

一种微机型过励磁保护的研究

张侃君¹, 尹项根², 胡刚¹, 夏勇军¹, 董永德¹

(1. 湖北省电力试验研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对现有几种微机型反时限过励磁保护的動作特性曲线和算法进行分析, 分析结果表明分段原理動作特性曲线可以与设备过励磁曲线较好地配合, 基于反时限保护動作状态与動作量基本关系的算法能够较好地反映设备过励磁的动态过程。并且介绍了由以上两者形成的反时限过励磁保护方案的实现方法。最后, 基于该方案构成了一种适合于大型发电机、变压器的通用型过励磁保护, 对保护在应用中应注意的一些问题也进行了分析。该过励磁保护在大型水轮发电机组的运行结果表明, 保护能够满足发电机、变压器运行的需要。

关键词: 过励磁保护; 保护性能; 保护方案

Study of a microcomputer-based over-excitation protection

ZHANG Kan-jun¹, YIN Xiang-gen², HU Gang¹, XIA Yong-jun¹, DONG Yong-de¹

(1. Hubei Electric Testing & Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the paper, the comparative analysis on performance of several microcomputer inverse-time over-excitation protection's operating characteristic curves and algorithms are done, the analysis results show that the segmental fitting operating characteristic curve could match equipment's over-excitation curve better, the algorithm based on the inverse-time protection basic relation between operation state and action value could reflect the dynamic process of equipment over-excitation condition more effectively. The implementation approach of inverse-time over-excitation protection scheme composed by above both is introduced. Based on the scheme, a universal over-excitation protection which could be applied to large generator and transformer is provided, and some application problems of the protection are analyzed. The over-excitation protection has been applied to large hydro-generator, its operating results show that the protection performance can meet the practical requirement of generator and transformer.

Key words: over-excitation protection; protection performance; protection scheme

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0061-05

0 引言

当发电机或变压器发生过励磁故障时, 铁芯的工作磁密升高导致其出现饱和, 使得铁损增加, 另外因漏磁场的增加造成涡流损耗相应增加, 由这些损耗引起的温升有可能导致设备绝缘的损坏。由于现代大型发电机、变压器的额定工作磁密接近其饱和磁密, 使得过励磁故障的后果会更加严重; 因此, 大型发电机和变压器均应装设过励磁保护。

过励磁保护一般采用过励磁倍数 n 来反映设备的过励磁情况, 其表达式见式 (1):

$$n = \frac{B}{B_N} = \frac{U/f}{U_N/f_N} = \frac{U_*}{f_*} \quad (1)$$

式中: U_* 和 f_* 分别为电压和频率的标么值。目前所

采用的反时限过励磁保护的動作特性曲线和算法有所不同, 针对相同的过励磁情况, 由不同動作特性曲线和算法构成的保护性能可能不一致。本文在对现有反时限过励磁保护動作特性曲线和算法性能对比分析的基础上, 推荐一种反时限保护方案, 并且, 基于该方案构建一套完整的过励磁保护; 另外, 对保护应用中的问题也进行相应的研究。

1 对现有反时限过励磁保护的 analysis

1.1 保护動作特性曲线

过励磁保护应在保证设备安全的基础上, 充分发挥设备的效益, 这就要求保护動作特性曲线能够与设备的过励磁曲线良好地匹配。目前, 反时限过励磁保护所採用的動作特性曲线可分为两类: 一类

是采用由公式给出的一条完整曲线对设备过励磁曲线进行拟合，另一类是采用分段曲线拟合法，以下将对这两类曲线进行分析。

1.1.1 利用完整曲线进行拟合

1) ABB 公司提出的方案^[1-3] (方案 1)

$$t = 0.8 + \frac{0.18K_1}{(N-1)^2} \quad (2)$$

式(2)中: K_1 为整定时间倍率, $K_1=1\sim 63$; N 为保护启动倍率, $N=n/n_{op}$, n_{op} 为过励磁倍数启动值, 一般可取为 1.05~1.1。

