

# 柘溪 250 MW 水轮发电机主保护配置方案设计

夏勇军<sup>1</sup>, 刘句良<sup>2</sup>

(1. 湖北省电力试验研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖南省柘溪水力发电厂, 湖南 安化 413508)

**摘要:** 多分支发电机定子绕组形式的差异导致了发电机不同的内部故障形式, 主保护配置方案的设计需要针对具体故障集的整体保护效果展开研究, 以确定发电机中性点引出方式和主保护配置原则。文章以湖南省柘溪水力发电厂扩建工程中 250 MW 水轮发电机为对象, 基于实际内部短路故障集内故障的保护效果分析, 确定了主保护配置方案, 可作相关工程参考。

**关键词:** 柘溪水轮发电机; 内部故障; 暂态仿真; 主保护配置

## Design of main protection configuration scheme for Zhexi 250 MW hydraulic generator

XIA Yong-jun<sup>1</sup>, LIU Ju-liang<sup>2</sup>

(1. Hubei Electric Power Testing and Research Institute, Wuhan 430077, China;  
(2. Hunan Zhexi Hydraulic Power Station, Anhua 413508, China)

**Abstract:** Different stator winding types of multi-branch generator lead to different internal short circuit fault aggregation, and the main protection scheme research must base on this fault aggregation to decide the optimized branch grouping style on neutral side and the main protection configuration principles. The paper analyzes the stator winding type and internal short circuit faults of 250MW generator in Zhexi hydraulic power station, based on the transient fault simulation results and their protection effects under different main protection schemes, to decide the optimized main protection scheme of this generator. The design process provides a reference for relevant research and engineering application work.

**Key words:** Zhexi hydraulic generator; internal fault; transient simulation; main protection configuration

中图分类号: TM772 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)22-0061-05

## 0 引言

多分支水轮发电机定子绕组结构的差异导致各发电机可能发生的各种内部短路故障形式(故障集)并不一致, 即使同一容量的多分支发电机, 当绕组形式和结构参数存在差异时, 主保护配置方案并不一定相同; 而且, 对于同一台发电机, 当中性点侧分支组合方式不同时, 同一主保护配置原理(如零序横差, 或裂相横差等)的保护效果也不一致。因此, 多分支发电机主保护方案的设计需要针对整个故障集内故障形式、故障暂态仿真结果, 以及不同保护方案下的保护效果展开, 以确定优化的发电机中性点引出形式和主保护配置方案, 保证机组及系统的安全运行。文章将以柘溪大型多分支发电机为对象, 详细探讨其主保护配置方案的优化设计工作, 为国内相关研究和工程应用提供参考。

## 1 柘溪大型发电机内部短路故障集及特点

柘溪水力发电厂原装机容量 447.5 MW, 扩建工程将新增 2 台单机容量为 250 MW 的混流式水轮发电

机组, 由天津 ALSTOM 水电设备有限公司生产, 发电机机端额定电压 15.75 kV, 额定电流为 10 182.6 A; 定子铁芯为 528 槽, 每相定子绕组由 4 分支并联组成, 每分支含定子线圈 44 匝; 转子 32 对极, 每极极面下有 6 根阻尼棒。

根据发电机定子绕组的结构形式, 可以确定该发电机可能发生的各种短路情况作为仿真分析的对象, 即发电机内部短路故障集, 主要考虑定子同槽内和端部可能发生的各种短路故障。根据短路故障点的电气位置, 故障集又可以分为同相同分支短路 ( $F_{SB}$ )、同相异分支短路 ( $F_{SP}$ ) 和异相短路故障 ( $F_{DP}$ )。

