

三峡水电站发电机变压器组内部短路 主保护方案的理论分析和试验研究

王维俭 刘俊宏 清华大学电机工程及应用电子技术系(100084)

【摘要】 根据对龙羊峡电厂、岩滩电厂和二滩电厂机组保护的理论分析、试验研究和运行经验总结,本文提出了三峡电站发—变组内部短路主保护方案,即:发电机第一主保护为高灵敏单元件横差保护,第二主保护为不完全纵差保护;变压器第一主保护为故障分量标积制动式纵差保护,第二主保护为发—变组不完全纵差保护,后者均采用三相电流平方和的谐波制动方式。

【关键词】 三峡电站 发电机变压器组 内部短路 主保护

1 发电机、变压器基本情况

发电机每相并联分支数 a 假设为 6、7 或 8,中性点接成三组,构成两组高灵敏单元件横差保护。变压器可以是三相双卷、单相双卷,低压为分裂绕组,也可以是三相双卷无分裂, Y_N , $d-11$ 接线方式,高压侧中性点直接接地。

发—变组为扩大单元接线或联合单元接线。高压母线为 $1\frac{1}{2}$ 接线方式。季调节水库,枯水期(1~4月),机组开停频繁。

2 发电机第一主保护——高灵敏单元件横差保护

此保护对机内各种相间、匝间短路均有很高的灵敏度,即使发电机不并网运行,能反映部分定子绕组断线故障;但不能反映机端引线的相间短路,对于分相封闭母线,发生该相间短路的几率甚小,何况还有两套不完全纵差保护能灵敏反映该短路。

获得高灵敏度的技术措施是:(1)大幅度减小横差保护用 CT 变比,一般可选取 CT 一次额定电流为 $0.01\sim 0.05I_{Ng}$ (I_{Ng} 为发电机额定电流), (2)提高三次谐波滤过比至 50 以上, (3)减小保护动作电流定值,一般小于 $5\%I_{Ng}$, 龙羊峡电厂实际整定为 3.68%, 石泉电厂则为 2.7%, 运行情况良好。

采用清华大学研究的“多回路分析法”计算软件,详细计算了龙羊峡电厂机组内部短路的故障电流,在不并网工况下,此保护的灵敏度 K_{sen} 为(动作电流整定为 5%):

a_6 分支 28.6% 匝间短路, $K_{sen} = 2.10$;

a_4 74.3% 对 a_6 48.6% 匝间短路, $K_{sen} = 2.10$;

a_6 31.4% 对 b_4 2.9% 相间短路, $K_{sen} = 5.20$ 。

三峡电站发电机定子绕组中性点侧接线方式要充分考虑装设两套单元件横差保护的 Need 和两套不完全纵差保护的技术性能,作为设计可作如下初步安排:

$a = 6$ 时,每相的 1、2 分支、3、4 分支和 5、6 分支分别组成三组,三相形成三个中性点 O_1 、

O_2 和 O_3 , 在 O_1O_2 和 O_2O_3 的中性点连线上接两个 CT 和两套横差保护, 根据发电机内部各种短路的计算分析, 确定两套横差保护是“并联”或“串联”出口(各种内部短路时两套横差均有足够灵敏度, 则采用“串联”出口)。

$a = 7$ 时, 每相按 1、4、7 分支、2、5 分支和 3、6 分支组成三组, 也形成 O_1 、 O_2 、 O_3 三个中性点和两套横差保护。

$a = 8$ 时, 每相按 1、4、7 分支、2、5、8 分支和 3、6 分支组成三组, 三个中性点, 两套横差保护。

高灵敏单元件横差保护的動作電流整定, 应在发电机作常规短路试验时, 实测横差保护的基波和三次谐波不平衡电流, 用线性外推法估算在最大外部短路时的最大不平衡电流, 考虑三次谐波滤过比 K_3 和暂态系数 K_{aper} 、可靠系数 K_{rel} , 最终确定保护的動作電流定值 $I_{op.r}$:

$$I_{op.r} = K_{rel}K_{aper} \sqrt{I_{unb.1\max}^2 + (I_{unb.3\max}/K_3)^2}$$

式中 $I_{unb.1\max}$ —— 最大基波不平衡电流(有效值);

