

大型发电机故障放电 在线监测及诊断技术

吴广宁 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 提 要

本书系统阐述了近年来国内外大型发电机故障放电在线监测及诊断技术的进展情况。全书共分六章，第一章论述了大型发电机故障放电的类型、起因、故障发展过程及对绝缘结构的破坏程度及评定方法，并介绍了发电机在线监测技术的研究历史和现状；第二章介绍了采用先进的实验设备及实验手段对大型发电机典型故障放电进行特性分析，这可为设计监测系统及传感器打下良好的基础；第三章介绍了新研制的宽频带故障放电耦合器，包括耦合器的原理、设计方法、现场安装及实验研究；第四章介绍了新研制的在线监测系统，包括其硬件组成、软件结构及算法、主要功能及技术指标；第五章介绍了自适应滤波器及其在大型发电机故障放电在线监测中的应用，这可为大型发电机故障放电在线监测中的难点问题——抗干扰提供有效的解决手段；第六章介绍了采用遗传基因网络进行大型发电机故障放电的模式识别。

本书可供从事电力和电子设备的设计、制造，以及电力系统绝缘监督和高电压绝缘技术领域的试验研究人员阅读，也可供大专院校有关专业（高电压与绝缘技术、电力系统及其自动化、工业电气自动化、电机与电器等专业）的师生参考。

前 言

电力设备在线监测及诊断技术的发展，是随着电力设备电压等级的提高，对绝缘结构及运行可靠性提出更高的要求而发展起来的。绝缘结构中的某些薄弱部位在强电场作用下发生局部放电是高压绝缘中普遍存在的问题，在一定条件下会导致绝缘层劣化甚至击穿。这种情况对设备的安全运行构成威胁，甚至造成电力设备运行时出现故障以至停机，其直接和间接的经济损失有时会超过亿元。对绝缘在线监测进行深入的研究，并对不同的电力设备制定出有效的测试及判断准则，从而提出预防事故的措施，是电力设备制造及运行中的迫切需求。

大型发电机故障放电的监测技术经过了几十年的发展，还远远没有达到可靠识别放电类型、准确预报事故的水平，对于汽轮发电机，甚至还没有可靠的监测系统。国内对于大型发电机故障放电在线监测的重要性已有所认识，但所开展的工作还仅限于对国外监测技术现状的介绍、初步的理论与实验研究和简单的模仿，所开发的装置由于输出信息少、报警规则简单，因而关于这些装置在实用中的效果报道甚少。因此，有必要研究适合大型发电机故障放电的智能型在线监测及诊断系统，使国内监测水平有所突破。

本书的主要内容是作者从事博士研究及其后来在韩国从事博士后研究所取得的成果。在此，作者向导师——西安交通大学谢恒 教授和韩国圆光大学朴大熙教授表示崇高的敬意和深深的感谢。西安交通大学陈寿田教授、巫松桢教授曾审阅本书的初稿，并提出了许多宝贵的意见。西南交通大学贺威俊教授、四川省电力实验研究院教授级高工李建明均对本书从理论到实践等方面分别提出了中肯的修改意见。本书的出版得到了西南交通大学出版基金的资助，在此作者一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，恳请读者对书中错误和不当之处予以批评指正。

作 者

1999 年 12 月于成都

目 录

1 绪 论

1.1 大型发电机故障放电在线监测的重要性	1
1.2 大型发电机中故障放电的特性及其评定	4
1.2.1 电机绝缘中故障放电的危害性	4
1.2.2 电机绝缘故障放电的起因及发展过程	5
1.2.3 电机绝缘状况的故障放电表征参量	8
1.3 大型发电机绝缘故障放电在线监测的进展概况	10
1.3.1 检测传感器	10
1.3.2 监测仪与监测系统	15

2 大型发电机故障放电的特性及其仿真

2.1 故障放电机理	20
2.2 放电模型及实验装置	27
2.2.1 放电模型	27
2.2.2 实验装置	30
2.3 故障放电的特性仿真	31
2.4 故障放电的统计特性	38
2.5 故障放电脉冲在电机中的传播特性	40
2.5.1 故障放电脉冲的频谱特性	40
2.5.2 故障放电脉冲在电机中的传播特性	45