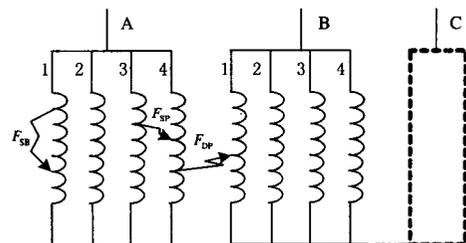


图1 多分支发电机内部短路故障示意图

Fig.1 Internal short circuit fault diagram

柘溪多分支发电机定子绕组采用双层叠绕形式，每相绕组均匀地分布在定子铁芯圆周上，其中A相各分支的分布情况如图2所示。其内部故障形式主要有以下特点：(1) 定子线圈的叠绕形式使得同相同分支各匝线圈分布比较集中，同相同分支匝间短路故障的匝差比较小；(2) 对于同相异支短路而言，由于各分支槽位重叠部分较少，因此同相异分支短路故障数并不多，而且各分支分布方式为1-2-3-4-1，因此同相异分支短路只会发生在相邻的分支间（例如A3分支只可能与A2、A4分支发生同相异分支短路）。另外，由于各重叠部分均为相邻分支的首端部分和首端部分或尾端部分和尾端部分，因此同相异分支短路均为小匝差故障形式。

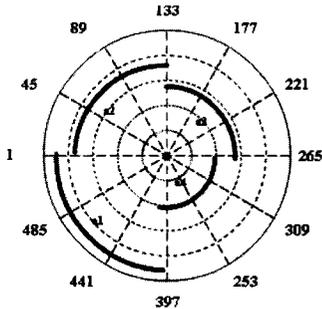


图2 柘溪发电机定子A相各分支分布图  
Fig.2 Stator branches distributing of phase A

分析表明，柘溪发电机定子内部可能发生3696种短路故障形式，具体统计如表1所示。

表1 柘溪发电机内部短路故障集

Tab.1 Internal faults of Zhexi generator

	同相同支	同相异支	异相	总数
槽内故障	268	20	240	528
端部故障	568	8	2592	3168
总数	836	28	2832	3696

对836种同相同分支和28种同相异分支短路故障的匝差统计情况如表2所示。可见柘溪发电机存在大量的小匝差短路故障，例如同相同分支匝间短路最大匝差不超过4匝，而同相异分支短路的最大匝差仅为1匝。大量的小匝差匝间短路故障容易形成故障死区，这在后文将有详细的阐述。

表2 内部短路故障匝差统计

Tab.2 Coils difference of internal short circuit fault

故障形式	0匝	1匝	2匝	3匝	4匝	5匝及以上
同相同分支	0	336	278	134	88	0
同相异分支	10	18	0	0	0	0

从表2中发现，柘溪发电机还可能存在匝差为0匝的匝间短路故障，例如A相第1分支中性点侧第1匝与A相第2分支第1匝发生短路故障(A1\_1.00\_

A2\_1.00)。需要说明的是，由于柘溪发电机定子绕组的特点，位于同相不同分支的“0”匝差短路，故障点并不一定等电位。具体而言，该发电机定子同相的1分支和3分支定子线圈各匝的绕行规律相同，所得定子各匝电动势矢量图一致；同相第2分支与第4分支的匝电势也是一致的。但是，奇数分支和偶数分支之间的匝电势却并不重合。

图3分别给出了定子各相奇数分支和偶数分支部分匝电势的向量图。其中，奇数和偶数分支各匝的电势分别如图中的虚线和实线所示，为简化标注，图中只给出了奇数分支各匝电势标注说明（实线表示的偶数分支的匝电势标注省略），图中还有三条虚直线代表整个定子绕组三相电势的方向。

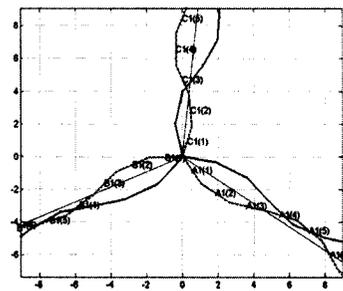


图3 柘溪发电机定子匝电势局部放大图  
Fig.3 Part zoom chart of stator coils potential

仿真分析表明，这些“0匝”的同相异分支匝间短路故障还存在很强的故障电气特性，例如A1\_1.00\_A2\_1.00金属性短路故障下，其短路环电流和零序横差电流的仿真波形如图4所示；故障后一个周波内的短路环和零序横差电流的基波有效值分别可达12154 A和360 A。因此，“0匝”的同相异分支短路故障可能导致横差保护动作，这是柘溪发电机定子绕组和内部短路故障集的一个重要特点。

