

工程实用励磁变压器保护方案探讨

徐绍麟

(中南电力设计院,湖北 武汉 430071)

摘要: 大容量发电机变压器组采用自并励励磁系统后,由于机端短路电流很大,以致很难选择供励磁变压器保护用的高压侧电流互感器。提出利用发电机变压器组的不完全接线差动保护和励磁变压器专用保护共同分担整个励磁变压器保护,以便降低对其高压侧电流互感器准确限值系数要求,并对励磁变压器高压侧电流互感器额定电流比选择给出参考意见。同时比较了励磁变压器差动保护和过流保护方案的优劣,建议励磁变压器采用电流速断作为主保护以简化接线。

关键词: 励磁变压器; 继电保护; 准确限值系数; 额定电流比

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0034-05

1 概述

工程实践中,某些由国外供货或引进的发电机自并励静止励磁设备的机端励磁变压器(以下简称励磁变)不配供继电保护。其理由为:如欲装设励磁变保护,为满足继电保护的可靠性、灵敏性和速动性要求,励磁变高压侧电流互感器(以下简称励磁变TA)应满足励磁变分支短路时的准确限值系数要求。对于300 MW机组此短路电流的周期分量通常超过 100 kA,而励磁变的额定工作电流仅只100 A左右,因此势必造成该 TA 体积庞大、安装困难、设备造价昂贵,而励磁变又极少可能发生内部故障,所以不配装保护。

然而,尽管励磁变工作电压不高、容量不大,但是发生内部故障的可能性总是存在的。依据文献[1~2]的相关条文规定,励磁变应配置必要的保护,显然没有理由可以放弃对励磁变实施有效保护。为此有必要对励磁变的保护方案及其高压侧保护用电流互感器的选择作些探讨。

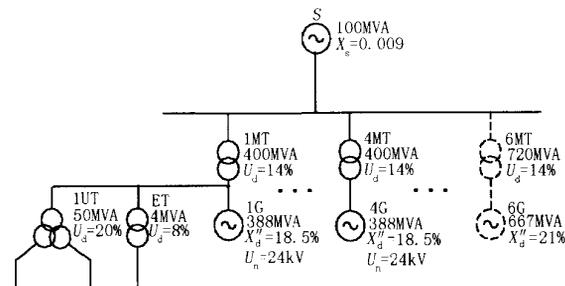


图1 电气系统接线示意图

Fig. 1 Electrical single line scheme

为便于讨论,本文以某厂一期设计 4 台300 MW 级机组,最终规模再扩建 2 台600 MW级机组为例,且假定全部发电机均接入220 kV系统。其电气系统接线示意图见图1,等值阻抗见图2,阻抗标么值换算见表1。且算得 d_1 和 d_3 点短路电流分别为 113.57 kA和1.203 kA。

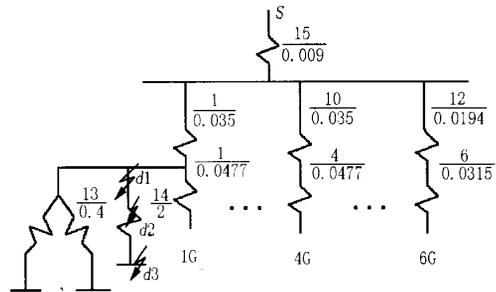


图2 电气系统等值阻抗图

Fig. 2 Equivalent reactance

表1 电气元件阻抗换算表 ($S_j = 100\text{MVA}$)

Tab. 1 Table for the reactance of the main equipment ($S_j = 100\text{MVA}$)

