

# 大型凸极同步发电机定子绕组内部故障仿真与保护分析

胡敏强, 王 艳

(东南大学电气工程系, 南京, 210096)

[摘要] 随着发电机组的容量不断增大, 定子绕组内部故障的破坏作用引起人们的高度重视. 文章全面介绍了大型凸极同步发电机定子绕组内部故障的仿真与分析. 并对发电机在短路故障状态下数学模型建立、参数计算、保护分析等进行了系统研究, 给出了提高定子内部故障保护水平的重要理论依据. 凸极同步电机具有一定的代表性, 隐极机及其它电机可作为特例用类似方法分析.

[关键词] 发电机; 内部故障; 仿真; 保护方案

[中图分类号] TM341; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)03-0001-07

## 0 前言

大型同步发电机定子绕组的内部故障是一种常见的、破坏性很强的故障. 由于故障发生在机组内部, 气隙磁场的空间谐波分量很强(除存在的高次谐波外, 还存在很强的分数次谐波), 这些谐波磁场的转速各不相同, 转向也有正有反. 传统算法如对称分量法、相坐标方法, 无法深入到绕组内部, 也无法计及如此多的空间谐波. 从机组的继电保护方面来看, 必须从理论上进一步揭示内部故障后的运行状态及各个故障特征量的变化规律, 以便评价和确立不同的保护方案, 提出和研制新型保护装置.

对于同步电机定子绕组内部故障, 必然也要有相适应的保护方案. 由于大型发电机在设计、结构、运行诸方面出现了新的特点, 如水轮机定子绕组采用多分支分布中性点结构, 取消了大电流中性点引线, 以往的一些内部故障保护方案性能降低, 甚至不能使用.

现从组成定转子的各单个回路出发, 构建了能考虑空间电磁谐波、故障空间位置等因素的通用数学模型, 建立了发电机内部故障分析的拓扑结构图. 通过电流分布规律的计算, 分析了适应大型发电机新特点的保护方案, 如单元件横差保护、不完全纵差保护等; 基于保护灵敏度分析和优化组合方法, 提出了发电机定子绕组最优高灵敏度保护方案、中性点引出方式及 CT 配置方案. 并研制成“大型同步发电机定子绕组内部故障电气量计算与保护方案分析”软件系统, 该系统功能强大, 对天生桥水电站和三峡水电站的机组进行了各种内部故障的计算分析, 为保护整定和灵敏度分析提供了明确的数据.

凸极同步电机定子绕组故障具有代表性, 隐极机可作为特例用类似方法研究. 本文将对凸

收稿日期: 2001-03-28

基金项目: 国家教育部博士点基金资助(1999028603)

作者简介: 胡敏强, 1961—, 东南大学电气工程系教授, 博士生导师, 主要从事工程电磁场数值计算及方法、电气设备智能诊断技术及特种电机及其控制等方面的研究.

极机的分析进行详细说明.

1 数学模型

发电机定子绕组发生内部故障时, 气隙磁场的空间谐波分量很强, 感应出的绕组电势谐波也很多. 现采用以单个线圈元件为基础论述电机基本电磁关系的交流电机多回路理论, 建立求解发电机定子绕组内部故障的通用数学模型. 可以考虑对内部故障影响重大的如电磁谐波、故障空间位置和绕组形式等因素, 比较准确地得到绕组故障后的内部电磁关系和绕组电流分布.

在实际运行中, 发电机一般都与系统相联. 把电机及与其关联的外部装置作为一个系统来考虑电磁谐波分量等的影响. 发电机通过变压器与无穷电网相联的简化电路图, 如图 1 所示.