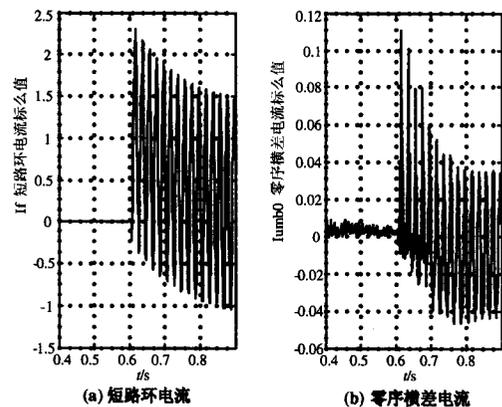


图4 A1\_1.00\_A2\_1.00短路故障电流

Fig.4 Currents under A1\_1.00\_A2\_1.00 short circuit fault condition

## 2 引出两个中性点情况下的主保护方案

### 2.1 分支组合方式的选择分析

发电机定子分支引出两个中性点时的 CT 分布情况如图 5 所示。由于柘溪发电机定子每相含 4 个并联分支, 这里主要考虑 12-34、13-24 和 14-23 三种分支组合形式。

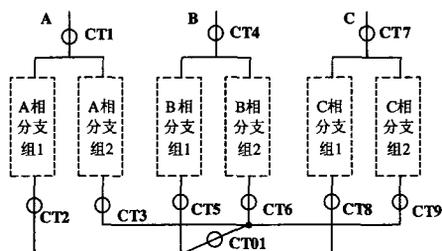


图 5 引出两个中性点时的主保护 CT 配置图

Fig.5 Main protection configuration scheme under two neutral points

### 2.2 横差保护分析

表 3 统计了各种分支组合情况下零序横差 (图 5 中 CT01)、裂相横差 (以 A 相为例, 由图 6 中 CT2 和 CT3 构成) 以及两种横差保护联合作用时的保护效果, 其中, 零序横差保护选择  $0.04I_N$  (407A) 作为动作门槛; 裂相横差保护采用比率制动特性, 差动门槛选择为  $0.2 I_N$ 、斜率  $S=0.3$ 、拐点  $I_{res0}=1.0 I_N$ 。

表 3 零序横差和裂相横差保护可动作故障数统计

Tab.3 Statistics of operational faults for transverse

differential protection

保护方案	分支引出方式	同相同支 (836)	同相异支 (28)	异相 (2832)	共计 (3696)
零序横差	12-34	571	18	2536	3125
	13-24	492	24	2832	3348
	14-23	554	16	2816	3386
裂相横差	12-34	347	10	2830	3187
	13-24	263	20	2824	3107
	14-23	361	14	2808	3183
零序横差 + 裂相横差	12-34	586	18	2832	3436
	13-24	517	24	2832	3373
	14-23	578	16	2832	3426

由表 3 可知, 柘溪发电机横差保护主要有以下特点:

(1) 两种横差保护对同相异支故障动作灵敏度不高。以第 1 种分支组合为例, 零序横差和裂相横差保护对同相异分支动作数目分别为 18 和 10 种。分析其原因, 主要是由于同相异分支短路匝差都太小 (不超过 1 匝) 所造成。

(2) 仅就同相异分支短路故障的保护效果而

言, 相隔分支组合 (13-24) 组合要强于其它两种情况。其原因是由于柘溪发电机同相异分支短路只可能发生在相邻分支之间, 如第 2 分支只可能与第 1、3 分支发生同相异分支短路, 采用分支相隔组合时, 两个短路点就位于了图 5 所示的不同分支组中, 因此, 保护效果要比采用相邻分支组合时 (两个短路点位于同一个分支组之中) 强。