编号	名称	额定电流/A	百分阻抗值	换算式	标么值
1~4	发电机	9 334	$X = 18.5\%$	$18.5\% \times \frac{100\text{MVA}}{388\text{MVA}}$	0.0477
5,6			$X = 21\%$	$21\% \times \frac{100\text{MVA}}{667\text{MVA}}$	0.0315
7~10	主变压器	9 623	$U_d = 14\%$	$14\% \times \frac{100\text{MVA}}{400\text{MVA}}$	0.035
11~12				$14\% \times \frac{100\text{MVA}}{720\text{MVA}}$	0.0194
13	高压厂变	1 023	$U_d = 20\%$	$20\% \times \frac{100\text{MVA}}{50\text{MVA}}$	0.4
14	励磁变	96.23	$U_d = 8\%$	$8\% \times \frac{100\text{MVA}}{4\text{MVA}}$	2

2 励磁变保护方案

励磁变主保护方案不外乎差动保护和电流速断

保护。图3和图4分别为励磁变装设差动保护和电流速断保护方案图,由于励磁变分支事实上对机组构成了不完全差动保护接线,因此图中还画出了发电机变压器组(以下简称发变组)范围内与励磁变保护有关的主保护配置图。下面将就励磁变保护方案中的一些问题作些讨论。

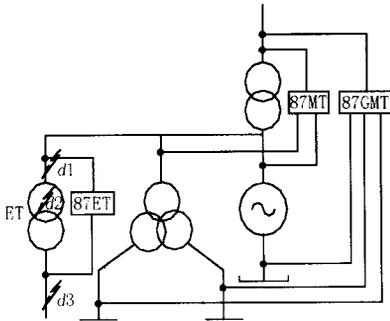


图3 励磁变采用差动接线保护方案

Fig. 3 Differential protection scheme

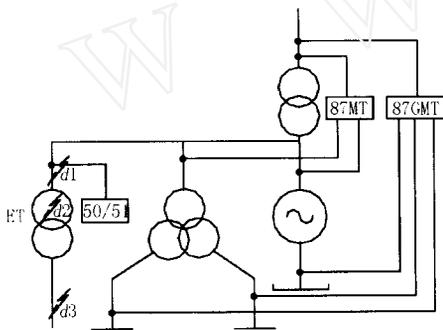


图4 励磁变采用速断过流保护方案

Fig. 4 Over-current protection scheme

2.1 励磁变分支对发变组差动保护和主变压器差动保护的影响

从图3和图4接线可知,由于励磁变分支未接入发变组差动保护和主变压器差动保护(以下合称机组差动保护)回路,因而构成了机组差动保护的不完全接线,对此需要考虑如下影响:

(1) 励磁变的正常工作电流是否会引起机组差动保护误动

据大型发电机变压器继电保护整定导则,机组差动保护的最小动作电流 $I_{op.min}$ 应大于差动保护回路不平衡电流 $I_{unb.min}$,当变压器带额定负荷时:

$$I_{unb.min} = K_{rel}(K_{er} + U + m) I_N / n_a \quad (1)$$

式中: I_N 为变压器的额定电流; n_a 为机组差动保护电流互感器变比,对300 MW级机组,通常为15 000/5; K_{er} 为可靠系数,取1.3~1.5; K_{er} 为电流互感器的比误差,对于10P型TA取0.03×2; U 为变

压器调压引起的误差,取调压范围中偏离额定值的最大值,本例中为0.075; m 为电流互感器变比未完全匹配产生的误差,取0.05。

将各系数代入式(1),得

$$I_{unb.min} = 1.5 \times (0.06 + 0.075 + 0.05) \times 9623A \div 15\ 000/5 = 0.89\ A$$