1.1 回路方程

将电机看作具有相对运动的电路网络, 定子方按绕组初始回路定义为绕组中的单个线圈, 转子方以相邻

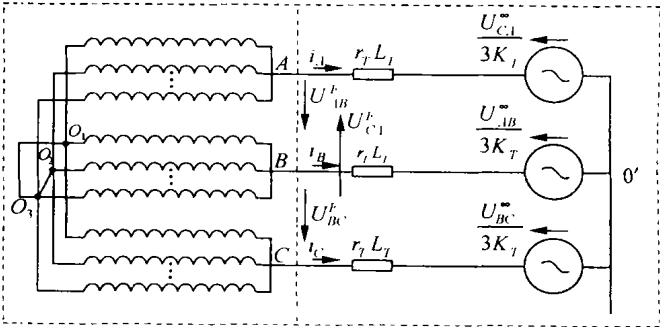


图 1 简化电路图

的阻尼条和部分端环组成阻尼回路, 整个励磁绕组构成一个回路. 这时电机磁链和电压方程的矩阵形式为:

$$[\Psi]_u = [M]_u [I]_u \tag{1}$$

$$[U]_u = [R]_u [I]_u + \frac{d[\Psi]_u}{dt} \tag{2}$$

式中:  $[\Psi]_u$ 、 $[U]_u$ 、 $[I]_u$  分别为磁链、电压和电流列向量;  $[M]_u$  为电感系数矩阵, 其元素多为时变的;  $[R]_u$  为电阻矩阵.

当定子绕组发生内部故障时, 根据故障的类型和短路位置可以建立起新的定子回路, 并且引入回路电压和电流关联矩阵可得故障后的回路方程为:

$$[U]_l = \{A[M]_u B\}_p [I]_l + \omega \{A(\partial[M]_u / \partial \gamma) B\} [I]_l + \{A[R]_u B\} [I]_l \tag{3}$$

式中:  $\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0$ ,  $\gamma_0$  为  $t = 0$  时的转子初始位置角,  $\omega$  为发电机转速;  $A$ 、 $B$  分别为回路电压和电流关联矩阵.

式(3)与内部、外部电流、电压约束方程及机端功率方程组成发电机定子绕组内部故障时的回路方程组, 若已知电感和电阻等回路参数, 就可分析发电机定子绕组内部故障时的瞬态和稳态过程.

1.2 回路参数计算

故障后回路参数的计算是故障计算中非常关键的一步, 有了精确的回路参数, 就可以较为精确的计算出发电机定子绕组内部短路故障后的各电气量.

内部故障发生后, 气隙磁场中含有大量的低次谐波和分数次谐波, 计算时不仅需要考虑气隙空间基波磁场, 而且还要考虑各次谐波磁场. 常用的方法有气隙磁导法和磁场数值算法.

有限元法由于能考虑铁心磁阻的非线性、气隙磁势和气隙磁导的齿谐波等因素, 能够更加

精确地计算电机磁场和回路参数, 即根据电机的运行工况和铁心磁阻的实际情况, 利用磁链法计算不同转子位置时的回路电感系数, 再对回路电感系数进行离散傅立叶分析, 得到电感系数各次谐波的幅值和相角。

磁场有限元计算的第一个也是十分重要的步骤是生成有限元网格, 它包括大量的节点、单元、媒质、边界等信息, 生成网格对于软件的工程使用人员来讲十分繁琐且极易出错, 特别是当电机的某一尺寸改变时, 整个网格要改变。采用参数化有限元网格自动生成技术即采用多边形描述计算场域的拓扑结构以及多边形顶点坐标的参数化等技术能方便地对任意尺寸、极对数和绕组形式(整数槽和分数槽)的大型凸极电机进行数值磁场分析, 大大减少了有限元前处理的工作量。当确定所要分析电机的网格规模后, 网格便自动生成, 整数槽、分数槽、整距、短距自动判别以确定计算区域, 无需干预。

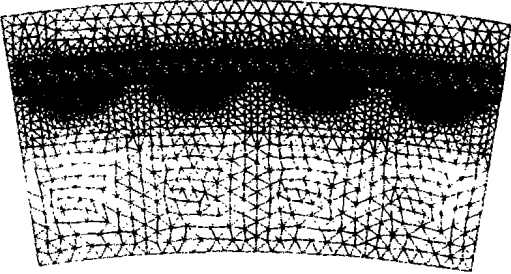


图 2 单元电机网格剖分图

自动生成的有限元剖分网格如图 2 所示。

2 故障分析

定子绕组内部故障包括匝间短路、同相支路间短路、相间短路、分支开焊等形式, 还可以包括由绕组误连接产生的内部不对称情况。这些故障随着发生位置的不同, 匝比的变化以及过渡电阻的不同呈现不同的特性, 本文直接从保护方案的灵敏度与这些因素的关系分析, 得出的结论可直接用于继电保护的配置。