(3) 零序横差和裂相横差保护对异相短路故障均有较高的动作率。

(4) 单套横差保护下, 同相同分支短路故障动作率不高。分析其原因, 主要是由于同相同分支短路匝差都太小所造成的。可见, 对于柘溪发电机内部短路故障, 需要加强同相同分支匝间和同相异分支短路故障的保护力度。

(5) 零序横差和裂相横差保护的故障动作效果存在互补作用, 可考虑同时装设。

### 2.3 纵差保护分析

表 4 列出了各种分支组合方式下各种纵差保护的動作效果统计。表中所述的不完全纵差 1 和 2 分别是指由图 5 所示第 1 或者第 2 个分支组合的 CT 与机端主引出线所构成的不完全纵差保护。这里选择的纵差保护判据为比率制动特性, 差动门槛选择为  $0.2 I_N$ 、斜率  $S=0.3$ 、拐点  $I_{res0}=1.0 I_N$ 。

表 4 纵差保护可动作故障数统计

Tab.4 Statistics of operational faults for current differential protection

分支引出方式	纵差保护方案	同相同支 (836)	同相异支 (28)	异相 (2832)	共计 (3696)
12-34	不完全纵差 1	38	5	2638	2681
	不完全纵差 2	37	5	2652	2694
	双不完全纵差	41	6	2832	2879
	完全纵差	0	0	2832	2832
13-24	不完全纵差 1	51	18	2811	2880
	不完全纵差 2	50	18	2773	2841
	双不完全纵差	54	18	2832	2904
	完全纵差	0	0	2832	2832
14-23	不完全纵差 1	20	14	2806	2840
	不完全纵差 2	22	14	2803	2839
	双不完全纵差	22	14	2832	2868
	完全纵差	0	0	2832	2832

由表 4 可知, 纵差保护主要有以下特点:

(1) 完全纵差保护对同相同分支和同相异分支短路故障没有保护作用, 但对 2832 种异相短路故障可以全部动作;

(2) 不完全纵差保护对各种故障形式都有保护作用, 对同相同分支和同相异分支短路故障动作

率不高;

(3) 单套不完全纵差保护对相间故障有较高动作率, 但只有双不完全纵差才可对异相短路故障 100%动作。

### 2.4 保护方案的选择

由于以上各种保护及其单独的组合情况对同相同分支和同相异分支短路故障的动作率有限, 现研究横差保护和纵差保护联合作用时的保护效果, 统计情况如表 5 所示。

表 5 组合保护方案下可动作故障数统计

Tab.5 Statistics of operational faults under combined protection scheme

分支引出方式	组合保护方案	同相同支 (836)	同相异支 (28)	异相 (2832)	共计 (3696)
12-34	零差+裂相+不完全纵差 1	586	18	2832	3436
	零差+裂相+不完全纵差 2	586	18	2832	3436
	零差+裂相+双不完全纵差	586	18	2832	3436
	零差+裂相+完全纵差	586	18	2832	3436
13-24	零差+裂相+不完全纵差 1	517	24	2832	3373
	零差+裂相+不完全纵差 2	517	24	2832	3373
	零差+裂相+双不完全纵差	517	24	2832	3373
	零差+裂相+完全纵差	517	24	2832	3373
14-23	零差+裂相+不完全纵差 1	578	16	2832	3426
	零差+裂相+不完全纵差 2	578	16	2832	3426
	零差+裂相+双不完全纵差	578	16	2832	3426
	零差+裂相+完全纵差	578	16	2832	3426

由以上分析可知柘溪发电机在各种分支组合方式下的主保护配置方案主要有以下特点:

(1) 对于所列举的 3 种中性点侧分支组合方式, 我们推荐选择 12-34 的分支组合形式, 可达到最高的故障动作率。

(2) 比较表 3 和表 5 可知, 对于裂相横差和零序横差都不动作的匝间短路故障, 不完全纵差保护没有任何补充作用。

(3) 裂相横差和零序横差的联合保护对异相故障已有极高的故障动作率, 表 3 所采用的判据下可全部动作; 进一步研究表明, 当提高零序横差或者裂相横差保护判据门槛时, 组合的横差保护并不能保证异相故障全部动作。而保护方案设计过程中, 现场定值尚未确定, 为了确保异相故障有更高的动作率, 建议增加一套纵差保护, 至少可以为异相故障提供双重化的保护效果。