2) 改进方案 (方案 2)^[4]

动作判据如式(3):

$$t = 10^{-K_2n+K_3} \quad (3)$$

式(3)中: K_2 和 K_3 为待定参数。

以上两种方案中, 方案 1 动作特性曲线的形状仅由参数 K_1 确定, 而方案 2 由参数 K_2 和 K_3 确定, 因此, 方案 2 的动作特性曲线可以与设备过励磁曲线更好地配合, 但是参数 K_2 和 K_3 的求取较为繁琐。

1.1.2 分段曲线方案 (方案 3)

保护的動作特性曲线见图 1 所示。

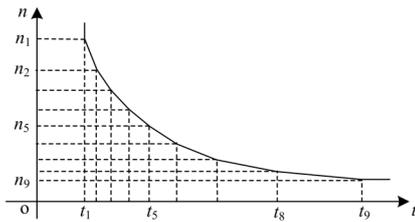


图 1 方案 3 动作特性曲线

Fig.1 Performance characteristic curve of scheme 3

分段曲线拟合法是将动作特性曲线分为独立的若干段, 这些曲线可以为二次曲线或直线 (在实际应用中, 为减少计算量通常采用直线), 相邻段曲线的交点设置为整定值。

1.1.3 两类曲线的性能比较

采用一条完整曲线去拟合设备的过励磁曲线, 需要整定的参数较少, 现场操作简单; 但是, 由于发电机、变压器的容量和内部结构的不同, 其过励磁能力可能存在明显差异。采用由公式确定的一条完整曲线, 很难与这些设备的过励磁曲线进行较好地匹配, 在应用上存在着局限性, 必须与其它保护配合使用, 例如: 使动作特性曲线与过励磁曲线中部匹配, 其它的过励磁情况由定时限保护负责。而分段曲线拟合法可以通过修改各定值的数值使各段曲线得以灵活地调整, 能够使动作特性曲线与设备过励磁曲线良好匹配, 从而在保证设备安全的基础上, 充分发挥设备的效益。因此, 方案 3 动作特性

曲线的性能要优于其余两种方案。

1.2 保护算法

动作特性曲线反映了设备处于过励磁状态下, 过励磁倍数与保护动作时间的静态关系。但是过励磁倍数有可能发生变化, 其附加损耗会随着过励磁倍数的变化而发生大幅度的改变, 因此要采用相应的算法来模拟过励磁的动态过程。以下将对几种过励磁保护算法进行分析。

1.2.1 基于发热效应的等效过励磁倍数算法(算法 1)

该算法中, 等效过励磁倍数计算公式如式(4)^[5,6]:

$$\bar{n} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n^2(t) dt} \quad (4)$$

式中: T 为过励磁开始时刻到当前计算时刻的时间, $n(t)$ 为随时间变化的过励磁倍数函数, \bar{n} 为等效过励磁倍数。将式(5)离散化后, 可得:

$$\bar{n} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m n_k^2 t_{sk}}{\sum_{k=1}^m t_{sk}}} \quad (5)$$

式中: t_{sk} 为采样时间间隔, n_k 为各时刻的过励磁倍数。找到 \bar{n} 在反时限特性曲线对应的延时 t_k , 然后减去已累积的时间 Σt , 得到保护动作的剩余延时:

$$\Delta t = t_k - \Sigma t \quad (6)$$

当 $\Delta t \leq 0$ 时, 保护动作。

1.2.2 基于反时限保护动作状态与动作量基本关系的算法 (算法 2)

反时限保护动作状态与动作量的基本关系如式(7)所示:

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(x)} dt = 1 \quad (7)$$

式(7)中: T_0 为保护的動作时刻, $t(x)$ 为与保护动作量 x 相对应的動作延时函数。等式左边的表达式反应了从故障发生时刻到当前时刻期间, 因故障产生的热量累积与保护动作允许值的比率关系, 当表达式数值为 1 时保护动作。基于反时限保护的動作状态和动作量的基本关系, 形成过励磁保护算法, 其实现过程如下:

将式(7)中等式左边的表达式离散化可得^[7]:

$$\bar{M} = \sum_{k=1}^m \frac{t_{sk}}{t_k} \quad (8)$$

式中: t_{sk} 为各时刻的采样间隔时间, t_k 为该时刻过励磁倍数 n_k 在动作特性曲线上对应的保护动作延时。当反时限过励磁保护启动后, 先查找出各采样时刻对应的 t_k , 然后将各采样时刻的计算结果 (t_{sk}/t_k)

累加。动作判据如下:

$$\overline{M} \geq 1 \quad (9)$$

1.2.3 两种算法的比较

在过励磁期间, 附加损耗的热量累积是一个复杂的动态过程, 并且, 设备相应结构间各区域内的附加损耗密度随着过励磁倍数的变化也有所不同, 目前还没有一种方法能够对其进行准确地计算。因此要在满足工程应用的前提下, 采用有效的算法去模拟过励磁状态下, 附加损耗热量累积的动态变化过程, 从而给保护当前的动作状态提供有效依据。

算法 1 计算的是从过励磁开始时刻到当前时刻的过励磁倍数等效值。该数值中既含有当前时刻的过励磁信息, 也含有过励磁开始后各时间段的累积信息, 可以在一定程度上反映设备的过励磁情况。但是, 计算结果要受到过励磁开始后各时间段设备过励磁状态的影响, 如果当前时刻与过去时刻过励磁倍数相差较大时, 其计算结果会与当前实际过励磁倍数存在较大偏差, 有可能会造成保护的不正确动作。算法 2 以采样时间间隔为单位, 通过计算 t_{sk}/t_k 来反映 t_{sk} 内过励磁损耗所产生的热量累积与对应的保护动作允许值的比率关系。由于采样时间间隔很短 (通常不大于 1 ms), 式 (8) 的计算结果会随着过励磁倍数的变化而做到快速响应, 使保护具有与动态变化的过励磁倍数相配合的特性, 从而确保了保护动作的准确性。

基于以上分析, 本文以分段拟合的动作特性曲线和基于反时限保护动作状态与动作量基本关系的算法构成反时限过励磁保护方案, 以下将对该保护方案的实现进行介绍。

2 反时限保护方案的实现

如图 1 所示, 反时限动作特性曲线由 8 段直线组成, 各直线的斜率从左到右依次减小。当反时限保护启动后, 按照以下步骤进行计算:

2.1 动作时间的查找

要找出过励磁倍数对应的延时, 首先要判断过励磁倍数在动作特性曲线的哪段区域, 方法如下:

1) 中间比较法: 首先将当前过励磁倍数 n_k 与 n_1 相比较, 如果 $n_k \geq n_1$, 则认为延时为 t_1 ; 当 $n_k < n_1$, 与 n_5 相比较。如果 $n_k < n_5$, 再与 n_7 比较; 反之则与 n_3 比较, 直到找到 n_k 在动作特性曲线上的区域。

2) 依次比较法: 如果 $n_k \geq n_1$, 则认为延时为 t_1 ; 当 $n_k < n_1$, 与 n_2 相比较; 如果 $n_k > n_2$, 则比较结束, 反之再依次向下比较, 直至 n_9 为止。

对于这两种方法, 各有优缺点。中间比较法要求定值的个数必须为奇数, 程序编制较繁琐, 但是

比较次数较少; 而依次比较法的程序编制简单 (采用 for 循环实现), 但是当过励磁倍数较小时, 比较次数较多, 这里采用中间比较法。

假设 n_k 处于定值 n_x 和 n_{x+1} ($1 < x < 8$) 之间, 见图 2。

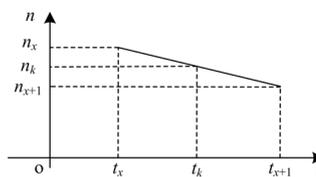


图 2 动作特性曲线局部示意图

Fig.2 The partial diagram of operating characteristic curve

则延时 t_k 计算公式如式 (10):

$$t_k = (n_x - n_k) \times \frac{t_{x+1} - t_x}{n_x - n_{x+1}} + t_x \quad (10)$$

