

100~300 MW 水轮发电机主保护配置方案的优化

桂 林,王维俭,孙宇光,王祥珩

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: 以 8 台水轮发电机的主保护设计为例,对比了传统设计方案和定量化设计方案的性能,说明不能以每相分支数相同或容量相等/相近为理由而相互套用或照搬主保护配置方案。由于 100~300 MW 水轮发电机的绕组设计非常灵活,使得实际可能发生的故障特点各不相同,应作内部短路计算决定 100~300 MW 水轮发电机的主保护配置方案。

关键词: 水轮发电机; 内部短路计算; 主保护配置方案; 定量化设计

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0015-05

我国的水电建设已进入又一个发展高潮,水电机组正向着大型和超大型方向发展。随着三峡、龙滩等工程的相继建设,国内出现了一批 700 MW 水轮发电机组,这些大型发电机内部故障主保护装置的拒动或误动,都将产生严重后果。因此,业主和设计院都非常重视其主保护配置方案的设计,基本都赞同在全面分析发电机故障特点的基础上,通过内部故障的仿真计算,清楚认识各种主保护方案的性能,然后依据“优势互补、综合利用”的设计原则,在定量分析的基础上确定最终的主保护配置方案(上述设计过程也称作主保护配置方案的定量化设计)^[1~4]。

但是,单机 700 MW 水轮发电机组的数目毕竟有限,正在建设的梯级电站中大多数机组的容量在 100~300 MW 之间,对于这一大批中型水轮发电机主保护配置方案的设计则显得“重视不够”。在进行主保护方案设计时,一般要配置完全纵差保护,目的是对付发电机的相间短路;由于发电机定子绕组还存在匝间短路的可能,因此还需装设横差保护,零序电流型横差保护(即单元件横差保护)由于功能全面、特别简单而被优先选择。

1 发电机绕组设计的灵活性^[5]

根据发电机每相分支数 a 的不同(偶数分支还是奇数分支),100~300 MW 水轮发电机通常采用的主保护配置方案如图 1 所示(图中电流互感器按一块屏设计,另一块屏完全拷贝,下同),其“一横一纵”的构成格局基本相同。

从电机设计的角度出发,100~300 MW 水轮发电机每相分支数 a 一般为 2,3,4(个别机组采用 5),其绕组设计形式更是非常灵活,可能采用的 4 种绕组形式:分数槽/整数槽波绕组、分数槽/整数槽叠绕组,在工程实例中均有应用。譬如表 1、表 2 列出的 8 台水轮发电机,沙湾(120 MW)、乐滩(150 MW)和天生桥二级(220.5 MW)发电机采用分数槽波绕组,百色(135 MW)和紫坪铺(190 MW)发电机采用整数槽波绕组,平班(135 MW)和凤滩(200 MW)发电机采用分数槽叠绕组,瓦屋山(130 MW)发电机采用整数槽叠绕组。

由于 100~300 MW 水轮发电机的绕组设计非常

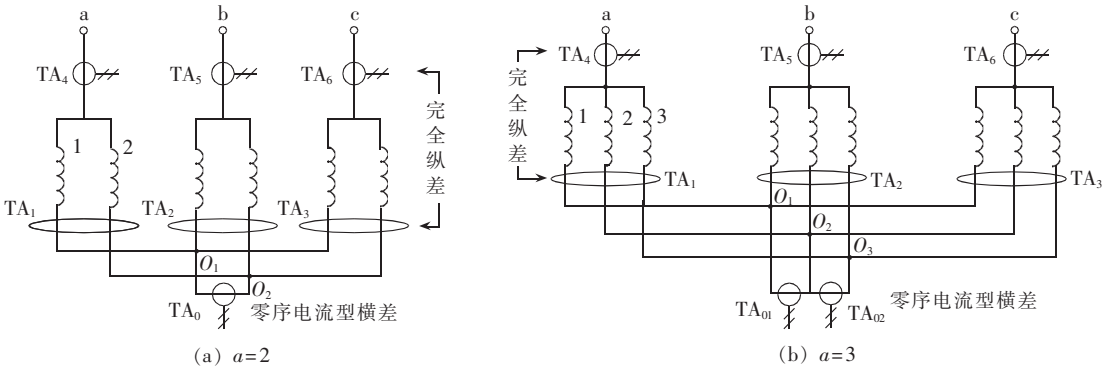


图 1 100~300 MW 水轮发电机的传统设计方案

Fig.1 The traditional designs of hydro-generator from 100 to 300 MW

表 1 8 台不同绕组形式的水轮发电机实际可能发生的同槽故障

Tab.1 The possible slot faults of eight hydro-generators with different stator winding type

