

# 一种特大型水轮发电机定子故障形式分析及其搜索算法设计

黄磊, 尹项根, 夏勇军

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据三峡电厂拟采用的一种特大型水轮发电机的结构参数及绕组设计图, 细致分析了其定子绕组结构、可能的定子绕组短路故障类型和位置、故障特点和规律; 并介绍了分析此类水轮机组定子绕组结构及其故障形式较为有效的一种计算机搜索算法。

关键词: 水轮发电机; 绕组结构; 故障形式分析; 搜索算法

中图分类号: TM312; TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)15-0001-04

## 0 引言

目前, 我国正在建设的一批大型水电厂普遍装备了特大型水轮发电机组, 如三峡电厂采用的 700 MW 发电机。这类现代特大型水轮发电机的定子绕组除了采用每相多分支绕组外, 还采用了比较特殊的波绕组形式, 其结果是同相同分支绕组或者同相不同分支位于同一槽内或相邻位置的比率大大增加, 这使得绕组短路尤其是匝间短路的可能性增加。为了保证它们的安全运行, 提高定子绕组短路尤其是匝间短路保护的性能并对保护性能做出评价, 则首先需要针对这类绕组进行绕组结构和故障形式分析, 并形成合理的内部故障集, 以便于故障仿真计算能正确有效地进行。

目前三峡左岸电厂的两种 700 MW 发电机均为每相五分支绕组, 已有文章对其故障形式进行了分析。这里, 笔者将对有可能采用的另一种具有六并联分支和不同绕组形式的 700 MW 发电机 (以下简称六分支发电机) 的绕组结构及故障形式进行分析和研究, 同时也将对其主保护方案进行初步的讨论。

随着发电机容量的增大, 在设计、结构、工艺和运行诸方面出现了许多新的特点。六分支发电机也不例外, 就定子绕组而言, 其每相亦为多分支并联结

构, 且其每分支串联线圈均采用一种独特的双层波绕组结构: 即部分线圈为前行正向波绕组、部分线圈回转形成后行反向波绕组; 三相绕组结构相同, 正向绕组与反向绕组有规律地相互交替穿插绕行。然而, 在具体绕法上与目前三峡左岸电厂机组又很不相同。

## 1 定子绕组结构分析

六分支发电机的额定功率 700 MW, 每相并联分支数为 6, 极对数为 42, 定子总槽数为 630 槽, 每相每分支串联匝数为 35 匝。

对于每分支绕组, 第一节距为 8, 第二节距为 7, 正、反向绕组间连接引线穿越槽数为 8。如图 1 显示的是六分支发电机 A 相第一分支的部分绕组展开图,  $A_1^{(1)}$  表示 A 相的线圈, 下标表示匝序号, 上标  $(1)$  表示进槽、 $(2)$  表示出槽。从右向左方向表示定子槽号增加的方向, 其中  $A_7^{(2)}$  与  $A_8^{(1)}$  绕组以及  $A_{14}^{(2)}$  与  $A_{15}^{(1)}$  之间的正反向连接引线穿越了 8 个槽距的长度, 线圈上的箭头表示从机端到中性点的方向。图中实线代表正向绕行的线圈, 虚线代表回绕的线圈。实际上回绕的绕组会跟正绕的绕组有一部分重叠。为了较清晰地示意绕组的走向, 特意在图中的两种绕向的线圈之间加大了间隔, 同时, 为减少图形的复