2.2 累积计算和动作判别

反时限保护启动后, 当 $n_k \geq n_9$ 时, 认为设备热量累积为正, 计算公式如式 (8) 所示; 当 $n_k < n_9$ 时, 认为热量累积为负, 计算公式如式 (11):

$$\overline{M} = \overline{M}_{old} - \sum_{k=1}^m k_s \frac{t_s}{t_9} \quad (11)$$

式中: \overline{M}_{old} 为上次计算的累加值, k_s 为调整系数。

在进行判别时, 首先判断反时限保护是否已动作。如果未动作, 则按照式 (9) 的条件动作; 如果已动作, 则按照式 (12) 的条件返回:

$$\overline{M} < K_{coef} \quad (12)$$

式中: K_{coef} 为返回系数 ($0 < K_{coef} < 1$)。保护返回后仍然要进行热量累积计算, 当累积值小于 0 时, 将数值设置为 0, 并返回启动元件。只有 $n_k > n_9$ 再次满足时, 保护才再次启动, 重新进行热量累积计算。

3 通用型过励磁保护

基于反时限保护方案, 构成一种适用于大型发电机、变压器的通用型微机型过励磁保护, 以下对其进行介绍和分析。

3.1 保护判据

保护判据由定时限和反时限保护判据组成。

3.1.1 反时限保护判据

1) 启动判据

启动判据如下:

$$n > n_9 \quad (13)$$

当式 (13) 满足时启动保护, 并开始累积计算。

2) 动作判据

反时限保护的動作判据可参见式 (9) 所示。但

是当过励磁倍数较小时，会导致保护的动作时间较长，对于这种情况，通常采用一段定时限保护与其配合，采用 (t_9, n_9) 作为定值（如图 1）。同样，可以采用 (t_1, n_1) 作为定值，构成另一段定时限保护。即反时限保护由 3 部分判据组成，分别为：

$$\text{高定值定时限段: } n > n_1 \tag{14}$$

$$\text{低定值定时限段: } n > n_9 \tag{15}$$

反时限段：负责 $n_1 \sim n_9$ 之间的区域。

3.1.2 定时限保护判据

反时限过励磁保护一般动作于跳闸，而设备发生轻微过励磁故障时，如果能够采取相应措施使设备恢复正常运行状态，则可以避免不必要的跳闸。因此，设置一段定时限保护，该保护经长延时动作于信号。判据如下：

$$n > n_d \tag{16}$$

式中： n_d 为定时限保护定值。

3.2 保护应用中注意的问题

3.2.1 电压的取法

过励磁保护采用的电压要能反映设备当前的运行工况，并且其电压还要受电压互感器（以下简称为 PT）的装设位置以及是否存在相应 PT 等因素的影响。发电机过励磁保护一般采用机端 PT 电压，而主变采用高压侧 PT 电压或低压侧 PT 电压。对于装设有 GCB 的发电机，保护所取电压必须为 GCB 断开后能反映设备运行工况的电压。

对于发电机过励磁保护，如果采用相电压，当发电机发生单相接地短路时非故障相电压会增大，使过励磁倍数的计算数值与实际值不相符。对于变压器过励磁保护，当选取低压侧 PT 电压时，由于线电压等于其绕组电压，因此能更好地反映过励磁情况；当选取高压侧 PT 电压时，如果变压器高压侧中性点直接接地，则采用线电压与相电压区别不大；如果中性点经小电抗接地（部分 500 kV 变压器）或不接地（部分 220 kV 变压器）时，采用相电压对保护的性能会有影响。因此，为保证保护的性能和通用性，建议采用线电压。