(4) 在双套横差保护的基础上增加任一套纵差保护的情况下, 构成“零序横差+完全裂相+任一套纵差”保护的故障动作率完全相同。

到底加配哪种纵差保护更为合适, 针对所推荐的 12-34 相邻分支组合形式, 我们从保护双重化的

角度作了表 6 所示的统计。

表 6 组合保护效果统计

Tab.6 Statistics of operational faults under combined protection scheme

保护组合	至少有一种保护可动作的故障				至少有两种保护可动作的故障			
	同相同支	同相异支	异相短路	总计	同相同支	同相异支	异相短路	总计
	零差+裂相+完全纵差	586	18	2832	3436	332	10	2832
零差+裂相+双不完全纵差	586	18	2832	3436	332	10	2832	3174
零差+裂相+双不完全纵差+完全纵差	586	18	2832	3436	332	10	2832	3174

从表中可以看出, 加配“不完全纵差”后, 与“零序横差+完全裂相+完全纵差”保护相比, 对“至少有两种保护可动作的故障”的数目几乎没有任何补充作用, 其效果充其量只是实现部分故障保护的三重化。按照《防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》, 大型发电机保护本身就有双套化的配置形式, 因此, “不完全纵差”保护的加入意义不大。

综合上述仿真分析结论, 结合国内各大型电站发电机主保护配置情况及运行经验, 从同时考虑保护效果和简化保护配置方案的角度出发, 选择中性点分支为 12-34 的组合形式, 由“零序横差+完全裂相横差+完全纵差”来构成柘溪发电机的优化主保护配置方案。研究过程对各种保护方案下, 采用各种常用的不同的保护判据都进行了仿真论证, 优化保护方案的选择结果都支持上述结论。

在文中所述的保护判据下, 按此优化保护配置方案, 柘溪发电机 3696 种内部故障可动作 3436 种 (93%)。其它拒动故障匝数均不超过 3 匝, 统计结果如表 7 所示。

表 7 拒动故障匝差统计

Tab.7 Statistics of coil difference of miss trip faults

故障形式	0匝	1匝	2匝	3匝	小计
同相同分支	/	128	95	27	250
同相异分支	4	6	/	/	10

### 3 引出三个中性点情况下的主保护方案

引出三个中性点情况下的保护配置形式更加灵活且复杂, 如图 6 所示, 例如双元件零序横差保护和不完全裂相横差都有多种选择形式, 本研究中主要选择了 12-3-4、1-23-4、13-2-4 和 1-3-24 四种分支组合形式进行了详细分析。

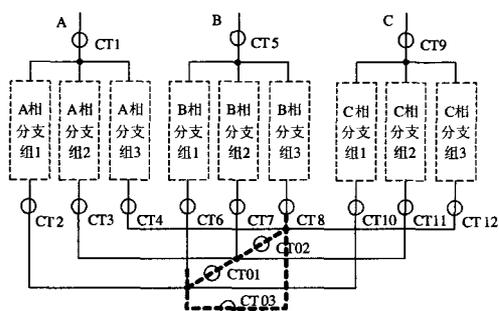


图6 引出三个中性点时的主保护(CT)配置图

Fig.6 Main protection configuration scheme under three neutral points

限于篇幅, 这里不再给出详细的数据表格, 只介绍研究结论:

(1) 不同的双元件零序横差组合方案“CT01+CT02”、“CT02+CT03”和“CT01+CT03”的匝间故障保护效果存在一定差异, 例如在 12-3-4 的分支组合情况下, 可动作的同相同分支短路故障分别为 609、601 和 525 种。