发电机	绕组形式	同槽故障数	每相并联支路数 a	同相同分支匝间短路故障数			同相不同分支匝间短路故障数	相间短路故障数
				短路匝比 <5 %	短路匝比 5 % ~ 10 %	短路匝比 >10 %		
沙湾	分数槽,波绕组	576	2	0	0	168	84	324
乐滩	分数槽,波绕组	792	3	114	69	195	54	360
天生桥二级	分数槽,波绕组	324	3	0	7	101	108	108
百色	整数槽,波绕组	432	3	0	0	0	216	216
紫坪铺	整数槽,波绕组	480	4	0	0	0	240	240
平班	分数槽,叠绕组	420	2	243	81	0	12	84
凤滩	分数槽,叠绕组	468	3	135	158	46	21	108
瓦屋山	整数槽,叠绕组	270	3	0	45	90	27	108

表 2 8 台不同绕组形式的水轮发电机实际可能发生的端部交叉故障

Tab.2 The possible end faults of eight hydro-generators with different stator winding type

发电机	绕组形式	端部故障数	每相并联支路数 a	同相同分支匝间短路故障数			同相不同分支匝间短路故障数	相间短路故障数
				短路匝比 <5 %	短路匝比 5 % ~ 10 %	短路匝比 >10 %		
沙湾	分数槽,波绕组	7 488	2	112	240	1 328	462	5 346
乐滩	分数槽,波绕组	11 088	3	426	636	1 458	360	8 208
天生桥二级	分数槽,波绕组	6 468	3	30	51	594	1 242	4 551
百色	整数槽,波绕组	9 504	3	18	18	837	1 935	6 696
紫坪铺	整数槽,波绕组	10 550	4	0	0	504	2 610	7 436
平班	分数槽,叠绕组	2 263	2	246	0	0	3	2 014
凤滩	分数槽,叠绕组	3 417	3	239	250	0	12	2 916
瓦屋山	整数槽,叠绕组	3 024	3	162	162	135	27	2 538

灵活,使得其实际可能发生的故障特点各不相同(如表 1、表 2 所示),即使是相同容量的发电机也不例外。譬如百色发电机同槽故障中不存在同相同分支匝间短路,端部交叉故障中小匝数同相同分支匝间短路所占比率也极小;而平班发电机同槽故障以匝间短路为主、且短路匝比大都很小,端部故障的同相同分支短路也均为小短路匝比;2 台发电机的故障特点相差悬殊。

2 发电机主保护配置方案的多样性^[6~10]

由于不同绕组设计的水轮发电机的故障特点不一样,导致无法套用图 1 的主保护配置方案,也不能仅根据每相分支数相同或容量相等/相近而相互照搬主保护配置方案,下面以具体工程为例进行说明。

2.1 沙湾和平班发电机主保护配置方案的设计

对于每相 2 分支的水轮发电机而言,采用图 1(a)所示的主保护配置方案确实非常简单,但是由于没有进行内部短路的分析计算,仅能从定性分析的角度考虑其对相间和匝间短路都实现了保护,至于保护范围有多大、有没有可能进一步减小保护死区这些深层次的技术问题则无法回答。

然而通过主保护配置方案的量化设计,沙湾和平班发电机最终采用的主保护配置方案如图 2 所示,与图 1(a)相比,其最大变化在于优先选择了裂相横差保护。

这是因为沙湾发电机实际可能发生的内部故障中不同相而分支编号相同的分支间(例如 a_1 对 b_1)发生的相间短路所占比率很大(占 57.7%),这种故障的短路回路电流不流过中性点连线,从而导致零序

