

# 三峡发电机内部故障主保护及 TA 配置方案的研究总结

桂林<sup>1</sup>, 王祥珩<sup>1</sup>, 王维俭<sup>1</sup>, 张学深<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 简单介绍了三峡左岸电站 14 台发变组内部故障主保护及 TA 配置方案, 对清华大学关于三峡发电机内部故障主保护及 TA 配置方案所做的工作进行了总结, 从主保护配置方案的灵敏性、发电机中性点侧 TA 的数目等方面对两种保护方案进行了对比, 为三峡工程今后的工作提供借鉴。

**关键词:** 三峡电站; 发电机; 内部故障; 主保护及 TA 的配置方案; 灵敏性

**中图分类号:** TM772      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2002)02-0029-05

## 1 引言<sup>[1]</sup>

三峡电站的主接线均为发电机变压器组单元, 发电机和变压器之间预留发电机断路器 GCB 的安装位置, 机端接厂用变压器和励磁变压器。两发电机变压器组在变压器高压侧(500kV 侧) 相连组成联合单元, 直接接至  $1\frac{1}{2}$  接线方式的 500kV 的 GIS 封闭母线。

三峡电站第一期, 每一发变组的主保护均设置在机旁单元控制室的两块保护屏上(A 屏和 B 屏)。在 A 屏上配置了发电机完全纵差保护和裂相保护(即裂相横差保护), 在 B 屏上配置了发电机不平衡保护(即零序电流型横差保护)。定子每组分支按 1-2-3 分支和 4-5 分支进行分组, 在两组引出线上均设电流互感器(TA)。发电机保护均用 5P20 等级的 TA。在主变压器上配置了两套差动保护, 分装在 A 屏和 B 屏上, 每套差动保护的电流分别取自主变高压侧和发电机机端的 TA, 用于主变高压侧的 TA 为具有暂态特性的小气隙结构型式(TPY 型)。

## 2 发电机内部故障的仿真计算及主保护方案灵敏性的对比分析

三峡电站的最终规模为 32 台 700MW 机组, 总装机容量为 2.24GW, 是世界上最大的水力发电站。其发电机组造价昂贵、结构复杂, 一旦出现故障, 检修期长, 将造成巨大的直接和间接经济损失, 因此三峡机组内部故障主保护装置的拒动或误动, 都将产生严重后果, 决不能掉以轻心。各种保护方案的选择及优化配置都必须建立在对发电机内部故障的全面计算及保护灵敏度的认真分析的基础上<sup>[2]</sup>。

下面简单介绍一下三峡发电机(ABB)的基本情

况: 单机额定容量为 700MW, 定子水冷, 定子槽数为 540 槽, 每分支 36 槽, 自并励方式。发电机额定参数为:  $U_N = 20\text{kV}$ ,  $I_N = 22453\text{A}$ ,  $\cos \varphi_N = 0.9$ ,  $I_{f0} = 2100\text{A}$ ,  $I_{fN} = 3734\text{A}$ 。升压变压器和系统等值电抗(折合到发电机电压级)约为  $0.2p.u.$ 。

根据对发电机(ABB)绕组展开图的分析, 发现:

540 种同槽故障中同相同分支匝间短路数为 420 种, 短路匝数分别为 1、3、5、7 匝, 各有 105 种; 同相不同分支匝间短路数为 60 种; 相间短路数为 60 种。

10950 种端部交叉故障(文中简称为端部故障)中同相同分支匝间短路数为 930 种, 短路匝数分别为 2、4、6、7 匝等, 其中 2 匝、4 匝、6 匝、7 匝、7 匝以上分别有 105、105、240、90、390 种; 同相不同分支匝间短路数为 660 种; 相间短路数为 9360 种<sup>[4]</sup>。

在运用“多回路分析法<sup>[3]</sup>”对三峡发电机(ABB)并网额定负载运行方式下所有可能发生的同槽和端部交叉故障进行仿真计算的基础上, 计算了各种主保护方案——零序电流型横差保护、传统裂相横差保护、不完全裂相横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护的灵敏度, 并对各种主保护方案的灵敏动作数( $K_{sen} > 1.5$ )、可能动作数( $1.0 < K_{sen} < 1.5$ )和不能动作数( $K_{sen} < 1.0$ )进行了统计, 然后进一步分析了各种主保护方案不能动作故障的性质, 如表 1、表 2 所示(将可能动作和不能动作都归为不能动作, 即以灵敏度  $K_{sen} < 1.5$  为界)。