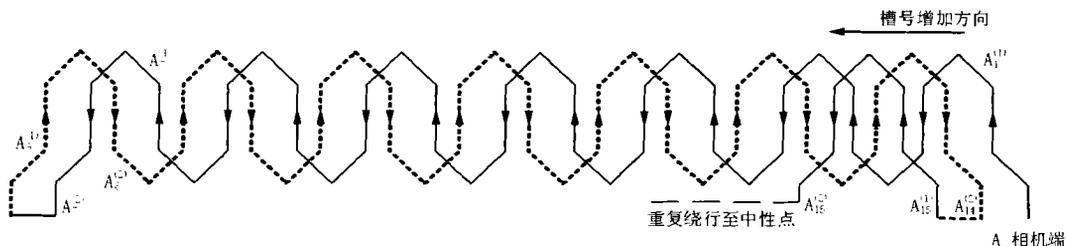


图 1 六分支发电机定子绕组方向图

Fig 1 Stator winding diagram of the six-branch generator

杂性只画出了完整的一个正向绕组和一个反向回绕组,以便明确看出这种进 7 匝退 7 匝的绕组结构。设 7 匝为一个单元,则 A 相第一分支以正绕——反绕——正绕——反绕——正绕的方式从机端行线至中性点侧。第三单位及以后的绕行情况在图中略,而其余各相各分支的绕法均与此分支所示一致。

## 2 定子绕组可能发生的故障形式分析

为分析方便起见,本节先作以下规定:

1) 线圈的方向为从机端到中性点的方向,每匝线圈按顺序依次经过两槽,即进槽和出槽。

2) 槽号增加的方向为正方向,按正方向绕行的线圈称为正向线圈,按反方向绕行的线圈称为反向线圈。

此发电机定子绕组短路故障,其故障类型主要包括同相同分支绕组短路故障、同相异分支绕组短路故障和异相绕组短路故障三类(这三类故障类型以下分别简称为同相同支、同相异支和异相短路)。经过现场的实际调查研究,其故障可能发生的位置主要考虑在发电机定子槽内上、下层线圈(线棒)间发生短路和定子线圈端部引线交叉点上发生短路这两种最大可能的情况。

图 2 为六分支发电机的定子绕组内部两种不同位置可能发生的短路情况。可对此作如下分析。

1) 槽内短路故障:如图 2 中“槽内短路故障”所示,虚线 1 代表该槽下层边处放置的元件边,实线 2 代表该槽上层边处放置的元件边。1 与 2 短路即为同槽的两个上、下层元件边之间发生短路。由于六分支发电机有 630 槽,每槽放 2 个元件边,故可能发生的槽内短路故障共有 630 种。

2) 端部交叉故障:端部故障情况错综复杂,如图 2“端部交叉短路”中所示,假设第  $N$  号线圈的上半匝置于 1 号槽内上层。由于六分支发电机第一节距为 8,第二节距为 7,故此线圈的上端部与 2 号至 8 号槽中元件的上端部均相交,而此线圈的下端部与 630 号至 625 号槽中元件的下端部均相交。因此,对于 1 号槽而言,处于其槽内上层边的导体可能与其相邻的 13 个槽中的下层边导体发生端部交叉短路故障(也可以说处于 1 号槽内下层边的导体可能与其相邻的 13 个槽中的上层边导体发生端部交叉短路故障),故六分支发电机共有  $630 \times (7 - 1 + 8 - 1) = 630 \times 13 = 8190$  种可能发生的端部交叉短路故障。

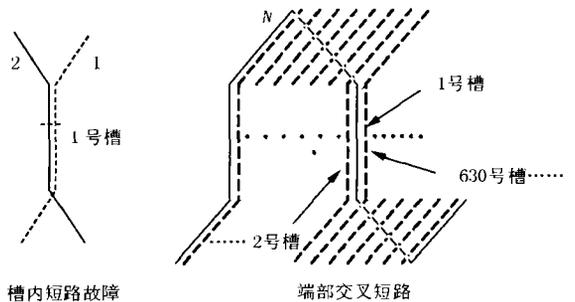


图 2 六分支发电机可能的短路故障位置图

Fig 2 Potential fault position of the six-branch generator

## 3 基于绕组槽内位置判断的定子内部短路故障的计算机搜索算法

基于上述分析,在 Visual C++ 6.0 开发环境下编制了六分支发电机定子绕组结构及短路故障形式分析软件。其核心功能主要为:精确完成对右岸两种不同类型机组定子绕组结构的分析重现;分析其可能出现的每种故障,记下相应的短路分支号与匝号,并将其归为同相同分支短路、同相异分支短路或相间短路故障 3 类;生成对应的故障表文件输出以及形成相应的 Matlab 格式数据文件,用以进行定子绕组内部故障短路计算及校核机组横差保护灵敏度,最后统计各短路类型下每种短路情况的故障匝数差并汇总。本节重点介绍前两种功能的算法原理。