$I_{unb.3\max}$ —— 最大三次谐波不平衡电流(有效值);

由发电机内部短路专用分析计算软件获得有关故障电流后, 即可校验该保护的灵敏度。

3 发电机不完全纵差保护

此保护与传统纵差保护的显著不同是: 传统纵差保护两侧 CT 的一次电流均为发电机相电流, 不完全纵差保护在发电机中性点侧的 CT, 一次电流仅接入部分相电流, 即一相 a 并联分支中仅有 m 个分支电流接入不完全纵差保护,

$$a/2 \leq m \leq 1 + a/2, m \text{ 取较大整数。}$$

以三峡电站发电机组为例, 有

$a = 6$ 时, $m = 4$, 即以每相 1、2、3、4 分支接入。

$a = 7$ 时, $m = 5$, 即以每相 1、2、4、5、7 分支接入。

$a = 8$ 时, $m = 5$, 即以每相 1、3、4、6、7 分支接入。

当中性点侧 CT 接入所有分支电流(即相电流) 时, 它就是传统纵差保护, 该保护对相间短路灵敏度很高(表 1), 但不能反映匝间短路和定子绕组开焊故障。

表 1 二滩电站发电机纵差保护灵敏度(每相并联 6 分支)

故障工况		每相中性点侧接入分支号						
		$a_1 20 \text{ 匝}$ $\sim b_6 26 \text{ 匝}$	$a_1 2 \text{ 匝}$ $\sim b_6 4 \text{ 匝}$	$a_1 2 \text{ 匝}$	$a_1 6 \text{ 匝}$	$a_1 1 \text{ 匝}$ $\sim a_6 23 \text{ 匝}$	$a_1 0 \text{ 匝}$ $\sim a_6 24 \text{ 匝}$	满载 a_1 分支开焊
不完全纵差	1, 2, 3, 4	A	8.04	14.90	0.50	1.10	13.76	0.61
		B	0.575	14.37	0.22	0.156	0.22	0.46
		C	0.51	0.27	0.24	0.71	0.44	0.05
	3, 4, 5, 6	A	1.66	16.73	0.88	1.81	12.31	2.88
		B	9.41	17.25	0.21	0.24	0.34	0.21
		C	0.50	0.25	0.30	0.68	0.36	0.12
传统纵差	1, 2, 3, 4, 5, 6	A	5.88	15.90	0	0	0	0
		B	5.88	15.90	0	0	0	0
		C	0	0	0	0	0	0

当中性点侧 CT 接入每相分支数 $m < a$ 时, 构成不完全纵差保护, 此保护对发电机内部相

间、匝间短路以及定子绕组开焊均有作用,但相间短路时的灵敏度有时比传统纵差稍低。

由此可见,不完全纵差保护是以改变传统纵差保护中性点侧 CT 的每相接入分支数 m ,达到对发电机所有短路故障起保护作用。 m 确定后,每相哪些分支接入不完全纵差保护,除了应考虑本保护的灵敏度要求外,还应注意装设两套高灵敏单元件横差保护的需要。

4 发电机 — 变压器不完全纵差保护

此保护对变压器内部匝间短路、高压侧单相短路、引线相间短路以及发电机内部各种短路故障起保护作用,由变压器高压侧每相相电流与发电机中性点侧每相部分分支电流构成差动接线,以三峡电站为例,发电机中性点侧每相接入分支为:

$a = 6$ 时,接入 3、4、5、6 分支;

$a = 7$ 时,接入 1、3、4、6、7 分支;

$a = 8$ 时,接入 2、3、5、6、8 分支。

表 1 中讨论了 $a = 6$ 的发 — 变组不完全纵差保护在发电机内部故障时的灵敏度。对于变压器内部高、低压绕组发生匝间短路或高压绕组单相短路时的保护灵敏度分析计算有待进一步研究。