(2) 双元件零序横差匝间短路故障的保护效果要强于两个中性点下的单元件零序横差保护。

(3) 单套不完全裂相横差保护的匝间短路故障保护效果要稍强于两个中性点情况下的完全裂相横差保护, 当配置双套(或者三套)不完全裂相横差保护时, 保护效果的优势会更突出。三套不完全裂相之间的互补性明显。

(4) 由于在不同的保护判据下, 保护的灵敏度和故障动作率都存在很大的差别, 在试图比较双元件零序横差和不完全裂相横差对同相故障的保护效果时, 很难辨其绝对好坏。例如, 在前述判据下, 12-3-4 分支组合中, 双元件零序的保护效果与三套不完全裂相同时使用时的效果基本相当。但将不完全裂相横差的差动门槛抬高到  $0.3 I_N$  时, 即使是三套不完全裂相横差保护, 其效果也逊色许多。考虑到柘溪发电机匝间短路故障匝差很小, 对匝间短路故障而言, 单独使用一种横差保护很难取得非常满意的效果, 因此建议对同时使用两种横差保护方案, 覆盖故障集内更多的匝间短路故障。

(5) “双元件零序+三套不完全裂相”的保护效果要优于“双元件零序+双套不完全裂相”的情况, 为了提高柘溪发电机同相同分支匝间短路故障的动作率, 推荐配置“双元件零序+三套不完全裂相”的组合横差保护方案。

(6) 不完全纵差对“双元件零序横差+三套不完全裂相横差”保护都不能动作匝间短路故障没有任何补充作用。但横差保护定值门槛并未确定(零

序横差保护定值还需实测), 为确保异相短路故障的保护效果, 还是考虑增加完全纵差保护。

(7) 通过对多种分支组合方式下的保护效果统计分析, 柘溪发电机引出三个中性点时的优化保护方案选择为“双元件零序横差(CT01+CT03)+三套不完全裂相横差+完全纵差保护”, 中性点侧分支组合方式推荐 1-23-4 的组合形式。在前文所述判据下, 3696 种内部故障可动作 3580 种(96.9%)。匝差统计如表 8 所示。

表8 拒动故障匝差统计

Tab.8 Statistics of coil difference of miss trip faults

故障形式	0匝	1匝	2匝	3匝	小计
同相同分支	/	59	43	11	113
同相异分支	2	1	/	/	3

## 4 结论

文章基于柘溪 250 MW 多分支水轮发电机内部短路故障集内各故障暂态仿真结果的保护分析情况, 研究了发电机引出两个或者三个中性点情况下的优化主保护配置方案, 主要结论如下:

(1) 由于柘溪发电机特殊的双层叠绕结构, 导致其可能发生的同相内部短路故障形式均为匝差不超过 4 匝的小匝差短路形式; 故障特性相对不明显, 可能导致保护死区。

(2) 在引出两个中性点的情况下, 柘溪发电机优化主保护配置方案选择为 12-34 的相邻分支组合形式, 选择“零序横差+完全裂相+完全纵差”保护配置方案。

(3) 在引出三个中性点的情况下, 主保护配置方案选择为 1-23-4 的相邻分支组合形式, 保护配置选择为“双元件零序横差(CT01+CT03)+三套不完全裂相横差+完全纵差保护”。当保护定值改变时, 各主保护的故障动作率会有变化, 研究表明, 其它常用的不同定值门槛仿真计算结果都维持上述结论。

(4) 柘溪发电机不完全纵差保护对匝间短路故障的保护效果相对较差, 对于零序横差和裂相横差构成的组合横差保护不能动作的同相短路故障, 在文中所述的判据下, 不完全纵差保护没有补充作用。

在设计 and 实际投运过程中, 考虑到发电机引出三个中性点情况下保护设计和安装相对复杂, 而且同样存在保护动作死区, 选择了文中所得出的引出两种中性点情况下的保护方案。为进一步减少轻微故障下的保护死区, 需加强发电机的运行维护并继续开展新型发电机主保护方案的研究工作。

(下转第 71 页 continued on page 71)