由于机组差动保护为不完全接线,故差动回路的不平衡电流中尚应计及励磁变正常工作电流对其影响。本例励磁变最大可能的工作电流 $I_{N.E}$ 的大小为:

$$I_{N.E} = 96.23\ A \div 15\ 000/5 = 0.032\ A$$

(15 000/5 为归算至机组差动保护回路TA电流比)。

因此正常工况下机组差动保护回路不平衡电流: $I_{unb} = I_{unb.min} + I_{N.E} = 0.89 + 0.032 = 0.922\ A$ 。为使保护不发生误动,要求 $i_{op.min} > I_{unb}$,在工程计算中,通常取 $I_{op.min} = (0.2 \sim 0.5) I_N / n_a$,这里暂按 $0.3 I_N / n_a$ 进行估算,即:

$$I_{op.min} = 0.3 I_N / n_a = 0.3 \times 9\ 623\ A \div 15\ 000/5 = 0.3 \times 3.21\ A = 0.963\ A > 0.922\ A$$

计算结果表明,只要保护整定计算中充分考虑励磁变的正常工作电流影响,不完全接线的机组差动保护不会发生误动。也就是说,由于励磁变容量相对较小,其正常工作电流仅占全部不平衡电流的3.5%,事实上不会对机组差动保护的整定计算产生实质性影响。

(2) 励磁变低压侧短路时机组差动保护能否可靠动作

由于大容量机组的励磁变高压分支中没有装设任何开断短路电流的设备,一旦励磁变低压侧 d_3 点发生短路,无论由励磁变专用保护动作,还是由机组差动保护动作,都必须立即停机。此时如机组保护真能可靠动作,则可不装设励磁变专用保护。

已知励磁变低压侧 d_3 点三相短路电流为1 203 A,将其归算至机组差动保护二次回路的短路电流为:

$$I_{d3} = 1\ 203\ A \div 15\ 000/5 = 0.401\ A$$

计及差动回路的不平衡电流后,即流入继电器的电流 $0.89\ A + 0.401\ A = 1.291\ A$ 已大于机组差动保护定值电流0.963 A。但从保护意义上说,机组差动保护对励磁变低压侧 d_3 点发生短路的灵敏度是不满足要求的。因此励磁变低压侧短路时机组差动保护不能保证可靠动作,需要装设励磁变专用保护。

2.2 励磁变 TA 准确限值系数选择

前面提到如在励磁变高压侧装设保护,励磁变保护用 TA 势必体积庞大,造价昂贵,安装困难。对此讨论如下。

2.2.1 不能以励磁变分支高压侧引线短路作为选择励磁变 TA 准确限值系数的条件

通常为保护快速、可靠地动作,要求在图 3 和图 4 中励磁变分支高压引线 d_1 处短路时,励磁变保护用电流互感器在最大短路电流作用下仍应保证其复合误差。已知此点短路电流为 $I_{K1} = 113.57 \text{ kA}$,而励磁变高压侧额定电流仅为 $I_{N.E} = 96.23 \text{ A}$ 。由于励磁变分支额定电流很小,而 d_1 点短路电流很大,即使励磁变 TA 一次侧额定电流按 1000 A 考虑(比励磁变额定电流大 10 倍),通过此电流互感器的短路电流与其额定一次电流之比也将达 100 倍左右。以此条件选择电流互感器的准确限值系数无论是从技术性还是从经济性考虑都是不可取的,因此不能按励磁变高压侧引线短路作为选择励磁变 TA 的条件。

2.2.2 可以利用不完全接线的机组差动保护来降低 TA 准确限值系数

不完全接线的机组差动保护对励磁变内部短路具有一定的保护作用。例如当励磁变高压绕组始端发生短路时机组差动保护肯定会动作。因此可以充分利用机组不完全差动保护接线(而且是双重化保护)和励磁变专用保护来共同分担整个励磁变保护。也就是说,励磁变内部短路时产生的短路电流在数值上只要能满足机组差动保护可靠动作要求,机组差动保护自然会对其提供有效保护。仅当此短路电流大小不满足机组差动保护灵敏性要求时,才要求由励磁变专用保护发挥作用。显然,励磁变保护用 TA 只需按此条件考虑即可。困难在于如何确定这种保护分担界面。如果囿于讨论励磁变绕组内部什么部位,发生哪种短路,乃至去求出对应的阻抗来确定上述条件的界面,必将永远得不到解答,因为励磁变绕组内部短路具有无数种组合。但是,无论什么样的短路都会产生短路电流,而且一定的短路电流值都对应一定的短路阻抗。据此理由,可以不必拘泥于探求励磁变绕组内部各种各样短路形式的阻抗值,而是直接从短路电流入手,即从满足机组差动保护灵敏性的角度出发,找出在假定条件下最小动作电流,以此推出短路阻抗值,依据上述阻抗与电流对应的观点,进而得出确定准确限值系数所需的最大短路电流。