3 故障放电在线监测的宽频带耦合器

3.1 宽频带故障放电耦合器的原理	49
3.2 宽频带故障放电耦合器的设计	55
3.2.1 磁性材料的选取	55

3.2.2 故障放电耦合器的设计与安装	60
3.3 放大器的设计	63
3.4 实用型宽频带故障放电耦合器的设计	66
3.5 宽频带故障放电耦合器的辨识建模	68
4 数字化故障放电在线监测系统的原理及实践	
4.1 数字化故障放电在线监测系统的总体设计	74
4.2 数字化故障放电在线监测系统的实现	78
4.2.1 数字化故障放电在线监测系统的硬件	78
4.2.2 数字化故障放电在线监测系统的软件	91
4.3 数字化故障放电在线监测系统的现场应用	102
5 故障放电在线监测的抗干扰技术	
5.1 电机中的噪声干扰及常用抗干扰方法	104
5.2 自适应滤波器的原理及实用技术	110
5.2.1 基本原理及组成	110
5.2.2 用于故障放电在线监测的自适应滤波器	115
5.2.3 自适应滤波器的算法	116
5.2.4 自适应滤波器在故障放电在线监测中的应用	121
6 神经网络对故障放电的模式识别	
6.1 概述	132
6.2 神经网络的原理	135
6.2.1 神经元及其模型	135
6.2.2 BP 算法	138
6.2.3 遗传基因算法	142
6.3 用于故障放电模式识别的神经网络	151
6.4 人工神经网络在大型发电机故障放电模式识别中的应用	156
主要参考文献	163

1 绪 论

1.1 大型发电机故障放电在线监测的重要性

电力设备绝缘在线监测技术的发展，是随着电力设备电压等级的提高，对绝缘结构及运行可靠性提出更高的要求而发展起来的。绝缘中的某些薄弱部位在强电场作用下发生局部放电是高压绝缘中普遍存在的问题，在一定条件下会导致绝缘劣化甚至击穿。这种情况对设备的安全运行构成威胁，甚至造成电力设备运行时出现故障以至停机，其直接和间接的经济损失有时会超过亿元。对绝缘故障放电的深入研究，并对不同的电力设备制定出有效的测试及判断准则，从而提出预防事故的措施，是电力设备制造及运行中的迫切需求。因此，电力设备绝缘在线监测及其诊断技术已成为一项重要的研究课题。

大型发电机是电力系统中的关键设备，近年来随着其额定电压和容量的不断提高，大型发电机在运行过程中受到更多的电、热、机械应力及环境因素的影响，这些因素就会直接或间接地使高压定子绝缘的一些薄弱环节产生局部放电，导致电机出现故障。电机中的局部放电主要有绕组绝缘内部放电、端部放电及槽放电 3 种；另外，电机中还有一种危害性放电，是由于定子线圈

股线断裂引起的电弧放电，这种放电的机理与局部放电有所不同。在本文中，将电机中这 4 种典型的危害性放电统称为电机故障放电。

电机中的故障放电是促进绝缘的老化和导致电机发生事故的重要原因，对大型发电机故障放电的监测不但能够了解电机绝缘的状况，还能及时发现许多有关制造与安装方面的问题，确定绝缘故障的原因及严重程度，从而有计划地制定维修计划，防患于未然。

对于大型发电机，其预防性试验方法分为离线检测与在线监测，比较二者，前者有 3 个明显的缺点：

要求停机试验时间至少为一天，或在现在的停机时间上再延长一天，并且需要一个庞大的、无局部放电、容量至少为 40 kVA 的高压电源；

当发电机停止运行时，一些类型的放电可能不出现。由于电磁力的消失，松弛的槽楔和已损坏的弹性波纹板的振动引起的放电及槽部放电便不能可靠地测出；

由于没有正常模拟的三相电压分布，绕组在离线检测时测不出正常运行时出现的端部放电。

事实上，对于定期大修和预防性实验的局限性早有认识¹，在线监测除可减少停机损失，提高运行可靠性外，它不需要停机进行局部放电试验所用的昂贵的高压试验设备。避免不必要的停机试验也是重要的。因为过去的经验已经表明，停机期间或停机后