2.1 单个保护方案分析

对定子绕组内部故障的保护, 采用单元件横差保护、不完全纵差保护、裂相横差保护与传统的保护(如传统纵差保护、故障分量负序方向保护等)组合的方案, 因此需要对单个保护作一详细分析。

单元件横差灵敏度按中性点联线一次电流标么值与整定值的比值算得, 整定值参考[2]。

不完全纵差、裂相横差的灵敏度计算与整定值设定按照比率制动原则, 具体操作见[2]。

图 4 所示, 为三峡左岸 700MW 机组(5 分支) A 相一支路匝间故障, 采用(1、4—2、3、5)布局的单元件横差保护(如图 3 所示)时, 中性点联线一次电流随故障匝比、位置的变化曲线。可见分析的步骤是比较复杂的。现就得出的一般性结论作一简述。

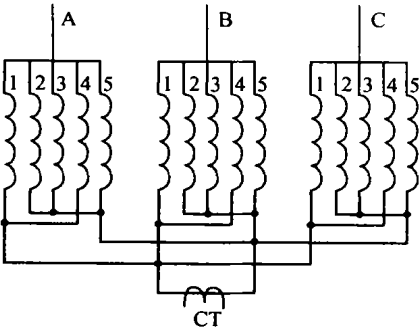


图 3 单元件横差接线图

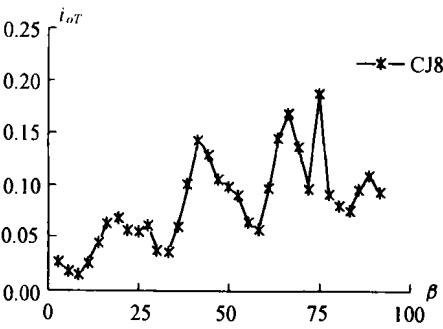


图 4 匝间短路时  $i_{or}$  与故障位置的关系

单元件横差可以保护发电机内部几乎一切故障,功能较为全面,而且在绝大部分情况下流经单元件横差 CT 上的故障电流较大,即有较高的灵敏度,推荐作为定子绕组内部故障的第一主保护方案之一。但是,在小匝比经过渡电阻的同支路匝间短路、故障净匝数较少且靠近出线端的同相异支间短路、故障净匝数为零的异相同名分支间短路等情况下,即使整定值设定得很低,如取为 3% 额定电流,灵敏度也很低;对于机端相间短路,单元件横差将失去保护作用。所以,必须装设发电机的另一主保护来配合单元件横差以缩小死区范围。单元件横差保护对匝间短路和同相异支间短路动作情况要好于异相支路间短路,即它的主要优点是保护匝间短路和同相异支间短路,而对于异相支路间短路需要其它保护如不完全差动或传统纵差来与之配合。

不完全纵差保护对于匝间短路和同相异支间短路,一般来看,分支数取小于  $a/2$  ( $a$  为总分支数)死区较小;分支数取得多于  $a/2$ , 越多死区越大,取全部分支即成完全纵差将对匝间短路和同相异支间短路失去保护作用。对于异相支路间短路,分支数取得越多对保护越有利,完全纵差能灵敏反应所有异相支路间短路故障。所以,在装设不完全差动保护时首先必须要明确它要重点保护哪类内部短路故障,这可通过调查发电机各种内部故障实际发生的几率以及可能发生的几率来决定取舍。

