

基于重复脉冲法的大型汽轮发电机 转子绕组匝间短路探测

李永刚, 胡利辉, 于娜, 李和明

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

[摘要] 发电机转子绕组匝间短路是发电厂实际运行中较常见的故障。本文首先简要介绍了我国现有汽轮发电机组的基本情况 & 发电机组的发展趋势。对大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的原因及其所造成的危害也作了简要分析。重点讨论并分析了基于重复脉冲法的大型汽轮发电机转子绕组匝间短路的探测。进行了 RSO (重复脉冲法) 实验, 测得了 RSO 波形, 验证了 RSO 试验的原理, 并在此基础上初步建立了转子绕组匝间短路探测的人工神经网络模型。

[关键词] 汽轮发电机; 转子绕组匝间短路; 重复脉冲法 RSO; 人工神经网络 ANN

Testing of Inter-turn Short-circuit Fault in the Rotor Winding of Large Turbogenerator Based on Repetitive Surge Oscilloscope

LI Yong-gang, HU Li-hui, YU Na, LI He-ming

(College of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003 China)

Abstract: Inter-turn short-circuit in the rotor winding of large turbogenerator is a kind of fault which we usually meet in the electric power plant. In this paper, we first introduce the primary situation of turbogenerator in our country at present time and the trend of turbogenerator development, explain the cause of this kind of fault and the damage it will lead to. Discuss and analysis the testing of inter-turn short-circuit in the rotor winding of large turbogenerator based on Repetitive Surge Oscilloscope (RSO), conduct the RSO experiment, record the RSO waveshape, and certificate the principle of RSO experiment, finally we built the ANN model of the test of inter-turn short-circuit in rotor winding.

Key words: turbogenerator; inter-turn short-circuit in rotor winding; Repetitive Surge Oscilloscope (RSO); artificial neural network (ANN).

1 引言

近几年来随着国民经济的快速发展, 全国用电量突增, 电力市场再次出现供不应求的状况。为了满足需求, 提高效益, 减少污染, 兴建大容量火力发电机组成为必然的选择。我国 60 万千瓦级火电机组的引进、优化、国产化战略目标已经完成, 国内首台 90 万千瓦火电机组已在上海外高桥火电厂投入运行, 我国目前已经具备了生产 100 万千瓦级火电机组的能力。但是, 发电设备的大型化必然导致单机容量占电网总容量比例的增大, 大型汽轮发电设备运行的可靠性和安全性尤为重要和突出, 它直接影响发电厂的稳定运行和向用户安全、可靠、经济地供电。发电机运行事故是当前我国发展电力工业方面存在的重要问题

之一, 一些恶性事故给国民经济带来了巨大的损失。多年来的事故统计资料表明, 许多事故的发生都与电机设计、制造质量及运行维护有关。在大型汽轮发电机组的各个组成部分中, 转子处于高速旋转状态 (一般为 3000r/min), 承受着巨大的机械应力和热负荷, 所以对转子部分的故障检测就显得尤为重要^[1]。由于制造过程中的加工工艺问题及运行中各种机电作用的影响, 大型汽轮发电机的转子绕组经常会出现匝与匝之间的接触, 从而导致转子匝间短路故障的发生。统计资料显示, 发电机转子匝间短路的发生有一个较长的发展过程, 可以把匝间短路分为三个故障状况, 即萌芽期、发展期和故障期。在萌芽期和发展期, 转子匝间短路对发电机运行的不良影响较小, 常常会导致

发电机的励磁电流升高、无功功率相对下降、轴承不平衡振动增加。如果在萌芽期和发展期匝间短路故障没得到很好的处理,一旦发展到故障期,这类故障会产生很大的危害,短路点局部过热会导致绝缘烧损接地,线棒过热会导致变形或烧熔,故障的进一步发展会造成护环烧坏,大轴磁化或烧伤轴颈和轴瓦等,甚至会造成转子烧毁事故。对机组的安全、稳定和经济运行构成了巨大威胁。随着汽轮发电机组容量的增大,国内外对转子匝间短路故障探测的研究也不断深入^[2]。