从对各种主保护方案不能动作故障类型的分析, 使我们认识到: 由于各种主保护方案都存在各自的保护死区, 只有通过保护方案的优化配置来实现互补, 才能达到对发电机内部故障的保护范围最大的目的, 即在确立三峡发电机组内部故障主保护配置方案时需考虑各种主保护方案组合的灵敏性。

表 1 三峡发电机并网额定负载时对于同槽故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

主保护方案	构成方式	具体连接形式	不能动作故障数	匝间短路					相间短路
				相同分支				不同分支	
				1 匝	3 匝	5 匝	7 匝		
零序电流型横差保护	一套保护 (2-3 组合)	相邻连接	239	105	87	28	6	0	13
		相间连接	243	105	77	29	12	0	20
	两套保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻	195	105	72	9	1	0	8
		相邻-相间	196	105	65	13	2	0	11
		相间-相间	198	105	60	15	5	0	13
裂相横差保护	传统	相邻连接	113	102	9	2	0	0	0
		相间连接	110	91	15	4	0	0	0
	不完全	相邻-相邻	176	101	24	21	18	12	0
		相邻-相间	155	88	27	20	13	7	0
		裂相横差	147	75	28	20	15	9	0
不完全纵差保护	一套保护 (N=2)	相邻连接	181	105	67	6	3	0	0
		相间连接	183	105	61	13	4	0	0
	两套保护 (2-2 组合)	相邻-相邻	140	105	32	3	0	0	0
		相邻-相间	140	105	29	6	0	0	0
		相间-相间	152	105	38	9	0	0	0
完全纵差保护			480	105	105	105	105	60	0

表 2 三峡发电机并网额定负载时对于端部故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

主保护方案	构成方式	具体连接形式	不能动作故障数	匝间短路					相间短路	
				相同分支				不同分支		
				2 匝	4 匝	6 匝	7 匝			其它
零序电流型横差保护	一套保护 (2-3 组合)	相邻连接	1907	105	69	17	4	0	0	1712
		相间连接	1454	103	60	32	9	6	0	1244
	两套保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻	1378	105	40	1	0	0	0	1232
		相邻-相间	1119	103	38	2	0	0	0	976
		相间-相间	912	101	40	7	0	0	0	764
裂相横差保护	传统	相邻连接	132	65	5	2	0	0	0	60
		相间连接	118	54	6	2	0	0	0	56
	不完全	相邻-相邻	381	32	23	46	18	54	50	158
		相邻-相间	328	38	23	42	13	44	28	140
		裂相横差	295	39	26	44	17	39	28	102
不完全纵差保护	一套保护 (N=2)	相邻连接	292	105	34	3	0	0	0	150
		相间连接	359	103	24	6	0	0	0	226
	两套保护 (2-2 组合)	相邻-相邻	131	105	10	0	0	0	0	16
		相邻-相间	137	103	16	0	0	0	0	18
		相间-相间	129	101	14	0	0	0	0	14
完全纵差保护			1590	105	105	240	90	390	660	0

### 3 发电机内部故障主保护配置方案的研究<sup>[5-7]</sup>

#### 3.1 清华大学提出的主保护配置方案

清华大学关于三峡发电机(ABB)内部故障主保护配置方案研究的基本思路是:

考虑各种保护方案组合的灵敏性

由于各种主保护方案都存在各自的保护死区,只有通过保护方案的优化配置来实现互补,才能达

到对发电机内部故障的保护范围最大的目的。这对微机保护而言,是易于实现的。

综合考虑继电保护的“四性”

要最终确定三峡发电机内部故障主保护配置方案,应综合考虑继电保护的“四性”——选择性、快速性、灵敏性和可靠性,同时应使 TA 配置尽量简单和考虑到发电机中性点引出的方便。