比率制动式传统纵差保护对发电机内部相间短路有较高灵敏度,可以对绝大多数内部相间短路起到保护作用。若不考虑过渡电阻,则任何相间故障都能使保护可靠动作,整定值取稍大也无妨。而如果考虑过渡电阻,则取较小可增加保护灵敏度,或者说保护可以反应经较大过渡电阻短路的故障。同时可见,过渡电阻对纵差差流和灵敏度也有较大影响,尤其当位于中性点附近短路匝数较少时。所以,比率制动式纵差保护的死区一般是位于靠近中性点附近经过渡电阻短路的情况,死区大小既与短路匝比有关,也与过渡电阻的大小有关,具体分析要经过内部故障的详细计算才能进行。需要指出的是比率制动式纵差保护只对内部相间短路起保护作用,对于内部匝间短路却无能为力,必须增设发电机定子绕组匝间短路保护装置。

裂相横差保护对定子绕组的内部短路故障及开焊断路故障灵敏度都较高,但所需电流互感器数量多、保护套数多,二次不平衡电流也比较大,所以在单元件横差保护满足灵敏度要求的情况下,不建议装设此种保护。

对于组合方案的确定,还需要经过具体分析,但对单个保护方案规律的掌握,有助于减小分析的范围,减轻工作量。

## 2.2 $n$ 分支绕组内部故障保护 CT 最优方案的设定原则

为了保证大型发电机的安全运行,根据国标《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》要求发电机装设定子绕组匝间和相间短路保护,而且主保护实现双重化。由单元件横差、纵联差动和裂相横差构成的综合差动保护,对发电机内部故障起到三重或更高冗余度保护的作用,而且灵敏度很高,可以满足内部故障保护的要求并已成功地应用于龙羊峡水电站和岩滩水电站大型发电机内部故障保护。一般来说,大型凸极同步电机每相绕组并联分支数较多,三种保护方案的 CT 安装方式也多种多样,然而每种装设方式对发电机定子绕组内部故障的保护范围不同,所以对继电保护最为关心的莫过于从诸多的组合方式中,找出一种或几种能够较为全面反映故障及动作的装设方式。组合数学是研究各种组合规律的学科,它包含了组合设计、组合优化和组合分析等内容,特别适用于发电机内部故障综合差动保护方案的 CT 装设方式的优化组合分析。

### 2.2.1 三种方案 CT 安装方式

根据排列组合规律可知, 单元件横差保护方案 CT 安装方式数为:

$$N1 = (C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^{n-1})/2 = 2^{n-1} - 1 \quad (4)$$

不完全差动保护方案(包括完全纵差)CT 安装方式数为:

$$N2 = C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^{n-1} = 2^n - 1 \quad (5)$$

裂相横差保护方案 CT 安装方式数为:

$$N3 = N1 = 2^{n-1} - 1 \quad (6)$$

根据组合数学知识得, 三种方案的组合方式共有  $N$  种, 即:

$$N = N1 \times N2 \times N3 = (2^{n-1} - 1)(2^{n-1} - 1)(2^n - 1) \quad (7)$$

### 2.2.2 CT 优化组合原则

寻求最佳的组合方案, 要保证在该种组合方式下保护范围为最大, 即满足:

$$\min = \sum_{m=1}^{SC} [f_{N1i}(m) \times f_{N2j}(m) \times f_{N3k}(m)] \quad (8)$$

$$\min = \sum_{m=1}^{SC} [f_{N1i}(m) + f_{N2j}(m) + f_{N3k}(m)] \quad (9)$$

式中:  $SC$  为总的故障分析次数;  $f_{N1i}(m)$  为第  $i$  种单元件横差保护方案在第  $m$  种故障下的灵敏度特征值, 当灵敏度小于 1.5 时为 1, 大于 1.5 时为 0;  $f_{N2j}(m)$  为第  $j$  种不完全差动保护方案在第  $m$  种故障下的灵敏度特征值, 当灵敏度小于 1.5 时为 1, 大于 1.5 时为 0;  $f_{N3k}(m)$  为第  $k$  种裂相横差保护方案在第  $m$  种故障下的灵敏度特征值, 当灵敏度小于 1.5 时为 1, 大于 1.5 时为 0. 式(8)、(9)就是综合差动保护最优方案设定的原则。