2 RSO 实验

RSO 重复脉冲法 (Repetitive Surge Oscilloscope) 可用于转子匝间短路的早期发现及短路的故障定位。

2.1 RSO 试验原理

RSO 试验应用的是波过程理论 (行波技术),当信号发生器发出的低压冲击脉冲波沿绕组传播到阻抗突变点时,会导致反射波和折射波的出现,因此会在监测点测得与正常回路无阻抗突变时不同的响应特性曲线。匝间短路的程度通过故障点处的波阻抗变化大小来反映,显示在波形图上可以用两个响应特性曲线合成的平展程度来判定,有突出的地方说明匝间存在异常,并且突出的波幅大小就表明短路故障的严重程度。因此,即使绕组出现一匝短路故障,应用 RSO 技术对故障识别也有很高的灵敏度。

绕组可被近似看作一简单的传输线,其中冲击波的传播主要是由绕组导体在槽中的几何形状和绝缘特性决定的,绕组的耦合作用将使冲击波发生散射。但对于实心转子来说,这种散射作用影响不大。当冲击波加到转子滑环的一端时,冲击波的幅度由冲击波发生器内阻和绕组波阻抗决定。冲击波从绕组的一端滑环传到另一端的时间由绕组长度和波在绕组中的传播速度决定。如果绕组的另一端为开路,则反射系数 $k=1$; 如果是短路,则 $k=-1$ 。反射波再返回到冲击波发生器时,若发生器内阻抗与波阻抗相等 (在电源端 $k=0$), 则冲击波被吸收,不再发生反射。由于匝间短路点的位置和程度不同,行波发生反射,折射的时刻及程度也不相同,故所测得的响应波形信号中必然包含了匝间短路故障的信息 (短路程度及短路位置)^[3]。

2.2 RSO 试验设备简介及接线

2.2.1 SDF-9 型故障模拟试验机组

华北电力大学电机教研室 SDF-9 型故障模拟试验机组是一台直流电动机——三相同步发电机组。它可

以模拟多种情况下的定子绕组匝间短路和转子绕组匝间短路。发电机组的基本情况介绍如表 1 所示。

表 1 模拟发电机基本数据

| 发电机 型号 | 额定 容量 | 额定 电压 | 功率 因数 | 额定 转速 | 额定 频率 | 级数 |
|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----|
| SDF-9 | 7.5kVA | 400V | 0.8 | 3000r/min | 50Hz | 2 |

发电机转子共有两极,每极转子虚槽数为 8,实槽数为 6,大齿所占槽数为 2。转子并联绕组根数为 1,转子每槽导线根数为 160,励磁绕组每极匝数为 480。励磁绕组在 20℃ 时的电阻为 7.8Ω。如下图所示, L2、L3 为励磁绕组中某一极绕组上的抽头,分别为 3%, 15%; L4 为励磁绕组中另一极绕组上的抽头,为 6%。转子抽头如图 1 所示。

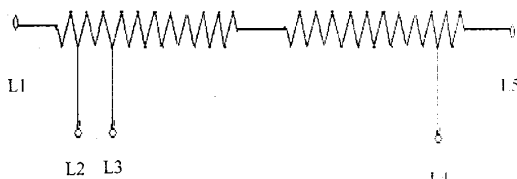


图 1 模拟发电机转子绕组抽头分布图

2.2.2 HP33120A 函数/任意波形发生器

可产生 15MHz 正弦、方波、三角波和噪声等函数信号。内置 AM、FM、FSK 等功能。具有 GPIB 和 RS-232 标准接口。可由 Benchlink Arb 软件编程产生任意波形。精度为 12-bit, 采样率为 40MS/s, 存储深度为 16000 个点。能产生标准波形为: 正弦波、方波、三角波、锯齿波、噪声波、直流、Sine(x)/x 波、负锯齿波、上升指数上升波、指数下降波、Cardiac 波。

2.2.3 Tektroix THS720p 便携式数字存储示波器

具有带隔离的两个输入通道,带宽 100MHz。兼有数字万用表、电力功率测量和谐波分析的功能。由于用可充电电池供电,可进行浮置测量。配合 Wavestar 测量软件,可实现测量波形和数据的传输和再处理。具有双通道示波器和数字万用表双重功能。采样速度范围: 5 点/秒~500 百万点/秒; 记录长度: 每通道 2500 点; 自动测量振幅、短脉冲群宽度、周期平均时间、周期均方根值、下降时间及频率等。