5 变压器第一主保护 —— 故障分量标积制动式纵差保护

上述变压器和发电机及其引线的公共的一套主保护为不完全纵差,所以选用另一套原理不同的变压器第一主保护,即故障分量标积制动式纵差保护。

当变压器为三相双卷(无分裂绕组)时,其动作判据为

$$|\Delta \dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_2| > -S |\Delta \dot{I}_1| |\Delta \dot{I}_2| \cos \psi$$

式中 $\Delta \dot{I}_1$ 、 $\Delta \dot{I}_2$ 各为两侧故障分量电流, ψ 为其相位差, S 为制动系数。

若变压器为双卷分裂式绕组,则以三卷变压器对待,此时动作判据为:

$$\left| \sum_{i=1}^3 \Delta \dot{I}_i \right| > -S \Delta I_{\max} \Delta I_{PS} \cos \psi'$$

式中 $\Delta I_{\max} = \max[|\Delta \dot{I}_1|, |\Delta \dot{I}_2|, |\Delta \dot{I}_3|]$

设 $\Delta I_{\max} = |\Delta \dot{I}_3|$

则 $\Delta I_{PS} = \left| \sum_{i=1}^2 \Delta \dot{I}_i \right|$

$\psi' = \arg(\Delta I_{\max} / \Delta I_{PS})$

考虑到变压器分裂电抗很大,两个低压分裂绕组(以 1、2 表示)间短路电流不大,所以 $\Delta I_{\max}$ 取为 $\Delta \dot{I}_3$ (高压侧短路时的故障分量电流)。

为防止变压器空载合闸励磁涌流或稳态过励磁电流引起变压器纵差保护误动作,还采用下列闭锁判据:

$$\sum_{i=a,b,c} \Delta I_{2i}^2 / \sum_{i=a,b,c} \Delta I_{1i}^2 > 0.0625$$

$$\sum_{i=a,b,c} \Delta I_{5i}^2 / \sum_{i=a,b,c} \Delta I_{1i}^2 > 0.125$$

式中 ΔI_{1i} 、 ΔI_{2i} 、 ΔI_{5i} 各为基波、二次谐波和五次谐波故障分量电流有效值。

上述两个动作阈值(0.0625 和 0.125),经动模试验证明,纵差保护在空载合闸或过励磁工况下不发生误动。

(下转 25 页)

4 结论

理论分析证明该数据采集系统具有高分辨率, 高抗干扰能力, 接线简单, 成本低廉以及广泛的采样速率使用范围等一系列优点, 笔者在试验室利用 16 位 24MHz 主频的单片机对此新方案进行了试验验证, 并取得了令人满意的结果, 完全满足微机保护对数据采集系统的要求。可以预见, 此种原理的数据采集系统在微机保护等领域将具有广泛的应用前景。

参考文献

- 1 杨奇逊 微机继电保护基础 北京: 水利电力出版社, 1988. 11
- 2 陈德树 计算机继电保护原理与技术 北京: 水利电力出版社, 1992. 11
- 3 许昌继电器研究所 $WXH-11X$ 型微机线路保护说明书

(上接 7 页)

当将阈值 0.0625 改为 0.1 时, 纵差保护在某些空载合闸条件下有误动行为。

当将阈值 0.0625 改为 0.05 时, 所有空载合闸操作均不造成纵差保护误动。此时若一相存在 10%~15% 的匝间短路, 进行空载合闸操作, 该保护能在 23~31ms 内动作。

6 零序差动保护

三峡电站升压主变为 $Y_N, d-11$ 接线, 上述纵差保护对高压绕组单相短路的灵敏度不高, 为此增设零序差动保护, 由高压侧三相 $CT-5$ 中性点 CT 构成。此保护与前述纵差保护的显著不同是: (1) 被保护对象仅包括高压绕组, 保护区内只涉及电路, 因此零序差动保护原则上与空载合闸励磁涌流无直接关系, 完全不需要复杂的防涌流误动措施。(2) 动作电流与调压分接头的调整无关, 且所有 CT 均同型号, 所以零序保护既灵敏又简单。