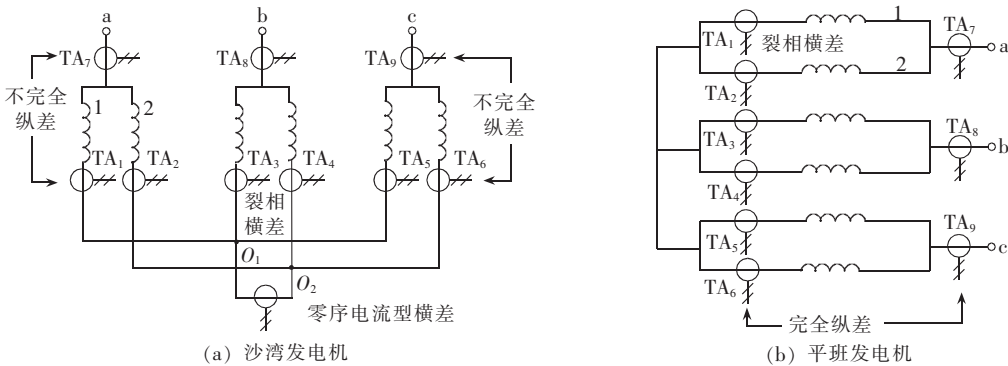


图 2 沙湾和平班发电机的主保护配置方案

Fig.2 The main protection configuration schemes for generators of Shawan and Pingban

电流型横差保护灵敏度下降,因此横差保护中应优先考虑选用裂相横差保护;不完全纵差保护相对于完全纵差保护而言可以反应匝间短路。因此其“一横一纵”的初步格局为“裂相横差保护+不完全纵差保护”的组合。

通过定量分析,发现在已有“一横一纵”初步格局的基础上,增设一套零序电流型横差保护,所费不多——中性点引出并不复杂且增加的是一个小变比的 5P 型 TA,却能更进一步提高主保护配置方案的性能(因为不能动作故障类型均为小匝数同相同分支匝间短路,所以无需增加完全纵差保护),故最终的主保护配置方案如图 2(a)所示。

对于平班发电机而言,则是由于其同相同分支匝间短路的短路匝比太小(1.43%~5.71%,见表 1、表 2),零序电流型横差保护和不完全纵差保护都不灵敏^[7]。为了便于分析对比,将平班发电机定性设计方案(如图 1(a)所示)和量化设计方案(如图 2(b))

所示)的保护性能列于表 3 中,后者比前者多保护了 376 种内部故障,占故障总数的 14.0%,且差动保护两侧 TA 完全同型,其在正常运行和区外故障时的不平衡电流小。

表 3 平班发电机同槽和端部交叉故障时两种主保护配置方案的动作情况

Tab.3 The operating conditions of two main protection configuration schemes for Pingban generator during slot and end faults

故障类型	构成形式	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上主保护动作
420 种同槽故障	图 1(a)	324	38	58
	图 2(b)	100	237	83
2 263 种部端故障	图 1(a)	245	554	1 464
	图 2(b)	93	182	1 988