### 3.1 定子绕组结构重现的算法设计

关于绕组结构的分析,需要根据定子绕组接线图的分析结果得到每相每分支的起始槽号,然后根据其绕组的第一节距与第二节距及其绕行规律(如进 7 匝退 7 匝等等)逐元件计算出每一匝绕组上、下半匝所在的定子槽号。这里要注意的是在正绕与反绕的相互交接处永远是下层边与下层边相连,上层边与上层边相连。这是符合电机绕组实际绕线规律的。此处编程判断较为简单,不再详述。

### 3.2 基于槽内位置判断的故障分析搜索算法

还是以六分支发电机为例:完成了第一步绕组结构的分析后,可以形成一个  $SbNo[3][6][70]$  数组。依次存放 3 相 6 分支内所有绕组上、下半匝所在槽号的信息(每分支 35 匝绕组共 70 个半匝位于 70 个槽中)。需要注意的是若为正向绕组则其偶数半匝为上半匝,处于槽内上层边中( $SbNo$  数组从  $SbNo[i][j][0]$  开始),奇数半匝处于槽内下层边中,而反向绕组恰好相反。在程序遍历中的相应位置设置正反绕行判断即可将数组  $SbNo[3][6]$

[70]中的信息分类导入数组  $\text{InSlotCoil}[630][6]$  中。令  $\text{InSlotCoil}[i][0] \sim \text{InSlotCoil}[i][2]$  中存储第  $i$  槽中上层放置的元件边所处的相、分支、匝数信息； $\text{InSlotCoil}[i][3] \sim \text{InSlotCoil}[i][5]$  中存储第  $i$  槽中下层放置的元件边所处的相、分支、匝数信息，据此即可实现基于绕组槽内位置判断的故障分析搜索算法了。

分析槽内短路故障时，从 A 相第 1 分支第 1 匝所在的槽号开始搜索，即令  $i = \text{SlotNo}[0][0][0]$ ，则  $\text{InSlotCoil}[i-1][0] \sim \text{InSlotCoil}[i-1][5]$  中存放的即为对应槽中的上、下层边信息。遍历 630 槽后即得到 630 种槽内上、下层边之间发生短路故障的情况。若  $\text{InslotCoil}[i-1][0] = \text{InslotCoil}[i-1][3]$  且  $\text{InslotCoil}[i-1][1] = \text{InslotCoil}[i-1][4]$ ，则为同相同分支短路故障；若  $\text{InslotCoil}[i-1][0] = \text{InslotCoil}[i-1][3]$  且  $\text{InslotCoil}[i-1][1] \neq \text{InslotCoil}[i-1][4]$ ，则为同相异分支短路故障；若  $\text{InslotCoil}[i-1][0] \neq \text{InslotCoil}[i-1][3]$  则为相间短路故障。

分析端部交叉短路故障时，从 A 相第 1 分支第 1 匝所在的槽号开始搜索，则  $\text{InslotCoil}[i-1][0] \sim \text{InslotCoil}[i-1][2]$  中存放的即为对应槽中的上层元件边信息。而  $\text{InslotCoil}[i-2][3 \sim 5] \sim \text{InslotCoil}[i-8][3 \sim 5]$  以及  $\text{InslotCoil}[i][3 \sim 5] \sim \text{InslotCoil}[i+5][3 \sim 5]$  中存放的则为其相邻的前七槽和后六槽中的下层元件边信息。第  $(i-1)$  槽中的上层边与此相邻的 13 个槽内下层边之间发生的即为端部交叉短路故障（见图 2 中的示意情况）。遍历 630 槽后即得到  $630 \times 13$  种端部平行短路故障情况。其短路类型的判断原理类似槽内短路故障情况。