2.2.4 RSO 实验接线图

实验接线图如图 2 所示。实验中将信号发生器输出调为 4V, 1000Hz, 方波; 将示波器接到通道 1, 采样频率 5MS/s, 记录 2500 点。

3 RSO 波形分析

波形以图片形式输出, 正常情况下和一种短路故障时的波形分别如图 3 和图 4 所示。

试验中记录了分析所用的各种波形。所测得的波形实际上是 1000Hz 方波, 输入后其响应波形一个周期内的一段。在这一段中, 电压由上一周期的稳态值 -4V 突变到 7.5V 左右, 这一值近似为其输入值的两倍。然后经过一系列的振荡进入新的稳态值 4V。故障点的不同会导致振荡过程的差异。

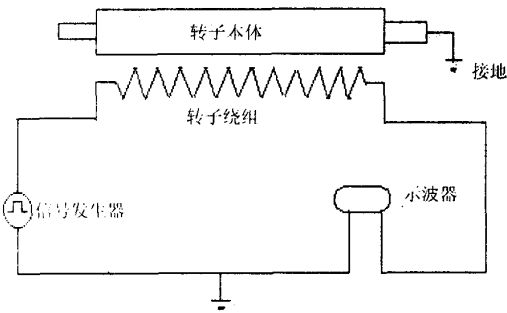


图 2 RSO 实验接线图

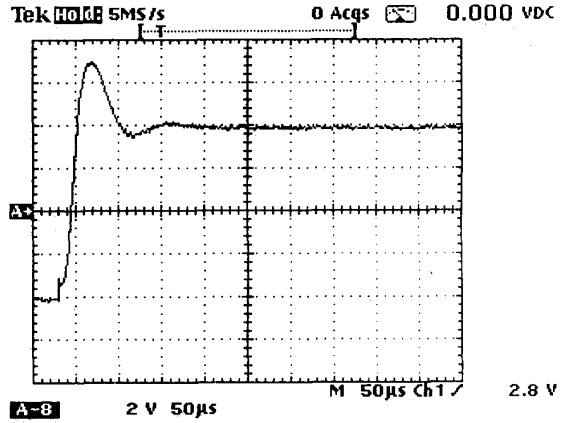


图 4 L1 和 L2 短接时 L1 入 L5 出波形

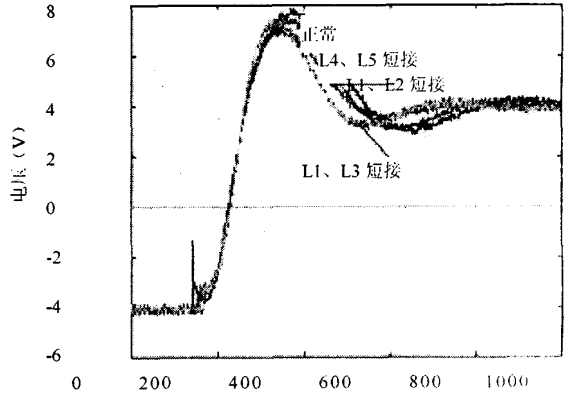


图 5 L1 入 L5 出时各种情况比较

从图 5 可看出: 对处在同一极的匝间短路, 短路越严重其振荡时间越短。

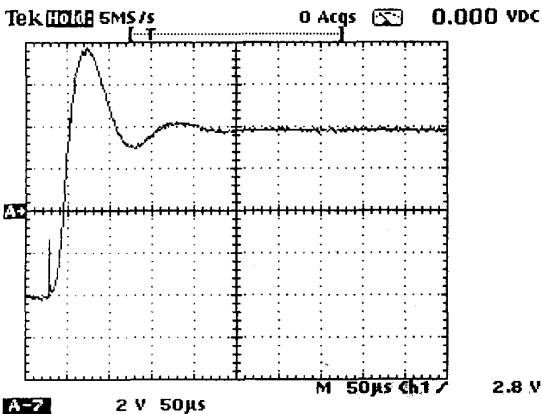


图 3 正常时 L1 入 L5 出波形

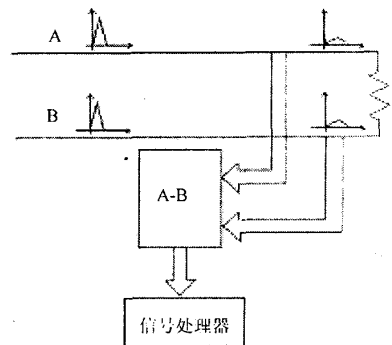


图 6 RSO 试验特征信号采集示意图

为了最大限度地提取 RSO 波形中反映匝间短路的信息,将同一短接情况下分别在两侧测得的波形做差,获得特征信号。信号提取过程如图 6 所示,特征波形如图 7 所示。

从图 7 特征波形图中可看出:对于处于不同磁极的匝间短路,其特征波形在走势上恰好相反;匝间短路程度越严重,其特征波形与横轴所围的面积越大。