的瞬间最容易产生突发事件，使发电机发生故障。在线监测的实施使得在事故的早期阶段就能发现并提前报警，有利于维修人员在合适的时候停机与检修设备，对价值昂贵的设备显得尤为重要。例如 300 MW 的大型汽轮发电机，对其关键项目的连续监测可以获得重大的经济效益：其一是减少设备的损坏，降低更换设备所需要的费用；其二是由于预知维修状态，节省了停机时间，因此可以大大减少由此造成的电力损失。据国外文献报道，大型核电机组的日停机损失可超过 25 万美元，若事故大修期为 80 天，则不包括修理费用的停机损失至少为 2 000 万美元。

随着对大型发电机事故认识的不断加深，人们已研究出了多种测量方法及测量装置，例如：

电机局部过热使绝缘裂解时，会产生某些特定成分的气体，检测气体引起的离子室电离电流的变化，或进行气相色谱分析，可了解局部过热的程度，据此开发出了 GCM (Generator Condition Monitor) 装置；

绕组端部振动会引起线棒绝缘破坏并导致疲劳开裂，由此研制出了振动传感器和相应的监测系统；

机内冷却气体湿度过大会降低起晕电压，易产生电晕并导致绝缘性能的劣化，由此开发出了机内气体湿度监测装置。

但是，大量的工作集中在故障放电的在线监测和分析上。电机故障放电与其状态密切相关，通过监测放电的发生、发展，可及时发现事故的隐患，防止重大事故的发生。故障放电与其

他检测方法相比具有较高的灵敏度，可及时发现电机绝缘的故障，因此，研究大型发电机故障放电在线监测具有十分重要的意义。

1.2 大型发电机中故障放电的特性及其评定

1.2.1 电机绝缘中故障放电的危害性

电机绝缘故障放电的产生有多种原因，例如：

在电机线圈制造过程中，由于工艺上的原因，可能会在绝缘层间或绝缘层与股线之间产生气隙，电机在运行过程中如果气隙间电压达到间隙的击穿电压时，便会发生故障放电，而且随着电机运行时间的增长，绝缘层在热、电、机械及环境等各种应力的影响下，会进一步劣化，最终导致绝缘层开裂、剥落、槽楔松动，以及半导体垫条涂层功能丧失；

当电力系统出现暂态过电压时也会引起电机绕组电位不均匀，或由于绕组松动而导致绕组绝缘损坏，这些都会直接产生故障放电；

电机的频繁起动引起绕组松动；振动加剧使绝缘层剥落、绝缘老化，并使换向器和电刷出现故障；电机在运行过程中的高温使电机绝缘材料劣化，低温引起结露；另外环境中的灰尘或电机电刷装置的炭粉等可能进入电机而污染绝缘，这些都会间接导致故障放电。

故障放电对电机绝缘的损坏效应主要有 3 种：

带电质点的轰击。气隙内的气体放电属于流柱状高气压辉光放电，存在着大量带电粒子，能量很大，它们以很高的速度碰撞隙壁，可能打断绝缘体的化学键，从而破坏了绝缘体的分子结构，造成云母片的机械强度降低，使云母片上出现许多孔眼，边缘似被虫蚀；

热效应。在发生故障放电的气隙内，局部温度高得可使胶合剂碳化、股线和绝缘云母变白，有时云母熔化成粉末会造成股线松散，导致因振动而磨细以及短路、断股，致使主绝缘厚度减薄；

化学损坏。在故障放电过程中会生成许多活性生成物，如臭氧，若有水分子则产生硝酸、草酸等，这些生成物会腐蚀绝缘材料如胶合剂和纸，使介电性能劣化。

1.2.2 电机绝缘故障放电的起因及发展过程

如前所述，大型电机定子线圈中的故障放电主要有电机绝缘内部放电、端部放电、槽部放电及电弧放电等 4 类。

1. 电机绝缘内部放电

现代高压电机定子绕组的对地绝缘，大多采用以云母为基材、用环氧树脂浸渍固化的绝缘结构。在其制造过程中，如果工艺控制不严格，浸渍不充分，就会在绝缘中留下微小的气泡或气隙；电机在长期的运行过程中，由于受到电、热、机械应力的联合作用，也

会在绝缘中产生气泡。因为绝缘材料的介电常数比空气的介电常数大得多，在外施电压的作用下，气泡首先被击穿，形成绝缘内部放电。内部放电的热、化学、机械效应又进一步促使气泡产生和扩大，造成绝缘有效厚度减少，使击穿电压降低，最终导致整个绝缘层的击穿。

