

大型发电机转子 故障分析与诊断

张征平 刘 石 姚森敬 冯永新 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

大型发电机转子 故障分析与诊断

广东电网公司电力科学研究院

张征平 刘 石 姚森敬 冯永新 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



序

当前,我国的发电事业正朝着大机组和多样化的方向发展。火电、水电、核电、热电、风电等多种发电形式,如雨后春笋般在发电领域中竞相呈现。虽然总装机容量、单机容量等方面实现了跨越式发展,但也带来制造、运行、检修等诸多方面的不足和滞后,给大型发电机故障分析技术提出了更高的要求。我们需要及时总结经验,以确保发电机这一重大电力设备安全、稳定、可靠的运行。

转子作为构成发电机的两大部件之一,由于工作在高速旋转的状态下,且同时受到机、热、电等多种复杂因素的影响,其故障分析诊断技术比较复杂,一直发展得比较缓慢。在处理近年来国内多起大型发电机转子故障时,暴露出了各种弊端,无法满足现代电力生产对故障分析快速性和准确性的要求。本书作者是本行业后起之秀,长期耕耘在广东省电力生产第一线,将理论与实践相结合,在转子故障分析诊断技术方面已经取得了重大的进展,并且开始向着理论化、系统化的方向发展。

本书第一个特点是书中对转子故障分析技术的研究,不再沿用过去单一从机械专业或单一从电气专业来分析的传统分析方法,而是携手机械和电气两个专业,实现了对发电机转子这一重大机电部件的联合分析。本书第二个特点是实用性强,实例丰富,分析清晰,深入浅出,几乎是看了就能用,用了就见效。这些成果对发电企业尽快查明转子故障原因、避免巨额电量损失,以及保证机组的安全运行等有重要的意义。本书对发电机设计、运行、维修人员也提供了宝贵经验,是业内相关技术人员不可缺少的良师益友。

汽轮发电机转子故障分析是发电机故障分析的一个重要组成部分,值本书出版之际,我们期待有更多的发电机故障分析技术创新成果涌现出来,并与业内同行分享,为我国电力工业发展多作贡献!

沈樑伟

2011年6月24日

前言

近年来,我国的国民经济发展很快,对电力负荷的需求十分强劲,发电行业取得了迅猛的发展,新建电厂不断增多,装机容量也越来越大。目前,单机容量为 600MW 的发电机组已成为发电领域中的主力机组,而单机容量为 1000MW 的发电机组正在迅速成为新的主力发电机组。

虽然单机容量 600MW 或单机容量 1000MW 等级的发电机组运行中具有负荷能力更强、发电效率更高的优势,但同时也给电网的负荷预控提出了更高的要求,并增加了运行中的风险。一旦因故障停机,将给发电企业造成重大的经济损失。近几年来,大型发电机转子频繁出现匝间短路故障,仅广东省在 2010 年一年中,就已经有近十台 400MW 或 600MW 以上等级的发电机出现了匝间短路故障。另外,转子运行中因碰摩、轴承刚度劣化、转子自身热不平衡等引起的异常振动,以及落后的动平衡调整方式等,不仅给电厂的运行维护人员造成了极大的困惑,而且影响了发电任务的顺利完成,给电厂造成了巨额的经济损失。

转子故障既是一个老问题,也是一个新问题。说它是一个老问题,是因为伴随着发电机的诞生,转子故障就随之产生了,因此,它可以说是历史悠久。说它是一个新问题,是因为在转子故障分析诊断领域中,现有的一些分析诊断方法还存在着明显的不足,还有不少技术难题有待解决。由于以前机组的容量、负荷等都不大,生产工艺方面也比较成熟,转子方面的故障比较少,人们对其故障分析诊断技术的研究还没有加以足够的重视。加上转子运行在高速旋转的状态下,受到多种复杂因素的影响,对它进行故障分析的手段十分有限,客观上也限制了转子故障分析诊断技术的发展。因此,发电机转子故障分析诊断技术一直处于一种非理论化、非系统化的零散、落后的状态。当现代大容量发电机的转子故障频繁发生时,传统的转子故障分析诊断技术往往因无法胜任,而处于一种比较尴尬的境地。从近几年的情况来看,这个问题表现得尤为突出。

针对这一尴尬的局面,我们在总结传统分析方法的基础上,结合实际中出现的大型发电机转子故障问题,对转子故障分析诊断技术进行了长期深入的分析和探索,并取得了突出的研究成果,提出了运行中转子绕组匝间短路故障的在线诊