#### 4 三峡右岸机组定子绕组短路故障分析结果

六分支发电机定子槽内故障 630 种，其中同相同分支匝间短路数为 504 种，同相不同分支匝间短路数为 0 种，相间短路数为 126 种；端部交叉故障 8 190 种，其中同相同分支匝间短路数为 1 584 种，同相不同分支匝间短路数为 432 种，相间短路数为 6 174 种。按不同故障位置分类，每类中不同短路类型所占比例如图 3 所示。

在 630 种槽内短路故障中，同相同支 1 匝短路和 3 匝短路各有 72 种；端部交叉短路中同相同支 2 匝短路和 4 匝短路各 72 种。

为便于对比，下面给出三峡电厂另一种五分支

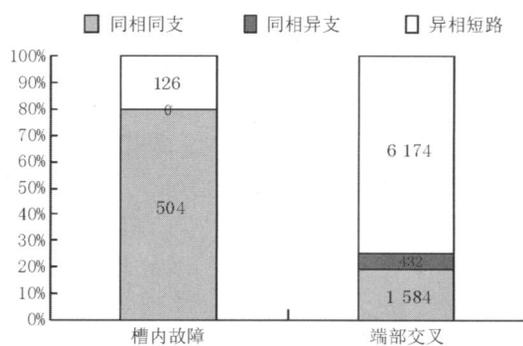


图 3 六分支发电机定子故障比例图

Fig 3 Stator fault scale of a six-branch generator

发电机故障形式的分析结果。其定子槽内故障 510 种，其中同相同分支匝间短路数为 270 种，同相不同分支匝间短路数为 90 种，相间短路数为 150 种；端部交叉故障 5 610 种，其中同相同分支匝间短路数为 690 种，同相不同分支匝间短路数为 780 种，相间短路数为 4 140 种。其不同短路类型所占比例如图 4 所示。

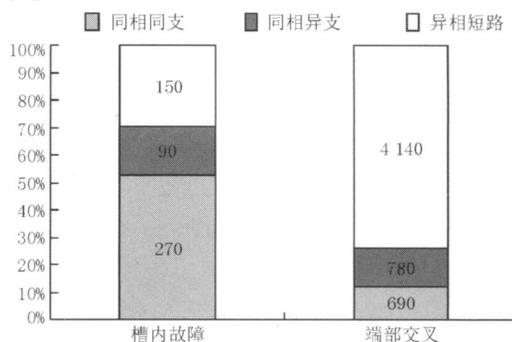


图 4 五分支发电机定子故障比例图

Fig 4 Stator fault scale of a five-branch generator

在 510 种槽内短路故障中，同相同支 2 匝短路和 4 匝短路各有 42 种；端部交叉短路中同相同支 1 匝短路和 3 匝短路各 42 种。

#### 5 关于短路保护的讨论

目前国内外对于大机组主保护，仍以传统完全纵差保护为主。然而，对发电机而言，传统完全纵差保护只能反映相间短路故障，不能反映匝间短路故障。由于有些大型发电机三相绕组中性点侧只引出三个端子，没有条件装设横差保护，因此产生了是否有必要装设匝间短路保护的争论<sup>[1]</sup>。从上述机组的定子绕组故障形式的结果来看，各种可能发生的故障中有相当大部分的故障发生于同相同分支匝间，尤以槽内短路故障为甚（参见图 3、图 4）。因此，匝间短路故障不容忽视。考虑到大型机组的安

全运行,装设可靠的匝间保护是十分必要的。就目前工程情况而言,特大型水轮发电机三相绕组在其中性点侧按分支引出是完全可能的,因此应考虑合理配置零序横差(不平衡)保护或裂相横差保护。