内部放电主要有 3 种形式：

辉光放电；

具有陡脉冲上升沿的火花放电；

介于辉光放电和火花放电之间的亚辉光放电。当气隙位于固体绝缘内部时，这三种放电形式同时存在，因此大多数绝缘内部放电都可由脉冲检测系统测出。

2. 端部放电

大型电机端部是绝缘事故的多发区，在诸多导致事故的因素中，端部放电是重要的原因。

绕组端部并头套连接处的绝缘需要手工处理，质量难以保证。绕组端部采用绑扎或压板结构固定，当电机冷却气体的相对湿度过大，击穿电压大幅度降低时，相间的总体绝缘强度就可能不足以承受相电压，从而导致相间放电；不同相的线棒之间还存在固定用的涤玻绳和适形材料，它们容易被漏水漏油污染，从而引起表面滑闪放电；绕组端部的渐开线部分倘若留存异物，运行中的端部振动使异物和绝缘相互摩擦而损伤防晕层，或者振动引起固定部件松动也会磨损防晕层，从而引起端部表面放电。

3. 槽部放电

高压电机槽部放电是指线圈主绝缘表面和铁芯槽壁之间的放电，其产生的原因是线圈槽部表面不能和铁芯槽壁完全接触，其间总有间隙，且通风槽口处电场分布不均匀，当局部电场强度达到一定数值时，气隙中的气体发生局部电离而产生槽放电。

槽放电的预防方法主要采用低阻防晕层进行处理。一方面使通风槽口处电场分布均匀，以降低轴向场强；另一方面，低阻层与槽壁接触处为低电位，将该间隙短路，防止了电晕的产生。

但是，并不是采用低阻层处理后就能完全防止槽放电。若防晕层与槽壁接触不良或不稳定，在电磁振动的作用下，接触点若即若离；或在运行时由于定子铁芯振动，导致线棒固定部件如槽楔、垫条的松动和低阻层的损坏；线棒和铁芯的接触点过热造成的应力作用损伤了线棒低阻层，这些都会导致槽放电。槽放电是比电晕放电能量大数百倍的间隙火花放电，局部温度可达摄氏数百至上千度，使绝缘表面受到严重破坏，在短期内可造成 1 mm 以上深度的麻坑，且腐蚀位置随振动、接触等条件的变化而经常变动。由于振动使线圈表面与定子铁芯槽壁失去接触而产生的槽放电，是高能量的电容性放电，这种高能放电产生的加速电子，将对线圈表面产生热、机械力的作用。放电使空气电离而产生臭氧及氮的氧化物（NO、N₂O、N₂O₄ 等），氧化物与气隙内水分起化学反应，会引起线圈表面防晕层、主绝缘、垫条等烧损和腐蚀，层间及楔下垫条烧成蚕食状。在电机的实际运行中发现，这一状

况引起的电腐蚀，对电机绝缘的损坏非常迅速。防止的办法是使线圈在槽内固定牢靠，不松动，与槽壁接触良好。

4. 电弧放电

电机绕组端部并头套连接处和槽内某些导线需要焊接，引线和股线需要可靠地固定。如果导线焊接质量不好或引线和股线固定不牢靠，在电机运行中会因振动而断裂；如果导线本身质量不好或装配过程中因硬性扭转而承受内应力过大，或者在电机运行中存在严重的冷却系统故障使导线过热，均容易产生断裂；另外，端部采用的绑扎和压板式固定结构也会因振动而松动，当其自振频率变化到与电磁力的作用频率接近时，振动将加剧，也引起股线的疲劳断裂。股线断裂后，断头两端由于振动而若即若离，形成火花放电，并由于额定电流的通、断而造成不断燃弧熄弧，形成电弧放电。这种电弧产生的热量足以使股间绝缘烧损、局部涡流损耗加大，并使导线熔化、对地绝缘烧毁，引起相间短路和多处接地故障。

1.2.3 电机绝缘状况的故障放电表征参量

为描述故障放电的状态及其对绝缘的破坏机理，必须有参数来表征。本文对故障放电的基本表征参数，采用了传统的局部放电的表征参数。描述局部放电的最基本也是最主要的参数是视在放电电荷。