断新方法、基于移相椭圆技术的跨外单面动平衡方法等多项重大的技术创新，实现了转子故障诊断技术领域中的重大突破，并成功实现了多台大型或超大型发电机转了故障的准确分析、诊断及处理，使电厂避免了巨额的经济损失。在多年的发电机转子故障分析与诊断研究工作中，我们深切地体会到，当转子运行中因异常振动而迫使发电机降负荷运行甚至停机时，来自发电企业要求对故障原因尽快进行科学分析和准确诊断的迫切心情。正是基于这一需要，我们在上述工作的基础上，对零散的传统转了故障分析方法进行了梳理和归纳，再将自己多年的研究成果补充进来，加以理论化和系统化，并结合大量实际的诊断案例，编撰成书。我们希望本书的出版，能对国内发电机转子故障的分析与诊断技术的进步起到良好的促进作用。

本书共分 11 章，内容包括发电机转子故障诊断的机电信息融合框架、转子轴振动干扰信号的辨识、转子匝间短路故障的特征、动态及静态下转子匝间短路故障的分析和检测、发电机碰摩故障诊断中的摩擦能量法、轴承轴向振动的诊断技术、基于涡流传感器间隙电压的诊断技术、发电机轴系单面平衡策略等，最后详细介绍了一些实际的故障诊断案例。有关研究工作得到了国家自然科学基金和广东省自然科学基金及广东电网公司的资助，在此深表谢意。在本节的撰写及出版过程中，还得到了广东电网公司电力科学研究院技术研发部阚伟民主任等领导的关心、支持和帮助，在此一并表示谢意。

本书的写作历时三年，期间凝聚着我们的努力与期望及家人的理解。令人欣慰的是，本书现在终于完稿并得以出版。

由于作者水平有限，书中难免有不足和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月 24 日

目 录

序
前言

第 1 章 概述	1
1.1 背景及现状	1
1.2 故障现状	3
1.3 主要内容	3
第 2 章 发电机转子故障诊断的机电信息融合框架	5
2.1 信息集成与融合	5
2.2 发电机转子典型振动故障	7
2.3 发电机转子故障诊断过程的信息融合框架	14
2.4 小结	15
第 3 章 发电机轴振动干扰信号的辨识	16
3.1 发电机轴振动干扰信号	16
3.2 发电机轴振动干扰信号的试验	18
3.3 基于信息融合技术的干扰信号识别	24
3.4 干扰信号的识别规则	32
3.5 小结	33
第 4 章 大型发电机转子匝间短路故障的特征	35
4.1 概述	35
4.2 转子匝间短路故障的动态特征	36
4.3 转子匝间短路故障的静态特征	46
4.4 小结	49

第5章 动态下转子匝间短路故障的分析和检测	51
5.1 概述	51
5.2 转子匝间短路故障的分析和检测步骤	53
5.3 转子运行中的匝间短路故障分析	54
5.4 小结	64
第6章 静态下转子匝间短路故障的分析和检测	66
6.1 静态下转子匝间短路故障的分析方法	66
6.2 动态与静态的诊断结果不一致时的情况	71
6.3 转子匝间短路故障点的定位分析	73
6.4 各种分析方法的适用性比较	76
6.5 小结	77
第7章 发电机碰摩故障诊断中的摩擦能量法	78
7.1 概述	78
7.2 发电机碰摩故障机理	79
7.3 基于融合技术的摩擦能量法	84
7.4 摩擦能量法在现场诊断中的应用	88
7.5 小结	89
第8章 发电机轴承轴向振动的诊断技术	90
8.1 概述	90
8.2 轴向振动的力学模型	91
8.3 发电机轴承轴向振动原因分析	95
8.4 发电机轴承轴向振动处理策略	99
8.5 小结	101
第9章 基于涡流传感器间隙电压的诊断技术	102
9.1 概述	102
9.2 提取间隙电压的信号处理方法	103
9.3 发电机振动间隙电压特性分析	106
9.4 间隙电压识别发电机机械故障	108

9.5 小结	114
第 10 章 发电机轴系单面平衡策略	115
10.1 发电机轴系动平衡特点	115
10.2 单面轴系动平衡判据及方法	116
10.3 600MW 氢冷发电机单面轴系平衡案例	120
10.4 1000MW 氢冷发电机单面轴系平衡案例	124
10.5 小结	128
第 11 章 发电机故障诊断案例	129
11.1 汽轮发电机转子匝间短路的诊断	129
11.2 发电机转子匝间短路故障点精确定位	154
11.3 燃气轮发电机启动振动异常的诊断	160
11.4 机械与电气耦合作用引起异常振动的诊断	176
11.5 发电机碰摩故障的诊断与处理	179
11.6 发电机突发振动的诊断	193
11.7 发电机轴承动态刚度恶化的诊断	195
11.8 集电环故障的诊断与处理	199
参考文献	202