配置两整套微机继电保护装置

《电力系统微机继电保护技术导则》中规定

200MW及以上容量的发电机宜配置两整套微机继电保护装置。每一整套微机继电保护装置应综合被保护设备的完整的主保护(包括纵、横联保护等)及后备保护。每一整套微机继电保护装置装在一块保护屏上,两块保护屏完全相同,当一块屏因故障停运时,另一块屏完全可以独立运行,承担起保护发电机变压器组的全部功能。每块屏上的TA和TV资源为各种主保护和后备保护共享。两块屏的直流操作电源、交流电流/电压输入、跳闸和信号输出均相互独立,以保证高度可靠性。

发电机出口应装设断路器 GCB

在发电机与变压器之间装设断路器 GCB,有利于加快切断主变高压侧断路器与发电机断路器 GCB 间的短路电流,可在很大程度上避免变压器爆炸事故的发生,而且在发电机停机时保留厂用电源。因此,发电机出口装设断路器 GCB 在技术上具有先进性。

建议将中性点侧 TA 装在发电机外

在建设龙羊峡电站时,学习美国大古力电站的做法,将中性点侧 TA 装在发电机内。多年运行经验已证明,只要采用合理的设计方案和安装方法,发电机内装设 TA 是安全可靠的,但的确增加了工程设计和安装的难度。近年来,经与多方讨论,为避免发电机内强磁场及机组振动对 TA 造成的不良影响,并减轻工程设计和安装难度,建议将中性点侧 TA 装在发电机外,而不再采用龙羊峡等电站的做法。二滩电站就是采用将中性点侧 TA 装在发电机外的做法。

基于上述原则,提出了三峡发电机(ABB)内部故障主保护及 TA 配置方案,如图 1 所示。

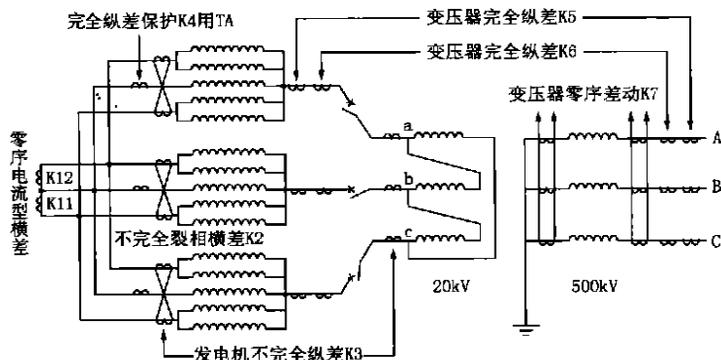


图1 三峡发电机(ABB)变压器组内部故障主保护及TA(资源共享)配置方案

图1中发电机主保护包括零序电流型横差保护(分支1、2与分支3之间,分支4、5与分支3之间各

一套) K11 和 K12,不完全裂相横差保护(分支1、2与分支4、5之间,每相一套) K2,不完全纵差保护(分支1、2与机端之间,每相一套) K3 和完全纵差保护(每相一套) K4;主变压器保护包括完全纵差保护 K5,完全纵差保护 K6,零序差动保护 K7,轻、重瓦斯和压力保护。

主保护 K1、K2、K3、K4 只跳发电机断路器 GCB(同时灭磁停机),主保护 K5、K6、K7 同时跳发电机断路器 GCB 和 500kV 侧断路器(并灭磁停机)。K1、K2、K3、K4、K5、K6、K7 装在同一块保护屏上,按照“宜配置两整套微机继电保护装置”的要求,再“复制”一块保护屏。

从表3、表4的统计结果可以看出,对于三峡发电机(ABB)所有可能发生的540种同槽故障和10950种端部交叉故障,中性点引出方式为“相间-相间”连接(例如:14-3-25)的主保护方案组合方式的不能动作故障总数最少。

### 3.2 三峡左岸电站发电机主保护配置方案

三峡左岸电站的14台机组均为进口机组,其继电保护设备也由国外公司提供,相应的发变组主保护和TA配置方案如图2所示。发电机传统裂相横差保护和完全纵差保护装在保护屏A上,发电机零序电流型横差保护装在保护屏B上,变压器的两套完全差动保护分装在A、B两块保护屏上。

从表3、表4的统计结果中可以看出,图1所示的主保护方案组合的灵敏性要优于图2所示的主保护方案组合的灵敏性。

图2的两块保护屏都投运时,发电机内部故障有三种主保护,变压器内部故障有两种主保护;但当保护屏B单独运行时,发电机内部故障就只有一种

主保护了,无法满足发电机发生相间短路、匝间短路时,均要有两套快速主保护的要求,所以保护屏B无法做到单独运行,也就无法满足三峡工程招标文件对继电保护装置提出的要求——“两块保护屏完全可以独立运行”。