尚需指出的是综合差动保护需要发电机具备 2 组或 3 组中性点, 对于由电机制造工艺原因而不能引出多个中性点的发电机组, 就不能装设综合差动保护, 式(8)和式(9)也要根据所采用的具体保护方案作相应的调整。

## 3 软件系统的结构及主要功能

### 3.1 软件结构

“发电机定子绕组内部故障电量计算与保护方案分析”软件系统是为了继电保护工作者及相关人员所研制的。

该系统由机组参数输入、绕组故障形式分析、有限元网格自动生成、回路参数计算、故障回路方程形成及求解、保护方案分析和计算结果打印输出等七大模块组成。为了使用户更加方便高效地进行工程计算与分析, 系统还包括电机结构合理性判断、错误提示、在线帮助和网格、场图显示以及故障电量的波形显示等模块。图 5 为系统总体结构示意图。

### 3.2 系统功能

该软件包采用参数化软件设计方法, 使用界面友好, 有很强的图形显示功能, 用户只需输入发电机组的结构参数和电气参数, 便可进行分析, 无需人工干预, 具有很强的通用性和方便性, 计算结果非常直观; 可以方便地分析各种水轮发电机定子绕组内部故障, 给出故障时各电量的计算值, 还能够根据定子绕组分支数自动给出单元件横差、不完全差动及裂相横差保护方案的 CT 组合方式及其各种方案的计算结果和灵敏度值。采用该软件系统对三峡电站水轮发电机组进行了各种匝间和相间短路故障的分析计算, 为保护整定和灵敏度分析提供了明确的

数据和依据.

本系统在 windows 下提供全中文的用户界面,并以窗口、按钮、图形菜单为界面风格,键盘与鼠标均可操作.它可模拟发电机定子绕组各种内部短路故障及分支开焊故障,在各种运行状态下的各支路电气量通过电磁场数值计算方法可被精确计算出,因此可用来分析水轮机组的保护方案,并给出单元件横差、不完全差动及裂相横差在各种 CT 组合下的不平衡电流和灵敏度数值.利用网络图论和组合数学构造的发电机内部故障组合规律分析模型,可确定保护方案的 CT 优选方案.该系统充分考虑实际电机结构、绕组连接方式及铁心材料,可用于保护方案设计,也可用于分析保护动作行为.

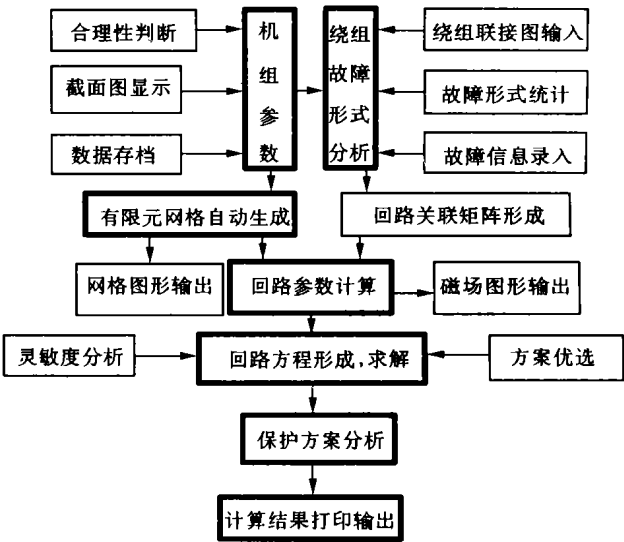


图5 系统总体结构图

4 计算实例

将该软件系统应用于华中理工大学动模实验室 MTF-15-6 凸极同步电机的分析,并将计算结果与试验结果进行比较.该同步发电机定子绕组为双 Y 叠绕组,每相并联支路数为 2.其中所用参数由磁场数值分析法算得.绕组正常时,负载、空载运行的计算与试验结果比较如表 1 所示,可以看出两者的吻合较好,磁场数值法比磁路磁导法更贴近实验值.

我们比较了定子绕组的三种内部故障:匝间短路、同相异支间短路、异相支路间短路.具体数据如表 2、3、4 所示.