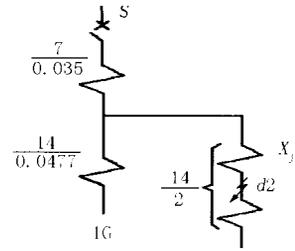


图 5 最小运行方式下励磁变内部短路等效阻抗图

Fig. 5 Equivalent reactance at internal faults under the smallest condition

为便于推算,假定发电机的正序电抗等于负序电抗,同时暂且假定在励磁变内部距始端相同匝数部位发生了两相短路和三相短路,且忽略励磁变激磁阻抗,其等效电路是线性的,因而满足 $I_k^{(2)} = \sqrt{3}/2 I_k^{(3)}$ 的关系式。众所周知,欲使机组差动保护可靠动作,必须满足最小运行方式下两相短路时保护灵敏度要求,计算用等效阻抗图见图 5。经前面计算已知机组差动保护动作电流整定值为 0.953 A ,据

灵敏度计算公式 $K_{sen} = \frac{I_{k.min}^{(2)}}{I_{op.min}} = \frac{I_{k.min}^{(2)}}{0.953 \text{ A}} \geq 2$,得励磁变绕组内部 d_2 点两相短路时能使机组差动保护可靠动作的最小短路电流为:

$$I_{d2.min}^{(2)} = 2 \times 0.953 \text{ A} = 1.906 \text{ A}$$

进而可求出 d_2 点在相应条件下的三相短路电流值:

$$I_{d2.min}^{(3)} = 1.906 \text{ A} \times 2/\sqrt{3} = 2.2 \text{ A}$$

此三相短路电流标幺值为:

$$I_{d2.min}^{(3)*} = \frac{I_{k.min}^{(3)}}{I_N/n_a} = \frac{2.2 \text{ A}}{3.113 \text{ A}} = 0.707$$

(式中 3.113 A 为发电机二次回路的额定电流);

查汽轮发电机运算曲线得转移电抗为 1.45 ,归算至以系统容量为基准的电抗值,得: $X_{d2} = 0.373$ 。

此计算值即为在励磁变绕组内部假定部位短路时,能保证机组差动保护可靠动作的总短路阻抗,由图 5 即可求出所讨论的励磁变内部 d_2 点短路等效阻抗: $X_j = X_{d2} - X_1 = 0.373 - 0.0477 = 0.325$ 。

有了假定阻抗 X_j ,不难算出图 2 接线中最大运行方式下 d_2 点发生三相短路时流过励磁变的短路电流。经等值电路化简,算得此时最大三相短路电流 $I_{d2.max}^{(3)} = 6.92 \text{ kA}$ 。

上面计算是在假定励磁变内部 A、B、C 三相绕组中距其始端相同匝数部位发生二相和三相短路,而且是基于线性电路的条件下求得的。因为我们的

目的在于大致估算出(而不是准确计算)某一短路电流值作为保护分担界面的量化概念,以便确定当外部电路中流过的短路电流大于此电流值(或呈现的等效短路阻抗小于 x_j)时,由机组差动保护动作对励磁变实施保护,而小于此电流值(或呈现的等效短路阻抗大于或等于 x_j)时,则由励磁变专用保护工作。而没有必要去探求绕组内部短路究竟是什么形式,发生在什么部位,以及究竟存在多少种组合可以作为机组差动保护和励磁变专用保护的分担界面。