图2的做法实际上是两块屏共同完成对发电机变压器组内部故障的保护,它的任一保护屏没有完全、独立的保护功能,这是原来模拟式保护的思想,与《电力系统微机继电保护技术导则》中的规定——“每一整套微机继电保护装置(装在一块保护屏上)应综合被保护设备的完整的主保

护(包括纵、横联保护等)及后备保护'不符。

现在的大型水轮发电机多采用多分支分布中性

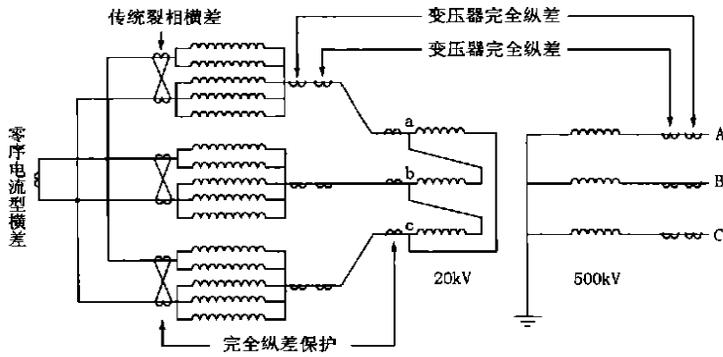


图2 三峡左岸电站 14 台发电机(ABB)变压器组内部故障主保护及 TA 配置方案

点结构,三峡电站发电机组也是如此,由于发电机中性点侧没有常规的分相引出线排,因而无法装设常规的发电机完全纵差保护,例如图 2 的完全纵差保护中性点侧相电流分别取自两个 TA。这样一来,常规的发电机完全纵差保护两侧 TA 完全同型的优点也就不复存在了,再加上完全纵差保护根本不反应匝间短路和分支开焊故障,相对于不完全纵差保护而言并没有任何优势可言。

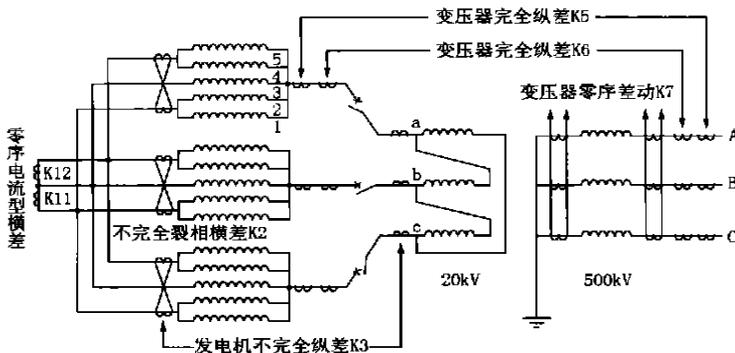


图3 三峡发电机(ABB)变压器组主保护及 TA 配置的另一方案(不加完全纵差)

通过统计分析,发现上述“相邻连接”形式的主保护方案组合,在能够灵敏动作的 427 种同槽故障中,对于73.5%的故障可以做到有两种或两种以上的保护方案能够动作;在能够灵敏动作的 10878 种端部交叉故障中,对于98.8%的故障可以做到有两种或两种以上的保护方案能够动作,均低于图 1 所示的保护方案的组合。图 1“相间-相间”连接形式的主保护方案组合,在能够灵敏动作的 440 种同槽故障中,对于86.4%的故障可以做到有两种或两种以

上的保护方案能够动作;在能够灵敏动作的 10901 种端部交叉故障中,对于99.1%的故障可以做到有两种或两种以上的保护方案能够动作。

### 3.3 减少发电机中性点侧 TA 数目的措施——以“牺牲”灵敏性为代价

在文[5-7]中曾提出类似图 3 的发电机内部故障主保护及 TA 配置方案,与图 1 主保护及 TA 配置方案相比,其最大的优点在于减少了发电机中性点侧 TA 的数目——发电机每相绕组的第 3 分支中性点侧不再装设 TA,发电机中性点侧 TA 的数目为 8 个。其缺点在于无法装设发电机完全纵差保