3.2.2 定值的整定

要使反时限动作特性曲线的形状能够灵活调整，各段曲线交点的纵坐标（过励磁倍数）和横坐标（延时）均要为独立可整定的量，因此需要整定的定值较多，在整定时需要仔细审核。

各定值的整定要参照设备的过励磁曲线，使得动作特性曲线处于设备的过励磁允许范围内。但是，有些设备未给出过励磁曲线，仅给出几种过励磁情况下对应的最大允许时间，而且给出的点可能少于

定值的个数。对于这种情况，根据给出的信息设置相应数量的定值，其余的定值可通过线性插值的方法来计算。

3.2.3 误动问题的处理

在某些运行情况或操作下，可能会导致过励磁保护误动，例如：PT 操作失误或 PT 二次侧回路故障导致二次侧电压突增，使得保护误动。对于这种情况，文献[8-9]提议设置 5 次谐波电流制动的方法，其定值一般根据经验进行整定，由于不同设备的情况可能有差异，会影响谐波比锁判据的动作准确性。如果以过励磁情况下 5 次谐波电流含量测量值为依据来整定，可以提高谐波比锁判据的动作准确性，但是该整定方法较为繁琐。这里推荐电压闭锁的方法，通过比较几组不同 PT 的二次侧电压来判别一次侧电压是否出现上升，例如：对于主变，可以比较主变各侧 PT 的电压。

为保证保护的通用性，对于闭锁判据要设置相应控制字，在不需要的时候退出，以免误闭锁保护。

3.3 保护逻辑框图

根据以上分析结果，以下给出完整的微机过励磁保护逻辑框图，如图 3 所示。

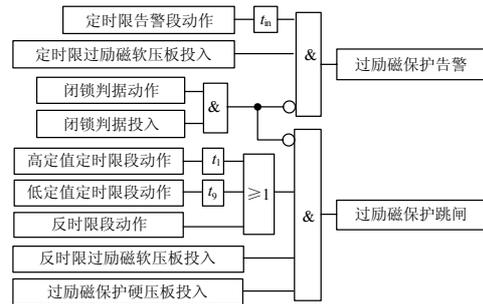


图 3 过励磁保护逻辑框图

Fig.3 The logic diagram of over-excitation protection

图中： t_m 为定时限过励磁保护延时。

4 结论

本文基于对现有几种微机型反时限过励磁保护方案的分析，推荐一种采用分段曲线动作特性曲线和基于反时限保护动作状态与动作量基本关系的算法构成过励磁保护，该保护可以较好地反映出设备的过励磁情况，在保证设备安全的基础上，能充分发挥设备的效益，可作为大型发电机、变压器的通用型过励磁保护。

采用文中过励磁保护的发电机-变压器组保护装置已经在国内某电厂 300 MW 水轮发电机组中投入使用，现场运行情况表明，该保护运行可靠，能够满足发电机、变压器运行的需要。