2.2 百色等站发电机主保护配置方案的设计

百色、天生桥二级、乐滩、凤滩和瓦屋山发电机主保护配置方案如图 3 所示。

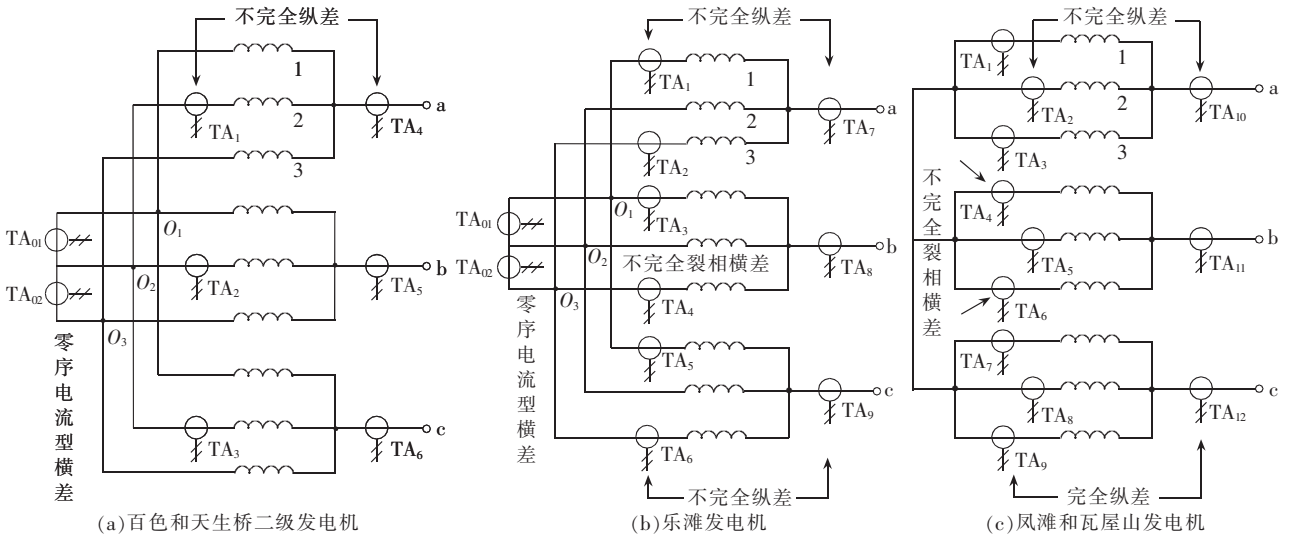


图 3 百色、天生桥二级、乐滩、凤滩和瓦屋山发电机主保护配置方案

Fig.3 The main protection configuration schemes for generators of Baise,Tianshengqiaoerji,Letan,Fengtan and Wawushan

对于这 5 台每相 3 分支的水轮发电机,如果采用传统的设计方法难以真正做到“有的放矢”、“区别对待”,在保护方案的选择上存在很大的盲目性,常常导致保护方案的“千篇一律”(如图 1(b)所示)。通过量化设计,各台发电机均有独特的主保护方案,对于某些故障特点的发电机只需装设很少的分支 TA 就取得了良好的保护性能(如表 4 所示)。

对于百色发电机,其可能发生的内部短路类型(内部故障时小匝数同相同分支匝间短路所占比率极小)使主保护配置方案的构成非常简单且性能优良(如表 4 所示),零序电流型横差保护和不完全纵差保护已对百色发电机实际可能发生的内部故障形成了良好的互补,完全不需再增设其他主保护方案。天生桥二级发电机(技改项目)的故障特点与百色发电机相类似,采用图 3(a)所示的主保护配置方案也取得了良好的保护性能(见表 4)。

但是对于乐滩发电机,如果采用图 3(a)所示的主保护配置方案(每相只装设 1 个分支 TA),则存在

表 4 5 台不同绕组形式的水轮发电机同槽和端部故障时主保护配置方案的动作情况

Tab.4 The operating conditions of five main protection configuration schemes of generators with different stator winding type during slot and end faults

发电机		几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种以上主保护动作
同槽故障数	百色	0	4	428
	天生桥二级	1	6	317
	乐滩	42	51	699
	凤滩	21	292	155
	瓦屋山	0	47	223
端部交叉故障数	百色	11	366	9 127
	天生桥二级	28	51	6 389
	乐滩	251	127	10 710
	凤滩	71	412	2 934
	瓦屋山	0	257	2 767

较大的保护死区,这就要求增设保护方案和相应的分支 TA(如图 3(b)所示),以减少主保护配置方案的保护死区、提高两种及以上不同原理主保护灵敏动作故障数,如表 4 所示。由于图 3(b)所示主保护配置方案不能动作故障类型基本均是小匝数同相同分支匝间短路,故不需增设完全纵差保护和相应的每相第 2 分支的 TA。

由于凤滩和瓦屋山发电机其小匝数同相同分支匝间短路所占比率较大,横差保护中应优先考虑选用裂相横差保护。之所以在“裂相横差+完全纵差”构成的“一横一纵”初步格局的基础上增设不完全纵差保护,一则不需增加任何电流互感器,二来不完全纵差保护中性点侧接入分支正是不完全裂相横差保护舍弃的分支,能对其形成很好的互补,以提高主保护配置方案的性能。

为增强对比性,以凤滩发电机为例,将定性设计方案(如图 1(b)所示)和量化设计方案(如图 3(c)所示)的保护性能列于表 5 中,后者比前者多保护了

554 种内部故障,占故障总数的 14.3%,且其差动保护两侧 TA 也完全同型,正常运行和区外故障时的不平衡电流也较小。

表 5 凤滩发电机同槽和端部交叉故障时两种主保护配置方案的动作情况

Tab.5 The operating conditions of two main protection configuration schemes for Fengtan generator during slot and end faults