图 8 给出了正常情况下的 RSO 波形及其特征波形。由图可以看出:当匝间无短路情况时,从两极测得的 RSO 波形重合,其特征波形基本上是一条与横轴平行的直线。

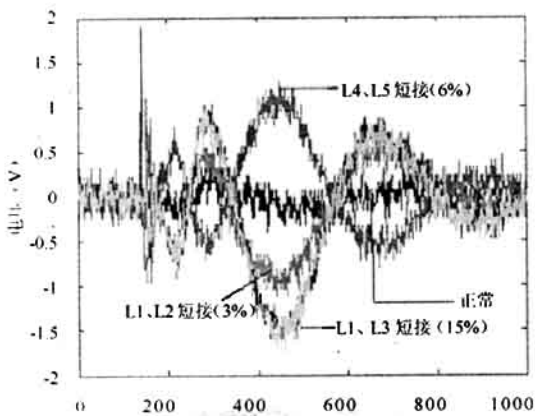


图 7 各短路情况下特征波形图

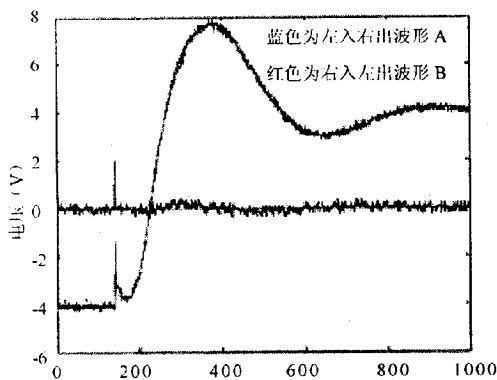


图 8 正常情况下的 RSO 波形及其特征波形

4 用人工神经网络对试验数据做进一步分析的探讨

人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)是由大量简单的神经元按某种方式连接形成的智能仿生动态网络。到目前为止,ANN的各类模型已

万方数据

达几十种,与之相伴的是大量出现边缘交叉学科。

4.1 基于人工神经网络的转子匝间短路判定法

数学模型是某些事物或现象的一种“类似”。一个精确的数学模型,应该比较准确地反映出真实系统的输入、输出和状态之间的定量关系。常见的有两类:基本模型和黑箱模型。基本模型是以现实系统的基本物理、化学定律等理论为基础而得到的一种模型,这种建模的方法往往因为现实系统的结构过于复杂,或其中存在一些未知或不确定的参数和干扰等问题而导致失败或使用价值较低。黑箱模型是在对所研究现实系统一无所知的情况下,将现实系统视为“黑匣子”,而仅借助于输入和输出数据,透过数学技巧来解决系统的模式。

如果我们能够对发电机转子建立一个非常精确的数学模型,那么我们就有可能用行波理论对其匝间短路做出判断。但是,该模型是一个多输入多输出的非线性模型,传统的基本模型不能够很好地解决这一问题。神经网络作为黑箱建模的一种工具就能够较好的解决这一问题。经过适当设计和训练的神经网络能够在输入和输出模式之间合成一个有效的非线性映射。这对于匝间短路检测和定位是非常关键的。