利用上述绕组结构和故障形式分析结果,采用我们开发的特大型水轮发电机定子绕组故障暂态仿真软件,对上述发电机的各种类型故障进行了仿真计算和保护分析。结果发现,对于所有的相间短路计算结果来看,纵差保护都能正确动作;而横差保护对大部分同相同分支故障和同相不同分支故障能够动作,但是有部分不能动作的情况。从统计结果来看,不能动作的故障均为小匝数短路,尤其是1匝短路。发电机定子的同相绕组槽内导线间的电压差与两导线间跨越的匝数有关,相当于各匝电势的向量和,这样就会出现小匝数短路引起的横差支路电流小于最大不平衡电流(现场实测数据表明,正常运行时该不平衡电流的基波分量并不很小)。然而,定子绕组的绝缘等级是按相电压考虑的,而小匝数间的电压远小于相电压。因此可以说这种小匝数短路发生的可能性相对很小。而这种情况下的保护死区是否可以容忍还有待进一步研究。

这里关于定子绕组保护的讨论是初步的,还有一些保护,如裂相横差保护、不完全差动保护等的应用问题以及保护改进问题,将另文讨论。

#### 参考文献:

- [1] 尹项根. 发电机定子绕组故障瞬变过程数字仿真及其微机继电保护新原理的研究(博士学位论文)[D]. 武

汉:华中理工大学,1989.

YN Xiang-gen. Transient Digital Simulation for Generator Stator Winding and Study on the New Principle of Its Relay Protection, Doctoral Dissertation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1989.

- [2] 王东. 三峡机组的绕组故障形式分析及物理模拟(硕士学位论文)[D]. 武汉:华中科技大学,2004.  
WANG Dong. Analysis for the Stator Winding Fault Types of the Three Gorges Generators and Design for Their Physical Simulator, Thesis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,1996.  
WANG Wei-jian. The Principle and the Application of the Relay Protection of Electric Main Equipment, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [4] Kinisty V A. Calculation of Internal Fault Currents in Synchronous Machines [J]. IEEE Trans on PAS, 1965, 84 (5).

收稿日期: 2004-11-01; 修回日期: 2005-02-28

#### 作者简介:

黄磊(1980-),男,硕士研究生,研究方向为大机组继电保护与整定计算;E-mail: vivi\_chong@163.com

尹项根(1954-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护及安全自动控制、故障仿真与状态监测、光电及电力电子应用技术等方面的教学和科研工作;

夏勇军(1978-),男,博士研究生,研究方向为大机组继电保护。

### Stator fault type analysis and searching algorithm design of a particularly giant hydraulic generator

HUANG Lei, YN Xiang-gen, XIA Yong-jun

(College of Electrical & Electronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** According to the structure parameters and stator winding diagram of a particularly giant hydraulic generator that is supposed to be adopted by the Three Gorges Project, the paper analyses rotor winding structure, fault mode, locations and characteristics of the giant generator in detail. Furthermore, an effective searching algorithm used for auto-analyzing is introduced.

**Key words:** hydraulic generator; winding structure; fault mode analysis; searching algorithm

## 我国将大力发展特高压电网

我国将大力发展特高压电网。到2020年,我国特高压电网基本建成,输送电量将达到2亿kW以上,占全国装机总容量的25%。

据国家电网公司负责人介绍,我国现有电网主要以500kV交流电和正、负500kV直流系统为主,最远电力输送距离为500km,使电力输送能力和规模受到严重制约。而特高压电网是以1000kV交流电和800kV直流系统为主,电力输送距离可达1000km至1500km,可更好地满足经济发展对电力的需求。目前,晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程可行性研究已完成,线路、变电站设计方案基本确定。

根据规划,我国特高压电网建成后,可节约发电装机2000万kW,每年可减少发电煤耗2000万吨。