视在放电电荷定义为：在绝缘体中发生局部放电时绝缘

体上施加电压的两端出现的脉动电荷量。视在放电电荷量大小确认为：将模拟实际放电的瞬变电荷注入试样施加电压的两端，如果在此两端出现的脉冲电压与发生局部放电时产生的脉冲电压相同，则注入的电荷量即为视在放电电荷量，单位用微微库（pC）表示。

在一个试品中可能出现大小不同的视在放电电荷量，通常以稳定出现的最大的视在放电电荷量作为该试品的放电量。视在放电量 q_a 是实际放电电荷量在整体绝缘件上所产生的脉冲电压 Δu 与整体绝缘电容 C 的乘积，即

$$q_a \approx \Delta u \cdot C \quad (1.1)$$

实际上视在放电电荷量总比真实的放电电荷量小，在实际测量中有时甚至小许多倍。

另一个描述局部放电的基本参数是放电重复率 N ，即在测量时间内，每秒钟出现放电次数的平均值，单位为次/秒。实际上受到测试系统灵敏度和分辨能力所限，测得的放电次数只能是视在放电电荷大于一定值时放电间隔时间足够大的放电脉冲数。此外，描述局部放电的基本参数还有放电能量、平均放电电流、起始放电电压和熄灭电压等。

电机绝缘故障放电是一种较复杂的现象，要用多种参数才能较全面地描述其放电状态，但是在实际中，总是希望测量的参数越少，测量的方法越简单越好。因此，必须研究哪一种特征参数

是评定电机绝缘故障放电性能指标的最佳参数，通过放电的哪些特征能最准确地评定绝缘的劣化程度，包括各种参数的分布特征、各种参数随电压幅值或作用时间的变化特征等等。

近年来，随着数字化局部放电测试技术及计算机技术的发展，测量一定时间内各次放电的放电量、放电次数及放电相位并经过统计处理得出各种表征局部放电的分布谱图成为一种趋势，可采用这些分布谱图如二维谱图 $q-n$ 、 $\varphi-q$ 、 $\varphi-n$ 及三维谱图 $\varphi-q-n$ 等来表征放电的特征。

1.3 大型发电机绝缘故障放电在线监测的进展概况

电力系统的有关部门在大型发电机故障放电测试技术方面正进行着积极、努力的探索。近年来，针对大型发电机故障放电所做的研究，从国外和国内所发表的文献可以看出取得的经验和成就。

自从 20 世纪 50 年代早期 Johnson 和 Waren 发现电机槽放电以来，大型发电机故障放电在线监测技术有了很大的发展，主要在传感器和监测系统的研制、抗干扰技术的研究，以及放电特征提取与分类等方面做了大量的工作。

1.3.1 检测传感器

1. 槽放电检测器

第一次成功地进行在线监测大型发电机及电动机局部放电的

传感器是 20 世纪 50 年代由 Johnson 等人开发的槽放电检测器。Johnson 等人最初利用一种谐振探测电路进行局部放电探测,该电路在电机引线端接有一耦合电容,利用一高压无电晕试验变压器对电机各相分别进行测试,结果最先在定子绕组与相邻的铁芯槽壁间发现了槽放电现象。

2. 便携式电容传感器

这种方法是 Johnson 槽放电检测器的一个变形,便携式电容传感器暂时连接在高压出线端,信号取自三个 $375 \text{ pF} / 25 \text{ kV}$ 的电容(每相接一个电容),电容传感器的后端接了一个带通滤波器($30 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$),通过它将信号送入一个示波器。有经验的作者可以根据放电波形通过模式识别技术来区别外部干扰和内部放电信号。这种方法已经在 150 台水轮发电机和 50 台汽轮发电机上使用了 35 年,每半年进行一次实验的结果证明该方法对于电机维护及有计划的维修是行之有效的。采用这种方法进行局部放电的检测需要有大量模式识别的经验,并且识别的结果对于其他电机不可通用。采用这种传感器开始的 5 年中需要每周进行 2~3 次实验以便积累经验来识别所有的干扰模式。加拿大安大略水电局目前仍采用此法来进行核电及火电汽轮发电机的日常局部放电检测工作。

3. 射频电流互感器 RFCT (Radio Frequency Current Transducer)

美国 Westinghouse 公司的 F.T.Emery 等人在 20 世纪 70 年代提出的无线电频率(RF)监测法,后由 J.E.Timperly 等人作了改进,