护,图 3 所示的主保护方案组合对端部相间短路存在保护死区,其灵敏性如表 4 所示。

### 3.4 保护用 TA 的选型

由于《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》正在制定中,这里简单介绍一下 TA 的选型。对于图 1 的主保护配置方案,有三种 TA 需要选型:

500kV 侧

我国电网,500kV 级保护用 TA 均采用 TP 类(考虑暂态特性的保护用 TA),一般选用 TPY 型。

20kV 侧

发电机机端侧和中性点侧各 TA 的性能应满足与 TP 类 TA 配合的要求,建议选用 PR 类 TA,该类互感器(带小气隙)要求剩磁系数  $B_r < 10\%$ ,其余技术指标等同 P 类。

零序电流型横差保护用 TA

建议选用 PR 类 TA,变比选择应注意最大/最小短路电流的校核。

## 4 结论

(1) 由于三峡电站特殊重要,其变压器组内部故障主保护方案确立的基础应是对发电机内部故障全面充分的仿真计算。

(2) 通过对三峡发电机(ABB)所有可能发生的同槽和端部交叉故障的仿真计算,考虑各种主保护方案的互补性(以达到保护范围最大的目的),提出了三峡发电机(ABB)变压器组内部故障主保护及 TA 配置方案,如图 1 所示。

表3 三峡发电机(ABB)对于同槽故障各种主保护方案组合不能动作故障数及其性质

主保护 方案的 组合	代号	具体连接形式	不能 动作 故障数	匝间短路					相间 短路
				相同分支				不同 分支	
				1匝	3匝	5匝	7匝		
两横 一纵	A1 + B1 + D	A1 :123-45 与 B1 :123-45 与 D	113	102	9	2	0	0	0
		A1 :124-35 与 B1 :124-35 与 D	109	91	14	4	0	0	0
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :12	121	101	20	0	0	0	0
	A + B2 + C1	A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :45	123	101	20	2	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :15	112	88	23	1	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :24	107	88	16	3	0	0	0
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :14	101	75	24	2	0	0	0
两横 两纵	A + B2 + C1 + D	A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :25	100	75	24	1	0	0	0
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :12 与 D	121	101	20	0	0	0	0
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :45 与 D	123	101	20	2	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :15 与 D	112	88	23	1	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :24 与 D	107	88	16	3	0	0	0
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :14 与 D	101	75	24	2	0	0	0
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :25 与 D	100	75	24	1	0	0	0

表4 三峡发电机(ABB)对于端部故障各种主保护方案组合不能动作故障数及其性质

主保护 方案的 组合	代号	具体连接形式	不能 动作 故障数	匝间短路					相间 短路	
				相同分支						不同 分支
				2匝	4匝	6匝	7匝	其它		
两横 一纵	A1 + B1 + D	A1 :123-45 与 B1 :123-45 与 D	72	65	5	2	0	0	0	0
		A1 :124-35 与 B1 :124-35 与 D	62	54	6	2	0	0	0	0
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :12	56	32	8	0	0	0	0	16
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :45	89	32	7	0	0	0	0	50
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :15	70	38	14	0	0	0	0	18
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :24	78	38	10	0	0	0	0	30
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :14	73	39	10	0	0	0	0	24
两横 两纵	A + B2 + C1 + D	A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :25	63	39	10	0	0	0	0	14
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :12 与 D	40	32	8	0	0	0	0	0
		A :12-3-45 与 B2 :12-45 与 C1 :45 与 D	39	32	7	0	0	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :15 与 D	52	38	14	0	0	0	0	0
		A :15-3-24 与 B2 :15-24 与 C1 :24 与 D	48	38	10	0	0	0	0	0
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :14 与 D	49	39	10	0	0	0	0	0
		A :14-3-25 与 B2 :14-25 与 C1 :25 与 D	49	39	10	0	0	0	0	0

注:表3、表4中“代号”一栏的“A”代表两套零序电流型横差保护,“A1”代表一套零序电流型横差保护(即单元件横差保护),“B1”代表传统裂相横差保护,“B2”代表不完全裂相横差保护,“C1”代表一套不完全纵差保护,“D”代表完全纵差保护,“A+B2”代表两套零序电流型横差保护与不完全裂相横差保护的组合,以此类推。

## 参考文献:

- [1] 周强,汪祖禄.三峡左岸电站发电机-变压器组继电保护的配置[J].继电器,1998,26(5).
- [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,1996.
- [3] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [4] 桂林,王祥珩,王维俭.三峡电站发电机内部故障计算及保护灵敏度分析[J].电力设备,2000,(1):3-4.
- [5] 王维俭,桂林,王祥珩,张学深.三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案综观[J].继电器,2001,29(1).

