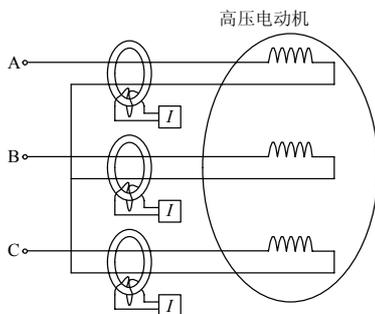


图 2 磁平衡式差动保护接线图

Fig.2 Balanced magnetic motor differential protection

由图可知，磁平衡式差动保护包含三组自平衡互感器以及三个电流继电器。其基本原理是将电动机每相定子绕组始端和中性点端的引线分别入、出磁平衡电流互感器的环形铁芯窗口一次。

在电动机正常运行或起动过程中，流入各相始端的电流与流入中性点端的电流为同一电流，对于磁平衡电流互感器而言，该电流一进一出，互感器一次安匝为零<sup>[7]</sup>，即一次励磁安匝处于磁平衡，则二次侧不产生电流，保护不动作。当电动机内部出现相间短路或接地故障时，故障电流破坏了电流互感器的磁通平衡，二次侧产生电流，当电流达到规定值时起动电流继电器，继电器使电动机配电柜内的断路器跳闸，切除电动机电源，达到保护电动机的目的。

### 1.3 两种保护方案的比较

在保护接线以及电流互感器方面，传统纵联差动保护中需要 6 个 CT，接线复杂，且由于差电流较大导致其变比较大、价格较高，最大的缺点在于两侧 CT 饱和特性不一致可能引起误动；磁平衡差

动保护中只需要 3 个 CT，电动机只需引出三个端子，接线简单、可靠。且变比很小、价格较低，不存在 CT 特性不一致的问题，动作可靠性高。

在保护性能方面，传统纵联差动保护主要反应的是电动机内部的相间短路故障，其整定计算需要考虑躲过的最大不平衡电流较大，因此单相接地短路时由于故障电流太小，传统差动保护一般不具有足够的灵敏度动作于跳闸。而磁平衡式差动保护可以反应电动机内部的相间短路故障，若电动机所在网络的电容电流足够大，磁平衡式差动保护还可以反应单相接地短路故障。

需要指出的是，磁平衡式差动保护的电流互感器装设在电动机出线处，保护范围仅仅是电动机本体内部。而传统的电流纵差动保护的电流互感器可以安装在供电电缆的开关柜出口处，因此其保护范围可以包含电动机以及供电电缆。

## 2 电动机磁平衡式差动保护的整定计算

磁平衡式差动保护应保证在电动机正常运行、起动以及外部故障时可靠不动作；而当电动机内部相间故障时能够可靠动作，若电动机所接电网内的电容电流足够大，磁平衡式差动保护还应能够反应区内单相接地短路故障。下面分别以图 3 所示网络为例，分析研究磁平衡式差动保护在电动机区内外故障情况下的差电流。

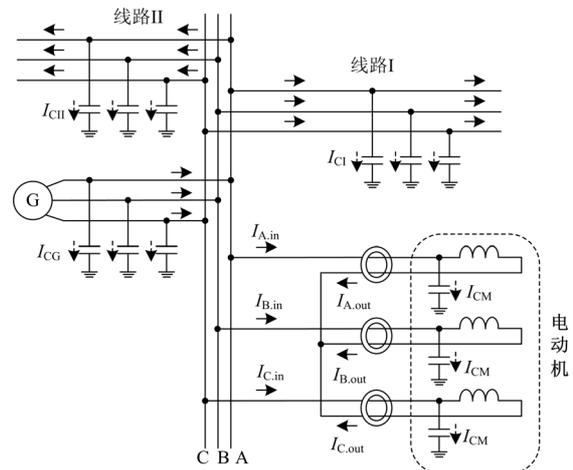


图 3 正常运行时的电流分布图

Fig.3 Diagram of current distribution

### 2.1 电动机正常运行的情况

图 3 所示电网包括等效单元 S、线路 I、II，以及电动机。对于电动机支路， $I_{\Phi.in}$ 、 $I_{\Phi.out}$  分别表示各相流入和流出电动机的电流， $I_{CM}$ 、 $I_{CI}$ 、 $I_{CII}$ 、 $I_{CG}$  分别为各支路的对地电容电流。