图 9 给出了利用神经网络进行匝间短路检测和定位的基本过程。由特征信号采集装置采集的训练数据用于神经网络训练。从特征信号中抽取的特征作为训练标准的人工多层前馈神经网络的输入。将短路的位置编码成若干个输出神经元,输出神经元的数目由确定短路位置所需的分辨率决定。神经网络的输出神经元同隶属度函数的数目相等。在实验期间,将神经网络输出进行解模糊,其中每一个隶属度函数根据对应的输出神经元加权。然后将加权的隶属度函数相加,所得和的质心(第一动量)就是短路位置^[4, 5]。

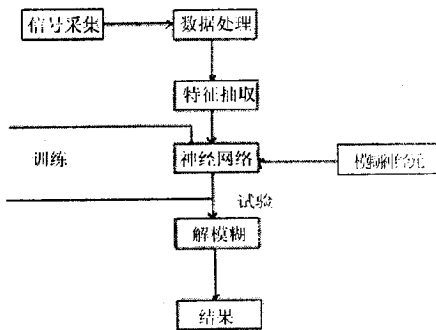


图 9 匝间短路测定过程框图

4.2 发电机转子匝间短路人工神经网络模型构建构件的人工神经网络为 BP(Back-Propagation)网

络，由输入层、隐含层和输出层构成。其中输入层有 10 个输入神经元，隐含层有 13 个神经元，输出层有 20 个神经元，如图 10 所示。

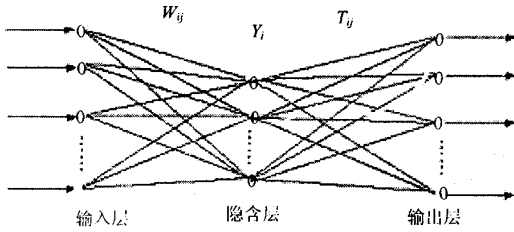


图 10 人工神经网络结构图

将 RSO 试验中所得到的特征波形每连续 100 个采样点分为一组，计算波形与横轴所围成的面积，将这 10 个面积值作为人工神经网络输入神经元的输入，如图 11 所示；将转子每极 480 匝绕组平均分成 10 份，两极 960 匝共分为 20 份，每一份的短路程度为输出神经元的输出，如图 12 所示。例如，在 L1、L2 间短路情况下，通过计算可得出其输入神经元输入为 [3.7788 17.3658 33.0522 37.3987 84.6400 26.4611 44.0000 33.0500 7.5352 9.1908]，输出神经元输出为：[0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]。

用试验所得的输入，输出样本训练 BP 神经网络，最后将得到一个与该大型汽轮发电机转子匝间短路相对应的 BP 神经网络模型，以后在匝间短路探测过程中只需先进行 RSO 试验，然后提取特征波形，将特征波形与横轴所围得面积作为神经网络的输入，根据神经网络的输出就能够判断匝间短路的位置及程度。探测的精确度与试验设备精度、参与神经网络训练的样本数及输出神经元的个数直接相关，而输入神经元和隐含神经元个数对精度也有一定的影响。

4.3 用 MATLAB 建立人工神经网络模型

根据以上所述模型，利用 MATLAB 中的神经网络工具箱，构建神经网络模型的基本流程并进行训练与仿真，其中在 BP 神经网络的创建中，隐含层 13 个神经元选用正切 S 型传递函数；输出层 20 个神经元选用对数 S 型传递函数，选用有弹回的 BP 算法训练神经网络。设定训练参数时，显示频率为 50，最大训练步数为 500000，期望误差为 1e-7。并可得到图 13 所示的训练步骤与误差曲线图。