- [6] 桂林,王祥珩,王维俭,张学深.三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案的研究[J].继电器,2001,29(2).
- [7] 桂林,王祥珩,王维俭,张学深.再论三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案的研究[J].继电器,2001,29(9).

收稿日期: 2001-08-07; 修回日期: 2001-10-08

作者简介: 桂林(1974-),男,博士研究生,研究方向为大型发电机内部故障分析及其保护; 王祥珩(1940-),男,教授,博士生导师,研究领域为电机分析和控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等; 王维俭(1930-),男,教授,长期从事电气主设备继电保护的教学和科研工作。

(下转第50页)

件参数信息。例如:修改线路编号、修改线路各序电抗、预设保护整定值使该段不参与整定等。同时,当整定计算结束后,可以自动通过这个接口将整定值输出显示在图上的适当位置,生成所需定值图。这样做既直观明了又不容易出错,还极大地将用户从枯燥的体力脑力劳动中解放出来。

值得说明的是该接口功能不仅局限于此,稍加改进,就可以应用于继电保护机辅整定软件的自定义系统及专家系统的开发。这里限于篇幅,不多论述。

### 3 结论与展望

开发电力系统继电保护机辅整定软件是一项科技含量高、要求严格的工作。当前,用户对该类软件的直观性、易用性等提出了更高的要求。本文提出的在VB6.0的开发环境下,结合关系型数据库系统Access进行继电保护机辅整定软件的图形程序设计的设计方案无疑为满足用户的要求提供了一条切实可行的道路。实践证明,用该方案开发出的软件不仅能方便地将软件图形处理模块的数据与整定计算

模块的数据无缝连接,将系统数据与系统接线图联系起来,使管理工作更加直观方便,还可以为将来软件向自定义系统及专家系统方面发展打下坚实基础,应用前景广泛。

### 参考文献:

- [1] 陈永琳. 电力系统继电保护的计算机整定计算[M]. 北京:中国电力出版社,1994.
- [2] Evangelos Petroustos. Visual Basic 6从入门到精通[M]. 北京:电子工业出版社,1999.
- [3] 陈允平,邵秋晓,等. 继电保护计算机整定计算综合软件(JBZD 3.0)用户手册[M]. 能源部电力科学研究生院研究生部,1992.
- [4] 李罡. Visual Basic 5.0中文版编程实例详解[M]. 北京:电子工业出版社,1998.

收稿日期: 2001-06-14

作者简介: 张超(1977-),男,硕士,主要从事电力系统继电保护、计算机应用的研究; 陈允平(1945-),男,博士,博导,主要从事电力系统稳定控制及继电保护的研究与教学工作。

## Graph program design of the relay setting computation in power systems

ZHANG Chao, CHEN Yurping  
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The paper introduces a new method of graph program design of relay setting computation software which is based on Microsoft Visual Basic 6.0. The design project is shown in this paper, additional, the application and the value of the method are also discussed.

**Key words:** relay setting computation; graph program; data base

(上接第33页)

## Research summary on the main protection scheme of internal fault and disposition of current transformer for generators in Three Gorges Power Station

GUI Lin<sup>1</sup>, WANG Xiang-heng<sup>1</sup>, WANG Wei-jian<sup>1</sup>, ZHANG Xue-shen<sup>2</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Firstly, the main protection scheme of internal fault and disposition of current transformer are simply introduced for the generator transformer in Three Gorges Left Bank Power Station. Then, the research work of Tsinghua University in these aspects is reported. Finally, two kinds of protection scheme are compared from the view of the sensitivity of the main protection scheme and the number of current transformers near neutral point of the generator. Those works can be used as reference for the future work in Three Gorges Power Station.

**Key words:** Three Gorges Power Station; generator; internal fault; the disposition of main protection scheme and current transformer; sensitivity