由图可知, 正常运行情况下, 流过电动机各相磁平衡式互感器一次侧的不平衡电流为各相等效对地电容电流, 即

$$I_{ub} = I_{CM} = U_{\phi} \omega C_{OM} \quad (2)$$

式中:  $U_{\phi}$  为电动机正常运行时的相电压, 可取额定电压  $U_N$ ;  $\omega$  为系统角频率;  $C_{OM}$  为电动机每相等效对地电容。显然, 在电动机起动情况下, 磁平衡式差动保护的差电流表达式同样为式 (2), 即不平衡电流很小, 保护可靠不误动, 性能优于传统纵差动保护。

## 2.2 电动机区外故障的情况

电动机一般接入中性点不接地系统中, 当网络内某点发生单相接地故障时, 故障相电压降为零, 而健全相电压升高  $\sqrt{3}$  倍<sup>[1]</sup>。因此, 故障相的对地电容电流为零, 而健全相的对地电容电流变为正常运行时电容电流的  $\sqrt{3}$  倍。假设电动机外部发生 A 相接地故障, 电流分布如图 4 所示。

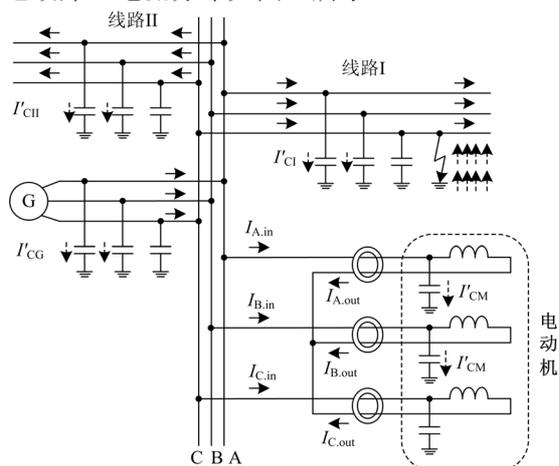


图 4 外部单相接地时, 三相系统电流分布图

Fig.4 Diagram of current distribution in the case of external single-phase earth fault

由图 4 可知, 对电动机磁平衡式差动保护而言, 故障相的不平衡电流为零, 而健全相的一次侧不平衡电流为:

$$I_{ub} = I'_{CM} = \sqrt{3}U_{\phi} \omega C_{OM} \quad (3)$$

当电动机区外发生两相相间短路时, 故障相电压降为原来的 0.5 倍, 而非故障相电压基本不变, 此时电动机三相磁平衡保护互感器中的最大不平衡电流为:

$$I_{ub} = U_{\phi} \omega C_{OM} \quad (4)$$

当电动机外部发生三相短路时, 各相相电压都降低, 甚至为零, 此时流过电动机磁平衡互感器的

几乎为零。

## 2.3 电动机区内故障的情况

当电动机内部发生定子绕组单相接地故障时, 假设 A 相接地, 此时系统电流分布如图 5 所示, 由不接地系统的故障分析可知, 健全相电压升高  $\sqrt{3}$  倍, 即对地电容电流增大  $\sqrt{3}$  倍。所以健全相对应的磁平衡式差动保护的不平衡电流与式 (3) 相同。

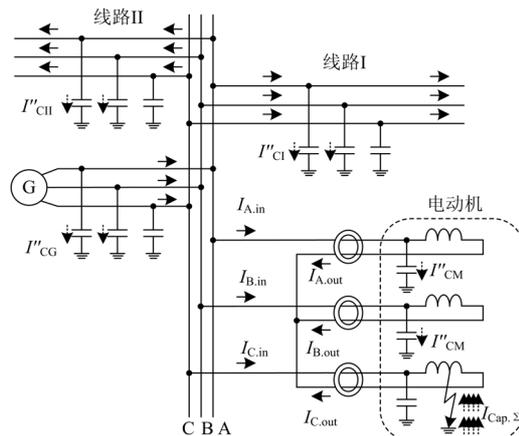


图 5 内部单相接地时, 三相系统电流分布图

Fig.5 Diagram of current distribution in the case of internal single-phase earth fault

对于电动机故障相的定子绕组而言, 其负荷电流大小无论如何变化, 对磁平衡式差动保护而言均属于穿越性电流。但是, 此时全系统电容电流构成的接地点短路电流就在差流回路中形成了差电流, 其值为:

$$I_{op} = I_{Cap.\Sigma} = \sqrt{3}U_{\phi} \omega C_{\Sigma} \quad (5)$$

式中  $C_{\Sigma} = C_{OI} + C_{OII} + C_{OM}$ 。

当电动机内部发生相间故障时, 故障电流很大, 故流过自平衡互感器的差电流很大, 远大于前述分析计算的电容电流大小。

## 2.4 磁平衡式差动保护的整定计算原则

传统的纵差动保护的整定原则按照躲过外部故障或电动机起动时的最大不平衡电流整定, 其值较大<sup>[8]</sup>, 在电动机内部单相接地故障情况下一般不能动作。