故障类型	构成形式	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上主保护动作
468 种同槽故障	图 1(b)	249	124	95
	图 3(c)	21	292	155
3 417 种端部故障	图 1(b)	397	344	2 676
	图 3(c)	71	412	2 934

2.3 紫坪铺发电机主保护配置方案的设计^[10]

紫坪铺发电机初步设计方案如图 4(a)所示,每相 4 个分支均装设了 TA(以获取内部短路时尽可能多的故障信息),2 块保护屏共需装设 24 个分支 TA,以至于电机制造厂在布置发电机中性点引出线 TA 时都觉得困难,担心会对机坑的强度产生影响。

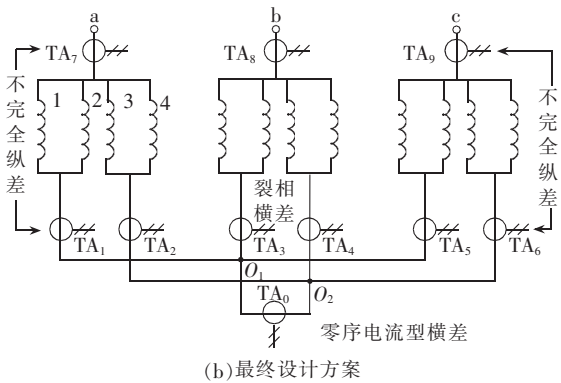
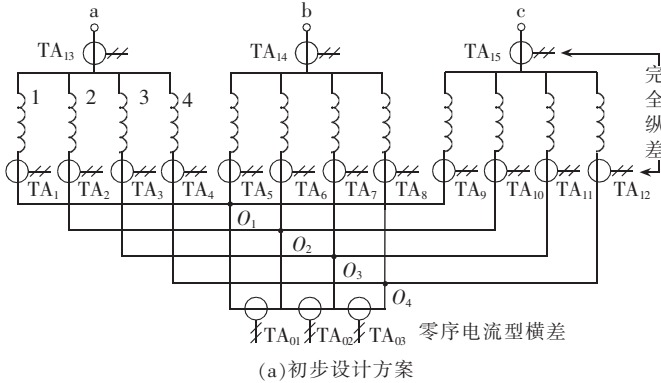


图 4 紫坪铺发电机主保护配置方案

Fig.4 The main protection configuration schemes for Zipingpu generator

然而通过主保护配置方案的量化设计,发现在对其可能的 6 种“一横一纵”组合(分别对应不同的中性点引出个数和保护方案的选择)的性能进行对比分析的基础上,考虑到在其中性能最好的一种“一横一纵”组合的基础上再增加一套零序电流型横差保护,形成“两横一纵”(图 4(b)所示),所费不多却能更进一步提高主保护配置方案的性能,实现无保护死区和一块保护屏上对所有内部故障有两种及以上不同原理主保护灵敏动作的“双优”目标。

紫坪铺发电机最终主保护配置方案(如图 4(b)所示)简单且性能优越,完全不同于初步设计方案(每个分支均需装设 TA),其根本原因在于紫坪铺发电机绕组结构决定实际可能的内部故障中根本不存在小匝数同相同分支匝间短路(见表 1、表 2)。

2.4 盲目照搬主保护配置方案的后果

平班和百色两个新建电站都属于红水河流域,且两个电站发电机的单机额定容量均为 135 MW,相互照搬主保护配置方案是“很自然的”,但是广西电力工业勘察设计研究院和广西水利电力勘测设计研

究院却本着科学的态度,通过与清华大学电机系的密切合作,经内部短路计算决定了平班和百色发电机各自最佳的主保护配置方案。

研究表明,平班和百色发电机的容量虽然相同,但最终采用的主保护配置方案却完全不同,原因在于这两台发电机的故障特点相差悬殊(分析同前)。如果平班发电机照搬百色发电机的主保护方案(即零序电流型横差+不完全纵差保护),则其性能如表 6 所示,对比于现有方案,其不能动作的故障数增加了 459 种,占故障总数的 17.1%。

表 6 平班发电机照搬百色发电机主保护配置方案后的动作情况

Tab.6 The operating conditions of main protection configuration scheme for Pingban generator, which is copied mechanically from Baise