正是采用了 ASN.1 的编码规范, IEC61850 标准已不再关心具体的通讯过程, 而是大量的研究和规范了数字化变电站内 IED 设备间的数据交换模型和互操作规范, 因此, 要实现和实施好数字化变电站系统, 研究透彻 ASN.1 规范就是非常重要的了, 这也是实现 IEC61850 的核心技术之一。

### 参考文献

- [1] ISO/IEC 8822:1994, Information Technology – Open Systems Interconnection – Presentation Service Definition[S].
- [2] ISO/IEC 8825-1:2000, Information Technology – ASN.1 Encoding Rules: Specification of Basic Encoding Rules (BER), Canonical Encoding Rules (CER) and Distinguished Encoding Rules(DER)[S].
- [3] IEC 61850-7-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 7-1: Basiccommunication Structure for Substation and Feeder Equipment-Part 7-1: Principles and Models[S].
- [4] IEC 61850-8-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S].
- [5] IEC 61850-9-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 9-1: Specific Communication

Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].

- [6] Olivier Dubuisson. ASN.1 Communication Between Heterogeneous Systems[S].
- [7] 李永亮,袁志雄,陈斌,等. 对基于 TCP / IP 的 IEC61850 特定通信服务映射 MMS 的分析与实现[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 33-38,42.  
LI Yong-liang, YUAN Zhi-xiong, et al. Analysis and Implementation of TCP/IP Based Specific Communication Service Mapping MMS in IEC61850[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 33-38,42.
- [8] 李贺禄,蒋凡,等.基于面向对象方法的 ASN.1 编解码的设计与实现[J]. 计算机工程, 2002, 28(12): 101-103.  
LI He-lu, JIANG Fan, et al. Design and Implementation of Encoding and Decoding for ASN.1 Based on Object-oriented Method[J]. Computer Engineering, 2002, 28(12): 101-103.

收稿日期: 2008-01-21

作者简介:

李永亮 (1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数字化变电站技术与实现; E-mail:liyul@epri.ac.cn

葛维春 (1961-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析计算及科技管理工作。

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [8] 王慧, 范正林, 桑在中. S 注入法与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, (3): 18-20.  
WANG Hui, FAN Zheng-lin, et al. The "S Signal Injection Method" and Its Application in Single Phase-to-earth Fault Line Identification and Fault Point Location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, (3): 18-20.
- [9] 卢兴旺. 线路故障指示器的分类及应用[J]. 电器设备, 2006, (1): 60-61.  
LU Xing-wang. The Classification and Application of Electrical Line Fault Indicator[J]. Electric Equipment, 2006, (1): 60-61.
- [10] 张斌, 等. 配电线路故障指示器现状分析[J]. 供用电,

2005, 22(5): 29-30.

ZHANG Bin, et al. Actuality of Distribution Lines Fault Indicator[J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(5): 29-30.

收稿日期: 2008-01-22;

修回日期: 2008-05-19

作者简介:

杨鹏 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 小电流接地电力系统故障定位; E-mail: yangpeng8461@sina.com

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 数字电力系统等;

杨景 (1987-), 女, 学士, 研究方向为电子信息技术。

(上接第 65 页 continued from page 65)

### 参考文献

- [1] 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.  
GAO Jing-de, WANG Xiang-heng, LI Fa-hai. Analysis of Alternative Current Machine and Its System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [2] 夏勇军,尹项根,陈德树,等. 大型水轮发电机内部故障暂态仿真模型简化及仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12):70-74.  
XIA Yong-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. Simplification and Validation of Transient Simulation Model of Large Hydraulic Generator Internal Short Circuit Faults[J]. Automation of Electric Power Systems,

2006, 30(12):70-74.

- [3] 张龙照. 同步电机定子绕组不对称状态的研究(博士学位论文)[D]. 北京:清华大学,1989.

ZHANG Long-zhao. Analysis of Synchronous Machines with Asymmetrical Armature Windings, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1989.

收稿日期: 2008-02-20

作者简介:

夏勇军 (1978-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研究及工程应用工作; E-mail:xiayj@hbepc.com.cn

刘句良 (1971-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事发电厂设备的检修维护工作。