7 结论

根据对国内大型水电厂(龙羊峡、岩滩、天生桥一级、宝珠寺、二滩等)水轮发电机内部故障的理论分析, 总结龙羊峡、石泉、岩滩和十三陵等电厂机组保护的运行经验, 以及各种现场试验和动模试验研究成果, 本文提出了三峡电站发电机变压器组的内部故障主保护配置方案。该方案均有成熟的运行经验, 技术性能完善, 满足大型机组主保护的双重化要求, 待三峡电站发电机组供货单位确定后, 就应联系有关发电机电磁设计资料, 为进行发电机内部故障分析计算, 最终确定主保护的技术方案创造必要条件。

RELAY

Vol 25 No. 1

February 1997

CONTENTS AND ABSTRACTS (Partial)

THEORETICAL STUDY AND CALCULATION

The Main Protection Scheme of Internal Short Circuit for Generator Transformer Bank of Three Gorges Hydroelectric Power Station Wang Weijian, Li Junhong (5)

Based on the theoretical analysis and test research of the main protections for Long Yang Xia station and Er Tan station, the main protection schemes of Three Gorges station are put forward in this paper. The first main protection for generator is the unit transverse differential relay with high sensitivity, the second main protection is the incomplete differential relay. For transformer, the differential relay with the restraint of scalar product of fault component may be used as the first main protection, and the incomplete differential relay for generator-transformer is the second main protection. The differential relay of transformer is restrained by harmonic of square sum of three phase current.

Key words: Three Gorges Station Generator-Transformer bank Internal short circuit Main protection
Sectional Algorithm for Open-Conductor Plus Short Circuit Fault in Protective Relay Setting Calculation Cao Guochen, Tan Xingquan (8)

This paper presents a sectional algorithm for open-conductor plus short circuit fault in protective relay setting calculation. The algorithm has the following characteristics:

- 1) Storage requirements can be reduced
- 2) The nodal impedance matrices of each original sequence subsystems do not need to be modified
- 3) Any type of simple fault can be solved as a special issue of open-conductor plus short circuit fault

Key Words: Protective relays Setting calculation Sectional algorithm

Analysis and Prediction of Random Variable about the Reclose Time of Adaptive Recloser Fang Xingyan, et al (13)

Adaptive recloser can discriminate permanent fault and transient fault of power system to decide reclosing or not, thus avoiding unnecessary impact on the system. The adaptive recloser also should be able to select the best reclose time automatically. This paper made a prediction of random variable about the reclose time of adaptive recloser and presented an algorithm of advancing to send closing impulse.

Key words: Adaptive reclose Random analysis

NEW TECHNOLOGY RESEARCH AND APPLICATION

A Way of Quickly Enabling Distance Protection in Fault During Swing Blocking ... Zhao Zhihua, et al (18)

This paper introduces a way of enabling distance protection in fault during swing blocking condition, discusses the change of electrical quantity during swing condition, summarizes some swing blocking schemes home and abroad, and presents a realizing way of swing blocking based on the feature of electrical quantity in fault during swing blocking condition in order to ensure enabling the distance protection in fault during swing blocking condition to quickly cut off the fault selectively.

Key Words: Distance protection Swing blocking condition

A New Scheme of Data Collection System for Microprocessor-Based Protection Zhang Keyuan (22)

A new scheme of data collection system of microprocessor-based protection basing on pulse width measurement (PWM) is presented. The theoretical analysis and test result have proved that the data collection system has the advantages of high resolution, high anti-interference ability, simple and reliable connections, low cost, and broad range of sampling rate, and can completely satisfy the requirement of microprocessor-based protection.

Key words: Microprocessor-based protection Data collection system PWM Triangle wave generator

A Calculating Method of Power System Frequency Based on Digital Sampling Li Ruisheng (26)

A method of calculating frequency and its rate of variation by sampling the bus voltage of power system is introduced. The method of minimizing its error is also discussed to reduce one input circuit of measuring level.