参考文献

- [1] 赵惠良, 陶惠良. 微机反时限过励磁保护[J]. 电力自动化设备, 1994, (4): 54-57.
ZHAO Hui-liang, TAO Hui-liang. Microcomputer Inverse-time over Excitation Protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 1994, (4): 54-57.
- [2] 杨彪, 董建达, 金乃正. 国外 500 kV 变压器过励磁保护的分析和改进[J]. 继电器, 2004, 32 (13): 71-73.
YANG Biao, DONG Jian-da, JIN Nai-zheng. Analysis of Imported Overexcitation Protection in 500 kV Power Transformer[J]. Relay, 2004, 32 (13): 71-73.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Theory and Application of Power Main Equipment Protection (2nd ed) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 汤连湘, 王维俭. 变压器微机型过励磁反时限保护判据的研究和改进[J]. 继电器, 1993, 21 (3): 3-5.
TANG Lian-xiang, WANG Wei-jian. The Research and Improvement of Microcomputer Transformer Overexcitation Inverse-time Protection Criterion[J]. Relay, 1993, 21 (3): 3-5.
- [5] 陈松林, 李海英, 乔勇, 等. RCS-978 变压器成套保护装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (11): 52-56.
CHEN Song-lin, LI Hai-ying, QIAO Yong, et al. RCS-978 Digital Transformer Protection Set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (11): 52-56.
- [6] 宋斌. 具有不同特性的微机反时限过流继电器的实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 57-59.
SONG Bin. Design of Micro Processor-based Inverse-time Overcurrent Relays with Different Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 57-59.
- [7] 王增平, 高中德, 黄少锋, 等. 微机型发电机-变压器组过励磁保护的研究[J]. 华北电力大学学报, 1996, 23 (4): 20-25.
WANG Zeng-ping, GAO Zhong-de, HUANG Shao-feng, et al. The research of the Overexcitation Protection Based on Microcomputer for Generator-transformer Units[J]. Journal of North China Electric Power University, 1996, 23 (4): 20-25.
- [8] 贾向恩, 韩力, 罗强. 浅谈大型变压器过励磁保护的可靠性[J]. 宁夏电力, 2004, (3): 19-21.
JIA Xian-gen, HAN Li, LUO Qiang. The Discussion of Reliability for Transformer's Over Excitation Protection[J]. Ningxia Electric Power, 2004, (3): 19-21.
- [9] 黄莹, 崔静安. 从几次误操作谈变压器过励磁保护原理的改进[J]. 继电器, 2004, 32 (6): 55-59.
HUANG Ying, CUI Jing-an. Improvement on Transformer Overexcitation Protection by Studying Several Incorrect Operation Accidents of Substation[J]. Relay, 2004, 32 (6): 55-59.
- 收稿日期: 2009-01-26; 修回日期: 2009-04-07
作者简介:
张侃君(1977-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: Zhangzkj_7779@sina.com
尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和安全自动控制;
胡刚(1958-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。
- (上接第 60 页 continued from page 60)
- [6] 张铭, 祝瑞金, 杨增辉, 等. 短路电流计算程序的比较研究[J]. 华东电力, 2006, 33 (4): 20-22.
ZHANG Ming, ZHU Rui-jin, YANG Zeng-hui, et al. Comparative Study of Short-circuit Current Calculation Softwares[J]. East China Electric Power, 2006, 33 (4): 20-22.
- [7] 吕文杰. 英国国家电网的短路电流控制技术[J]. 华东电力, 2005, 33 (9): 23-25.
Lü Wen-jie. Short-circuit Current Control for National Grid of the U. K. [J]. East China Electric Power, 2005, 33 (9): 23-25.
- [8] 国际电工委员会. IEC60909 (2001)《三相交流系统短路电流计算》[Z]. 2001.
IEC. IEC60909 (2001) Short-Circuit Current Calculation in Three-phase AC Systems[Z]. 2001.
- [9] 谢文, 朱永强, 崔文进. IEC60909 短路电流计算标准分析[J]. 电力建设, 2006, 33 (4): 23-26.
XIE Wen, ZHU Yong-qiang, CUI Wen-jin. Analysis on Short-circuit Current Calculation Standard IEC 60909[J]. Electric Power Construction, 2006, 33 (4): 23-26.
- [10] 中国国家技术监督局. GB/T 15544-1995 三相交流系统短路电流计算[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
State Bureau of Quality and Technical Supervision Standards Press of China. GB/T 15544-1995 Short-circuit Current Calculation in Three-phase a.c. Systems[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- 收稿日期: 2009-01-13; 修回日期: 2009-02-27
作者简介:
田华(1972-), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与设计; E-mail: zhuyet@sina.com
王卿(1973-), 女, 工程师, 研究方向为电力可靠性管理与电力行业标准化; 管理;
朱峰(1972-), 男, 工程师, 研究方向为城市电网。