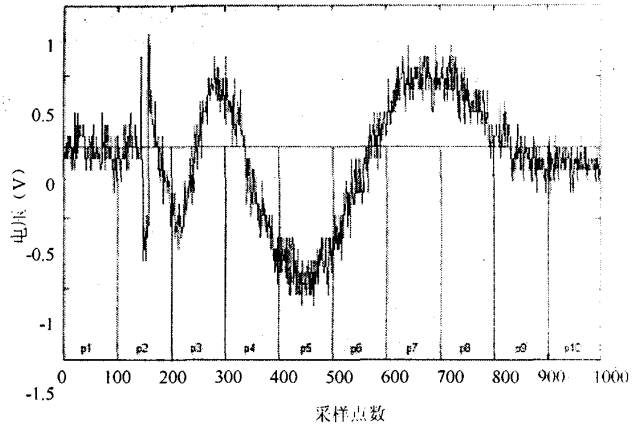


图 11 输入神经元输入数据来源示意图

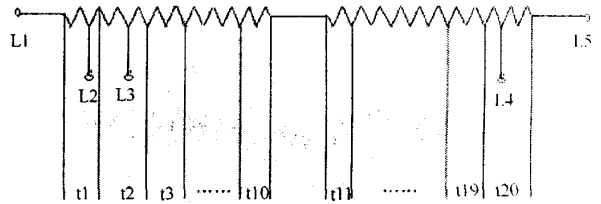


图 12 输出神经元输出数据涵义示意图

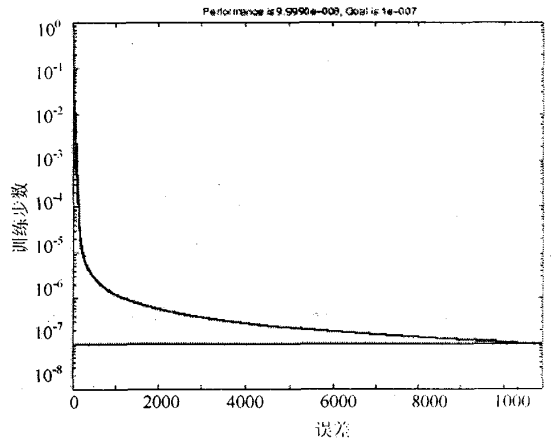


图 13 训练步数与误差曲线图

5 结论

文摘：（本文在分析大型汽轮发电机转子匝间短路故障发生和发展的基础上，分析各种方法的优点与不足，阐明了 RSO 波形探测法的原理，对试验过程及试验数据分析作了进一步的探讨，并在试验所得数据基础上，利用 MATLAB 软件初步建立了一个转子匝间短路的人工神经网络（ANN）模型。）

（下转第 54 页）

表4 135MW 发电机数据

| 项目 | 设计值 | 厂内试验值 | 电站运行值 |
|---------------------|-------|--------|--------|
| 视在功率, MVA | 158.8 | 158.8 | 154.56 |
| 有功功率, MW | 135 | 135 | 134.3 |
| 功率因数, $\cos\varphi$ | 0.85 | 0.85 | |
| 额定电压, kV | 13.8 | 13.8 | 13.9 |
| 额定电流, A | 6645 | 6645 | 6460 |
| 效率, % | 98.69 | 98.664 | |
| 定子线圈温升, K | 61.23 | 60.47 | 58 |
| 定子铁心温升, K | 52.5 | 53.4 | 50 |
| 转子线圈温升, K | 64.86 | 47.5 | 46 |
| 短路比 SCR | 0.565 | 0.592 | |
| X_d , % | 203 | 196 | |
| X_d'' , % | 23.68 | 22.78 | |
| 长 L , mm | 9150 | | |
| 宽 W , mm | 3920 | | |
| 高 H , mm | 3750 | | |
| 转子重, t | 38 | | |
| 定子重, t | 130 | | |
| 励磁方式 | 静止励磁 | | |

(1)定子采用单路通风系统,转子采用优化副槽径向通风,通风损耗小,温升均匀;

(2)性能经预先验证的定子绕组先进模压线棒技术加 VPI 整浸,双重强化绝缘,兼顾了散热良好和绝缘可靠;

(3)定子端部采用磁屏蔽,与铜屏蔽相比损耗更低,温升更低,保证了进相运行能力;

(4)定子机座与铁心采用立式弹簧板隔振,有效地减小了机座动应力和噪声;

(5)适用于多股线,短铁心的定子线棒不完全换位专利技术,有效减小环流损耗和附加温升;

(6)高效率。比传统型空冷和双水内冷电机效率高

出 0.3%以上(空冷 125MW 效率 98.65%,双水型 125MW 为 98.35%);

(7)最低限度的碳刷维护,小直径低损耗集电环,插拔式组合刷盒,在线更换安全简便;

(8)紧凑设计(135MW 发电机总长 9150),减少电厂占地,节省用户土建工程投资。起、停机不经过第二临界转速,避免了柔性转子的振动敏感;