显然, 磁平衡式差动保护可以反应电动机定子绕组的相间短路故障、接地短路故障, 不反应定子绕组每相自身的匝间短路故障。电动机所在电网一般为不接地系统, 其相间短路电流较大, 而接地短路电流很小, 若要可靠反应这两种故障, 磁平衡式差动保护的整定原则应为:

(1) 躲过磁平衡式差动保护的最大不平衡电流;

(2) 躲过供电系统中其他线路或设备发生单相接地故障时,电动机各相提供的最大电容电流(不应包括保护范围以外的电动机供电电缆的电容电流,因为磁平衡电流互感器一般装设在电动机出线处,供电电缆的对地电容电流不通过互感器的环形铁芯窗口)。

按照上述原则,由式(2)~式(4)的分析可知,磁平衡式差动保护的動作电流应整定为:

$$I_{K.act} = K_{rel} \frac{\sqrt{3}U_N \omega C_{OM}}{n_{CT}} \quad (6)$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数,可取 1.3;  $n_{CT}$  为磁平衡式电流互感器变比,通常为 50 A/5 A。

由式(5)可知,磁平衡式差动保护在电动机区内单相接地故障时的灵敏度为:

$$K_{sen} = \frac{C_{\Sigma}}{K_{rel} C_{OM}} \quad (7)$$

由于电动机的供电电缆不在磁平衡式差动保护范围之内,因此,只要全系统的等效电容足够大,由式(7)可知,磁平衡式差动保护能够可靠反应区内单相接地故障。

由上述分析也可知,磁平衡式差动保护的不平衡电流很小,故整定值可以很低,区内故障时有很高的灵敏度。

### 3 磁平衡式互感器的一些考虑

现场运行经验表明,传统纵差动保护由于差动继电器两臂的电流互感器在电动机自启动过程中的暂态特性往往难以完全一致,导致不平衡电流增大,从而可能引起纵差动保护误动。因此,个别应用场合甚至考虑采用 TP 类电流互感器<sup>[6]</sup>。而磁平衡式差动保护不会出现互感器的饱和而误动,对于一般电动机保护不需要过多的考虑其暂态特性,选择 P 类电流互感器即可。另外,由于利用磁平衡原理,磁平衡式电流互感器二次侧断线也不会出现过电压现象,这些都是传统的电流纵差动保护无法做到的。

由于磁平衡式差动保护的互感器一般都采用穿芯式结构,为了保证互感器的感应灵敏度,就要求在安装时一定要让两侧导线穿过一次侧线圈的正中心。将互感器直接安装在电动机本体上更容易实现磁平衡式差动保护的接线,但这对电动机的设计和制造带来了困难。目前,关于磁平衡式差动保护接线的实现,应根据实际情况灵活确定。

### 4 结论

本文分析研究了电动机磁平衡式差动保护的原理及其整定计算原则。

在与传统纵联差动保护相比较的基础上,阐述了其工作原理及性能特征。基于电动机正常运行、起动、以及区内外故障的电流分析,研究了磁平衡式差动保护的整定原则和计算方法。结果表明,基于磁平衡式原理,其差动保护能够可靠反应电动机的相间短路故障以及单相接地短路故障,并在区外故障以及起动过程中具有很高的可靠性。

### 参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principles of protective relaying in electric power systems[M]. Revised and enlarged edition. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Wei-jian. Principles and applications of main electric equipment's protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] 王维俭, 张学深, 等. 电气主设备纵差保护的进展[J]. 继电器, 2000, 28 (5): 6-8.  
WANG Wei-jian, ZHANG Xue-shen, et al. Main electric equipment differential protection's progress[J]. Relay, 2000, 28 (5): 6-8.
- [4] 袁季修, 吴聚业. 大型发电机变压器组保护用电流互感器选型及应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9): 72-75.  
YUAN Ji-xiu, WU Ju-ye. Selection and application of protective CT for large generator-transformer unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (9): 72-75.
- [5] 袁季修, 吴聚业. 大型发电机变压器组保护用电流互感器选型及应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9): 72-75.  
YUAN Ji-xiu, WU Ju-ye. Selection and application of protective CT for large generator-transformer unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (9): 72-75.
- [6] 王维俭, 李芙英. 纵联差动保护原因不明误动的分析和对策——兼论光电流传感器的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (18): 17-19.  
WANG Wei-jian, LI Fu-ying. Analysis and countermeasure for misoperation of longitudinal differential protection with unclear reason[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (18): 17-19.
- [7] 潘洪俊. 大型电动机磁平衡式差动保护的整定[J]. 电世界, 2001, 11.  
PAN Hong-jun. Protection setting of large-scale motor's magnetic balanced differential protection[J]. Electric World, 2001, 11.