故障类型	构成形式	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上主保护动作
420 种同槽故障	照搬百色方案	328	28	64
2 263 种端部故障	照搬百色方案	324	505	1 434

3 结论

a. 100~300 MW 水轮发电机的绕组设计非常灵活,其实际可能发生的故障特点各不相同,套用或照搬相同容量或分支数的发电机的主保护配置方案缺乏科学依据。

b. 100~300 MW 水轮发电机主保护配置方案的确定,应在内部短路计算的基础上,经定量化的设计过程来完成。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 第2版. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析 [M]. 第2版. 北京:清华大学出版社,2005.
- [3] 王维俭,桂 林,王祥珩. 论大型发电机微机主保护设计的科学性[J]. 电力自动化设备,2002,22(2):1-7.
WANG Wei-jian, GUI Lin, WANG Xiang-heng. On the scientific design of microcomputer-based main protection for large generator [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2002, 22(2): 1-7.
- [4] 桂 林,王祥珩,孙宇光,等. 大中型发电机主保护方案和配置的量化设计——发电机内部短路仿真软件的应用 [J]. 电力系统自动化,2003,27(24):50-55.
GUI Lin, WANG Xiang-heng, SUN Yu-guang, et al. Quantitative design of main protection configuration scheme for large and medium generator — Application of the internal faults simulation software [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, 27(24): 50-55.
- [5] 白延年. 水轮发电机设计与计算 [M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [6] 王维俭,桂 林,王祥珩. 三峡电站不完全裂相横差保护的灵敏度分析[J]. 电力自动化设备,2001,21(4):1-5,45.
WANG Wei-jian, GUI Lin, WANG Xiang-heng. Sensitivity analysis of incomplete split-phase transverse differential protection for Three Gorges Power Station [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2001, 21(4): 1-5, 45.
- [7] 王维俭,桂 林,王祥珩,等. 不同型号的发电机应配置不同的主保护[J]. 电力自动化设备,2002,22(12):1-5.
WANG Wei-jian, GUI Lin, WANG Xiang-heng, et al. Different disposition of main protection for different types of generator [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2002, 22(12): 1-5.
- [8] 王维俭,孙宇光,王祥珩,等. 规范大中型发电机主保护设计的方法[J]. 继电器,2003,31(1):1-11.
WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, WANG Xiang-heng, et al. Normalizing the design method of main protection for large and medium sized generators [J]. **Relay**, 2003, 31(1): 1-11.
- [9] 桂 林,孙宇光,王祥珩,等. 发电机内部故障仿真分析软件的应用实例[J]. 水电自动化与大坝监测,2003,27(6):33-40.
GUI Lin, SUN Yu-guang, WANG Xiang-heng, et al. Practical application of internal fault analysis software to power generators [J]. **Hydropower Automation and Dam Monitoring**, 2003, 27(6): 33-40.
- [10] 桂 林,王维俭,孙宇光,等. 大中型发电机主保护配置方案量化及优化设计的重要性[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):1-6.
GUI Lin, WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, et al. Importance of quantitative and optimum design of main protection configuration scheme for large and medium generator [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(10): 1-6.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

桂 林(1974-),男,安徽广德人,博士后,研究方向为大机组保护及故障分析(E-mail:guilin99@mails.tsinghua.edu.cn);

王维俭(1930-),男,江苏武进人,教授,长期从事大机组保护的教学和研究工作;

孙宇光(1975-),女,北京人,博士,助研,研究方向为发电机内部故障分析及其保护;

王祥珩(1940-),男,安徽淮南人,教授,博士研究生导师,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。

Optimization of main protection configuration scheme for hydro-generators from 100 to 300 MW

GUI Lin, WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, WANG Xiang-heng
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the main protection designs of eight hydro-generators as examples, the traditional main protection configuration scheme is compared with the quantitative design scheme, which explains that main protection configuration scheme can not be applied indiscriminately to different type hydro-generators with similar branch number or capacity. The different stator winding designs of hydro-generators from 100 to 300 MW lead to different fault features. It is better to design the main protection configuration scheme for medium hydro-generators based on internal fault simulation.

Key words: hydro-generator; internal fault simulation; main protection configuration scheme; quantitative design