根据上面计算结果,并注意到某些制造厂机组的电抗值可能较小,且有些系统的短路容量较大,在充分考虑安全、可靠等因素后,可以大胆假定励磁变

专用保护开始发挥作用时的最大短路电流不会超过 10 ~ 15 kA。显然以此电流作为选择励磁变 TA 的依据,即可大大降低电流互感器的准确限值系数,从而减少电流互感器的尺寸,并降低造价。

2.2.3 励磁变高压侧电流互感器准确限值系数选择

按照国标《GB1208-1997 电流互感器》的规定,适合励磁变 TA 的参数组合有:(500 A,10P30),(750 A,10P20),(1000 A,10P15),(1500 A,10P10)几种。曾就这四种电流互感器体积、重量和参考价向制造厂调研,调研内容还包括(400 A,10P40)非标产品。据几家厂家回函分析,大致结论如下:

表 2 不同额定值的电流互感器相关数据比较

Tab.2 Comparison of data for the different transformation ratios

额定电压 /kV	额定电流 /A	准确级次	额定输出 * /VA	外形尺寸 (相对值 **)	重量 (相对值 **)	参考价 (相对值 **)
20	1500/5	10P10	50,60	82%~100%	67%~100%	76%~100%
20	1000/5	10P15	40,50,60	100%*	100%	100%
20	750/5	10P20	20,30,50	100%~127%	100%~133%	100%~109%
20	500/5	10P30	10,15,40,50	108%~255%	122%~273%	108%~230%
20	400/5	10P40	5,10,25,30	108%~291%	122%~273%	121%~230%

*不同变比的额定输出各厂只有一种,表中罗列了各厂额定输出。

**表中以 1000/5,10P15 电流互感器为参照基准。

从表 2 可知:a)同样准确级次和额定电压条件下,TA 的额定电流比越小,其外形尺寸越大,重量越重,价格越高;b)TA 的额定电流比越小,要求有较大的额定输出越不容易。c)额定一次电流为 750 A,1000 A,1500 A 三种电流互感器在满足准确限值系数和所需负荷的前提下相关数据基本相同。由于励磁变容量较小,应尽量选择较小的额定一次电流,即 750 A 或 1000 A 的电流互感器。当然也可选择 500/5 A 电流互感器,但这时其额定输出不能超过 15 VA,否则电流互感器的外形尺寸、重量和造价将会大大增加。另外,对准确限值系数为 40(非标)的 400/5 A 电流互感器进行调研结果表明:多数厂家或容量太小(仅为 5 VA),或尺寸、重量及价格偏高。仅只沈阳互感器厂生产的 LRB-20,400/5 A,30 VA,10P40 型电流互感器比较适合,此电流互感器与该厂 1000/5 A,50 VA,10P15 同型互感器相比,其外型尺寸、重量和价格分别增加了 2.91、2.67 和 1.67 倍。

在此顺便指出,上述励磁变保护用的 TA 为套管型穿心式电流互感器,不会感受到短路电流的应力作用,某些工程中按承受短路电流动稳定能力作为选择此电流互感器条件之一是不恰当的。

2.3 励磁变保护方案讨论

图 3 和图 4 均为常用励磁变主保护方案。其中图 3 的励磁变主保护采用差电流接线,保护范围明确,但是需在励磁变低压侧增加一组电流互感器及相应二次电缆;图 4 采用电流速断作为主保护,接线简单,然而通常情况下为避免越级动作,电流速断保护需按躲过励磁变低压母线最大短路电流和励磁涌流条件整定,因此不能 100% 保护励磁变内部绕组及低压侧引线短路。建议励磁变采用电流速断保护以简化接线,因为励磁变是专门用于向发电机励磁回路的可控功率桥供电,而功率桥交流臂支路和每个晶闸管均装有快速熔断器保护。一旦功率桥的交流母线或直流母线发生短路,也势必要求立即停机,此时如励磁变保护动作跳闸,有利于故障清除。而当短路发生在快速熔断器之后时,由于熔断器具有快速断弧特性,且其额定电流很小,故励磁变速断保护理应能和快速熔断器的动作时间相配合。如一定要追求选择性,可以考虑采用限时速断保护来进行配合。依据上述观点,励磁变的电流速断保护范围不妨包括其低压侧引线短路,只按躲过励磁涌流条件整定,以便 100% 保护励磁变绕组,即:

$$I_{op} = (3 \sim 5) I_N = 5 \times 96.23 \text{ A} = 481.2 \text{ A}$$

已知励磁变低压母线短路时的电流为 1203 A, 则两相短路电流为 $1203\text{A} \times \sqrt{3}/2 = 1042 \text{ A}$, 此时保护灵敏系数 $K_L = \frac{1042\text{A}}{481.2\text{A}} = 2.17$, 可知按此整定能够可靠保护励磁变低压侧母线的短路故障。

3 结论

综合以上论述, 归纳如下:

(1) 依据相关规程要求应配置必要的励磁变继电保护。

(2) 励磁变 TA 准确限值系数不必按其高压分支短路条件选择, 300 MW 及以下机组可按一次短路电流 10 ~ 15 kA 作为选择励磁变 TA 准确限值系数的条件。TA 额定电流比应尽量接近励磁变一次额定电流, 但需考虑其外形尺寸、重量和造价等各种因数。

(3) 励磁变可以采用电流速断保护以简化接线,

为了 100% 保护励磁变绕组及低压侧引线, 建议此电流速断保护仅按躲过励磁变涌流条件整定。如要求保证选择性, 可采用限时速断保护。

参考文献:

- [1] GB14285-93. 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [2] DL/T650-1988. 大型汽轮发电机自并励系统技术条件[S].
- [3] DL/T684-1999. 大型发电机变压器继电保护整定导则[S].
- [4] 陈学庸. 机端励磁变压器保护方式讨论[J]. 电气设计技术, 1997, (1): 31.
- [5] 齐春. 发电机采用自并励励磁系统的保护问题[J]. 电气设计技术, 1999, (2): 36.

收稿日期: 2002-07-16; 修回日期: 2002-08-20

作者简介:

徐绍麟(1939 -), 男, 大学本科, 教授级高工, 从事发电厂、变电所电气二次接线设计工作。

Discussion on a practicable relay protection scheme for the excitation transformer

XU Shao-lin

(Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: It is difficult to size the current transformer at high voltage side of the excitation transformer, since the extreme short circuit current would take place at the large generator outlet of a generator transformer set. So that to decrease the accuracy limit factor an idea to take the protective duty of internal faults cooperating with unclosed differential protections of the generator transformer/main transformer and the relay protection special for the excitation transformer is presented. And some rated transformation ratios of the current transformer are proposed for reference. Meanwhile comparing the differential protection with the over-current protection of the excitation transformer, the over-current protection is suggested to simplify the relay protection.

Key words: excitation transformer; relay protection; accuracy limit factor; rated transformation ratio

(上接第 29 页)

- (1. Dept. of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 00002, China;
2. East China Electrical Power Dispatching Communication Center, Shanghai 200002, China)

Abstract: This paper proposes a progressive fault diagnosis expert system based on recorded fault data. It is composed of two parts: substation system diagnoses the fault reason and fault phase, then upload the brief report to the mater station system which integrates several substation reports, diagnoses the fault deeply and gives an analysis of the operation of protection system and related equipment. The system gains fault information by the recorded fault waves, SOE and protector events, adopts the CLIPS based fault diagnosis expert system engine, so it can diagnose the fault accurately and quickly and relieve the burden of operators.

Key words: power system; fault diagnosis; distributed system; expert system