概 述

1.1 背景及现状

随着国民经济的持续发展,我国电力工业正处于大电网与大机组的迅速发展阶段,发电机的单机容量不断增大,大型发电机在电力生产中处于绝对主力地位。同时,大型发电机由于造价昂贵,结构复杂,一旦遭受损坏,需要的检修期长,因此要求有极高的运行可靠性。一旦大型发电机发生故障,特别是恶性故障,直接威胁整个电力系统的安全和可靠供电,给电力系统和社会经济带来巨大的经济损失,并造成恶劣的社会影响。

由于制造过程中的加工工艺不良和运行中各类机电耦合作用的影响,大型汽轮发电机转子经常出现转子匝间短路,热弯曲,碰摩,轴承轴向振动,轴承动态刚度恶化,发电机转子不平衡等故障,对发电机的正常安全运行造成极大危害。运行中的大型发电机转子由于处于高速旋转状态,承受着很大的机械应力和热负荷,同时还受到巨大的电磁力作用,所以对转子部分的故障检测就显得尤为重要。随着科学技术的发展,故障诊断技术已逐步发展成为保证发电设备安全可靠运行的重要手段之一,因而成为研究的热点问题。

30多年来,故障诊断技术不断吸收其他科学技术发展的新成果,诊断理论与应用有了很大的发展和进步,涉及系统论、控制论、信息论、检测与估计理论、计算机科学等多方面的内容,成为集数学、物理、力学、化学、电子技术、信息处理、人工智能等基础学科以及各相关专业学科于一体的新兴交叉学科。故障诊断技术研究的主要内容包括以下四个方面:故障机理、故障信息处理技术、故障源分离与定位技术、人工智能技术的应用研究。故障机理的研究,是以可靠性和故障物理为理论基础,研究故障的物理学或数学模型,进行物理模拟或计算机仿真,其目的是了解故障的形成和发展过程,明确故障的动态学特征,从而进一步掌握典型的故障信号,提取故障征兆,建立故障样板模式。故障机理的研究是故

故障诊断的基础,是获得准确、可靠的诊断结果的重要保证。故障信息处理技术是故障诊断的前提,它在提高诊断的准确性和可靠性方面处于非常重要的地位。

常规的故障信息处理技术包括故障信号检测和故障信号分析处理两个部分。信号检测通常是指振动、噪声、温度、压力、电流、电压等信号中的一种或几种,需要各类传感器对信号进行测量;故障信号分析处理是对检测到的各种状态信息进行加工、变换,以提取故障征兆。

过去发电机转子故障诊断通常是通过两个不同的路径单独进行,这与传统的专业设置有很大关系:一条路径是从机械的角度,主要通过振动测试分析,判断转子存在的机械故障;另一条路径是从电气角度,通过相关的电气试验和分析故障发生时的电气参数变化,判断转子存在的电气故障。对于转子而言,其故障的表征是多方面的,既有电气特征,也有振动等机械特征,但由于振动测试人员缺乏电气方面的经验,而电气人员又对振动知识缺乏全面了解,导致在故障诊断的准确率和分析效率都大打折扣。

进入 20 世纪 90 年代后,发电设备向着高容量、高可靠性、大型化的趋势发展,使得在对这些复杂设备进行工况监测与故障诊断,实现按需维修、状态维修的工作中,出现了高概率的故障辨识“瓶颈”。其根本原因在于在实际设备监测与故障诊断过程中,往往只是对设备运行状态信息中的某一种信息进行观测和分析,从中提取有关设备运行状态的征兆信息,如仅仅通过振动信号分析振动原因。虽然这种方法有时可以判断出转子的部分故障,比如纯粹由于机械原因导致的不平衡故障,但在许多情况下得出的诊断结果并不可靠。从诊断角度来看,任何一种诊断信息都是模糊的、不确定的。任何一类诊断对象,单用一方面信息来反映其状态行为都是不完整的。特别是发电机的故障,很多情况下是机械和电气综合作用的结果。因此,在实际诊断过程中,只有从多方面获得关于诊断对象的多维信息,才能对设备进行更可靠、更准确的诊断。随着所获取诊断信息的增多,非常有必要引入和研究适用于故障诊断领域的信息融合技术,来充分挖掘信息的内涵,并对多诊断信息进行有效地融合利用,从而提高故障诊断的准确性、有效性和可靠性。近十多年来迅速发展起来的多源信息融合技术,是研究对多源不确定性信息进行综合处理的理论、方法和技术的一门综合性横向学科。信息融合技术的发展和应用,为故障诊断技术注入了新的活力,使基于多传感器或多方法综合的故障诊断技术具备了系统化的理论基础和智能化的实现手段。信息融合技术的应用,将从本质上改变故障诊断技术,使智能信息处理过程成为故障诊断的核心。