(下转第 93 页 continued on page 93)

- 解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 118-122.  
ZHANG Ji-xian, ZHONG Qiu-hai, DAI Ya-ping. The determination of the threshold and the decomposition order in threshold de-noising method based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 118-122.
- [4] 陈莹, 纪志成, 韩崇昭. 基于贝叶斯准则的小波域自适应消噪阈值[J]. 光电子激光, 2008, 19(1): 120-125.  
CHEN Ying, JI Zhi-cheng, HAN Chong-zhao. A adaptive wavelet denoising threshold based on the Bayesian criterion[J]. Photoelectron Laser, 2008, 19(1): 120-125.
- [5] 张炳达, 刘庆, 刘长胜. 选取最优小波进行局放脉冲的提取和消噪[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 14-16.  
ZHANG Bing-da, LIU Qing, LIU Chang-sheng. The selection of optimal wavelet to de-noise partial discharge pulse[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 14-16.
- [6] 曾孝平, 仲元昌, 周科理, 等. 多用户检测对 CDMA 系统容量的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(9): 36-38.  
ZENG Xiao-ping, ZHONG Yuan-chang, ZHOU Ke-li, et al. The influence of multi-user detection on CDMA system capacity[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(9): 36-38.
- [7] 仲元昌, 章仁飞, 王小林. 小波神经网络对 CDMA 基带信号的消噪处理[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(9): 11-131.  
ZHONG Yuan-chang, ZHANG Ren-fei, WANG Xiao-lin. Wavelet neural network for CDMA baseband signal denoising processing[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(9): 11-131.
- [8] 李斌, 何日耀. 小波神经网络阈值自学习在信号去噪中的应用[J]. 中国测试技术, 2006, 32(2): 111-113.  
LI Bin, HE Ri-yao. Application of wavelets neural network threshold self-study in signals denoising[J]. China Measurement Technology, 2006, 32(2): 111-113.
- [9] 岑翼刚, 慰宇, 孙德宝. 小波阈值神经网络在信号去噪及预测中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 485-491.  
CEN Yi-gang, WEI Yu, SUN De-bao. The application of wavelet threshold neural network in the de-noising and prediction[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(3): 485-491.
- [10] Sutherland P E. Harmonic measurements in industrial power system[J]. IEEE Trans on IA, 1995, 31(1): 175-183.
- [11] Sardy S. Minimax threshold for denoising complex signals with wave shrink[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 48(4): 1023-1028.
- [12] DING Xing-hao, DENG Shan-xi, LI Liao-liao. Algorithm of wavelet RBF neural network[C].//12nd International Symposium on Instrument Science and Technology. Jinan: 2002: 756-760.
- [13] 罗晓曙. 神经网络理论[M]. 南宁: 广西师范大学出版社, 2005.  
LUO Xiao-shu. Nonlinear programming theory[M]. Nanning: Guangxi Normal University Press, 2005.
- [14] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
ZHANG De-feng. Wavelet analysis of MATLAB[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [15] 葛哲学, 孙志强. 神经网络理论与 MATLABR2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
GUO Zhe-xue, SUN Zhi-qiang. Neural network theory and MATLAB application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-11-18

作者简介:

秦代春(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式系统应用、微电网运行、电能质量监测; E-mail: qindaichun@cqu.edu.cn

周林(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事 FACTS 电能质量, 微电网运行, 电力电子技术等方面的研究;

郭珂(1973-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为嵌入式系统应用、微电网运行, 电力电子技术。

(上接第 82 页 continued from page 82)

- [8] 李德佳. 大型电动机高阻抗差动保护原理、整定及应用[J]. 继电器, 2004, 32(10): 67-70.  
LI De-jia. Principle, setting and application of high impedance differential protection in large motor[J]. Relay, 2004, 32(10): 67-70.

收稿日期: 2009-08-26

作者简介:

李斌(1976-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与故障分析;

范瑞卿(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: ruiqingfan@163.com

贺家李(1925-), 男, 教授, 博士生导师, 俄罗斯工程院院士, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护。