表 1 空载和带 50% 负荷正常运行时实验结果与仿真结果比较

		空载(V)			负载(A)		
		$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
实验值		110.4	111.3	111.2	16.4	16.9	15.8
磁路	计算值	112.1	112.1	112.1	15.7	15.7	15.7
磁导法	相对偏差(%)	1.54	0.72	0.81	-4.46	-7.64	-0.64
磁场	计算值	111.4	111.9	111.5	16.2	16.0	16.2
数值法	相对偏差(%)	0.91	0.54	0.27	-1.23	-5.62	2.47

表 2  $A_1$  支路 46.67% ~ 20% 匝间短路时稳态电流实验结果与仿真结果比较 单位: A

		$I_{A1}$	$I_{A2}$	$I_{B1}$	$I_{B2}$	$I_{C1}$	$I_{C2}$	$I_{\text{总}}$	$I_{0-0}$
实验值		68.3	53.8	45.7	35.3	40.2	26.4	561	17.5
磁场	计算值	67.7	55.7	46.7	33.8	36.6	25.4	567	18.7
数值法	相对偏差(%)	-0.88	3.53	2.19	-4.25	-8.96	-3.79	1.07	5.06

表 3  $A_1 20\% \sim A_2 6.67\%$  同相异支间短路时稳态电流实验结果与仿真结果比较

		$I_{AK1}(\text{A})$	$I_{B1}(\text{A})$	$I_{C1}(\text{A})$	$I_{rg}(\text{A})$	$I_{0-0}(\text{A})$	$3U_0(\text{V})$
磁场	实验值	243.4	10.2	5.8	247.5	240.6	7.1
	计算值	270.8	9.6	7.3	268.2	276.8	5.5
	数值法 相对偏差(%)	11.3	-5.9	25.8	8.4	15.0	-22.5

表 4  $A_1 46.67\% \sim B$  出线端异相支路间短路时稳态电流实验结果与仿真结果比较

		$I_{AK1}(\text{A})$	$I_{A2}(\text{A})$	$I_{B1}(\text{A})$	$I_{B2}(\text{A})$	$I_{C1}(\text{A})$	$I_{rg}(\text{A})$	$I_{0-0}(\text{A})$	$3U_0(\text{V})$
磁场	实验值	261.6	23.7	133.5	151.7	20.6	235.0	149.2	32.8
	计算值	284.5	28.8	130.0	159.6	26.1	252.6	146.2	32.4
	数值法 相对偏差(%)	8.8	21.5	-2.6	5.2	26.7	7.5	-2.0	-1.4

通过比较可以看出计算结果和实验结果存在以下差别: 支路电流的相对偏差大部分小于 10%, 但也有个别幅值相对较小的支路电流, 其相对偏差较大; 短路环电流的相对偏差小于 10%; 中性点联线电流、机端纵向零序电压的相对偏差绝大部分情况小于 15%, 只有少数达到 20%。计算结果和实验结果基本吻合。

引起误差的原因很多, 主要有定子铁芯的局部饱和、实验时绕组抽头影响、CT 误差, 以及接触电阻、电网波动等。

本文所述的电机模型能考虑多种谐波的作用, 参数有限元磁场计算能计及饱和等影响, 所开发的软件系统已通过实践, 可为各种发电机定子绕组内部故障保护方案提供充分依据。

[参考文献]

[1] 屠黎明. 同步发电机定子绕组内部故障分析方法及其应用的研究[A]. 南京: 东南大学电气工程系, 1999.  
东南大学电气系博士论文集[C]. 2000

[2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理和应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996

Simulation and Analysis of the Internal Armature Winding  
Faults of the Salient Pole Generator

Hu Mingqiang, Wang Yan

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, PRC)

**Abstract:** With the increasing capacity of the generator, the damage caused by the stator winding internal faults has received more attention. This paper introduces how to simulate and analyze the large salient-pole generator with stator winding internal faults by modeling the machine, calculating the parameter, analyzing the protection scheme. Salient-pole generator is a typical type for this kind of fault, whose model can be a reference to other types.

**Key words:** salient-pole generator, fault analysis, simulation, protection

[责任编辑: 刘健]