(9)完善的防护设计和装置。自动温控电加热器,补风口的空气过滤器,油挡、风挡设置高压气封,确保机内空气清洁和防潮;

(10)来源于大型发电机的负序能力和调峰设计,例如转子采用不锈钢阻尼槽楔,银铜合金的转子铜排并应用滑移结构等。全面使用优良新材料,确保发电机适应重型燃机起动和各种恶劣运行环境和工况下的运行可靠。

5 结论

(1)基于面向用户评价和更高的性能,配联合循环的发电机优先采用全空冷和全氢冷(定子绕组间接冷却)的发电机

(2)通过提高绝缘等级、改进冷却技术以及更好的制造工艺,空冷 300MVA 以下,氢冷 600MVA 以下的发电机具有极强的竞争力。

[作者简介]

沈梁伟(1940-),男,浙江宁波人,1962年毕业于浙江大学电机系,长期从事汽轮发电机设计研究工作,教授级高级工程师。

马贤好(1966-),男,湖北武昌人,1987年毕业于华中工学院电力系,一直从事汽轮发电机设计研究工作,现任哈尔滨电机厂有限责任公司副总工程师,高级工程师。

(上接第 28 页)

[参考文献]

- [1] 赵华.汽轮发电机转子绕组匝间短路故障在线诊断研究.华北电力大学图书馆,2002.
- [2] 关建军.大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断研究.大电机技术,2003,(2):18~22.
- [3] 英 P.T 达夫勒, J.彭曼.电机的状态监测.第 1 版.北京:水利电力出版社,1992.
- [4] M.A.El-Sharkawi,R.J.MarksII, SehoOh, S.J.Huang, IsidorKerszenbaum, Alonse Rodriguez.Localization of Winding Shorts Using Fuzzified Neural Networks.IEEE Transactions on Energy Conversion VOL10, NO.1, MARCH 1995: 140~143.
- [5] Amol S.Kulkarni,Mohamed A.El-Sharkawi,Robert J,Marks,II,George Andexler,Jian Xing,Isidor Kers

-zenbaum: Development of a Technique for On-line Detection of Shorts in field Windings of Turbine-Generator Rotors:Circuit Design and Testing.IEEE Transactions on Energy Conversion. VOL15,NO.1,MARCH2000: 8~12.

[作者简介]

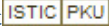
李永刚(1967-),男,博士,副教授,从事大型汽轮发电机状态监测及故障诊断技术研究工作;

胡利辉(1982-),男,华北电力大学,研究方向为大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断技术;

于娜(1981-),女,华北电力大学,硕士研究生,研究方向为大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断技术;

李和明(1957-),男,博士生导师,教授,从事交流电机及其系统分析与监控技术方面的研究。

基于重复脉冲法的大型汽轮发电机转子绕组匝间短路探测

作者: [李永刚](#), [胡利辉](#), [于娜](#), [李和明](#), [LI Yong-gang](#), [HU Li-hui](#), [YU Na](#), [LI He-ming](#)
作者单位: [华北电力大学电气工程学院, 河北, 保定, 071003](#)
刊名: [大电机技术](#) 
英文刊名: [LARGE ELECTRIC MACHINE AND HYDRAULIC TURBINE](#)
年, 卷(期): 2004(z1)

参考文献(5条)

1. [赵华](#) [汽轮发电机转子绕组匝间短路故障在线诊断研究](#)[学位论文] 2002
2. [关建军](#) [大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断研究](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2003(02)
3. [P T达夫勒](#); [J 彭曼](#) [电机的状态监测](#) 1992
4. [M A Ei-Sharkawi](#); [R J Marks II](#); [Seho Oh S J](#) [Huang, Isidor Kerszenbaum, Alonso Rodriguez. Localization of Winding Shorts Using Fuzzified Neural Net-works](#)[外文期刊] 1995(1)
5. [Amol S Kulkarni](#); [Mohamed A](#); [El-Sharkawi](#); [Robert J, Marks II](#); [George Andexler, Jian Xing, Isidor Kerszenbaum](#) [Development of a Technique for On-line Detection of Shorts in field Windings of Turbine-Generator Rotors: Circuit Design and Test-ing](#)[外文期刊] 2000(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ddjjs2004z1005.aspx