汽轮发电机作为一个机电联合的整体,机械与电气相互耦合。当转子绕组发

生如匝间短路故障时,除了会引起一些电气特征外,还会引起发电机转子振动的变化。综合研究发电机转子的电气特征和振动特征,将为此类故障机理研究开辟新的思路,而且为故障诊断提供更加全面的征兆,提高监测数据分析和联合故障诊断的灵敏度和精确度,同时提高故障诊断与处理的效率,从安全性和经济性两个方面为发电企业的发展作出贡献。

1.2 故障现状

广东省内投运的多台大型机组,在调试期间就暴露出发电机转子存在各种各样的问题,同时一些投运多年的小机组的发电机转子也逐步出现振动问题,归纳起来有以下几个方面:

- (1) 600MW 机组集电环小轴的轴振严重超标。
- (2) 发电机前瓦振动都存在不断爬升的现象。
- (3) 发电机振动随负荷变化大。
- (4) 多台 600MW 汽轮发电机以及 F 级燃机发电机发生了匝间短路故障。
- (5) 125MW 机组发电机轴振在并网后出现的大量虚假信号,严重影响了测量的真实性,阻碍了振动保护系统的正常投运。
- (6) 125MW 机组发电机后瓦轴向振动。
- (7) 选择合适的加重面及加重方式较困难。

发电机转子作为一个机电联合的整体,在转子线圈上施加励磁电流形成磁场,通过与汽轮机或燃机相连接获取动力从而驱动发电机转子在定子中旋转,做切割磁感线的运动,产生感应电动势,通过接线端子引出,达到能量转换的目的。因此,发电机转子的故障往往是机械与电气相互耦合的结果,在故障特征上除了会引起电气特征外,还会引起发电机转子振动的变化。作者通过信息融合技术,综合研究发电机转子电气特征和振动特征,为发电机转子故障机理研究开辟新的思路,而且为发电机现场转子故障诊断提供更加全面的征兆,提高发电机转子故障诊断的精确度与处理效率。

1.3 主要内容

- (1) 本书对信息集成与融合技术进行了系统的总结,为发电机转子故障诊断的具体实施提供指导思路。

(2) 由于发电机转子的工作特性和电涡流传感器的工作原理, 决定了采用电涡流传感器测量发电机的转轴相对振动时, 较测量汽轮机更容易受到干扰。从轴振动的测量原理分析干扰信号的来源, 并将干扰信号源分为测量面缺陷、电磁干扰、传感器安装不当三大类, 通过振动信号、运行中电气参数的综合分析来进行有效的识别。提出将两个方向传感器所获得的振动信号在频域中进行信息融合, 通过观察各频率分量下的轴心轨迹规律, 提供了一种识别干扰信号的有效方法。

(3) 当发电机转子内部存在匝间短路故障时, 其异常振动的幅值与励磁电流 I_f 之间存在着正相关性的关系。也就是说, 只要转子内部存在着匝间短路故障, 那么转子的轴振值就会随着励磁电流的变化而变化。因此, 当检测到转子的轴振值与励磁电流之间存在着明显的随动性或正相关性时, 就可以断定转子内部存在着匝间短路故障。

(4) 以前对于转子匝间短路故障的诊断, 往往仅限于定性地判断转子是否存在匝间短路故障即可, 然后就是返厂解体后进行处理, 而不像现在这样还要进一步对匝短故障点的具体部位进行定位分析。匝间短路故障发生在转子的不同部位, 其处理方案和处理成本就可能会有很大的差异。如果能事先确定故障点的部位, 就可以使电厂科学合理地、有针对性地制订后续的工作方案。作者提出了一种新的故障点定位方法: ① 两极电压平衡试验, 确定故障点位于哪一个磁极; ② 进行绕组交流电压分布试验, 确定匝间短路故障点处于哪个线圈上; ③ 进行绕组匝间直流电压分布试验, 确定匝间短路故障点位于哪两匝之间; ④ 根据电压的分布情况, 计算匝短故障点的精确位置。

(5) 取代传统的“摩擦力”, 用新的“摩擦能量”来表征碰摩故障, 符合发电机油挡、密封瓦碰摩的故障特点。实践证明“摩擦能量”原理分析摩擦故障, 比“摩擦力”分析方法更灵敏、更直接、更准确, 更便于早期发现摩擦故障。

(6) 对发电机轴向振动的机理进行了理论建模, 并对现场常见的轴向振动产生原因和处理策略进行了总结。

(7) 间隙电压作为电涡流传感器输出的一个关键振动特征, 长期没有得到应有重视。本书重点介绍了间隙电压的提取方法、间隙电压的诊断特征, 通过一台 600MW 发电机下部支撑垫铁松动导致轴瓦下沉的故障, 充分说明了间隙电压在发电机机械故障诊断中的作用。

(8) 在氢冷发电机转子平衡调整时, 如果能在跨外加重, 而不进行氢置换, 将节省大量的平衡处理时间, 同时不用打开端盖, 其密封圈也不需要重新更换, 材料消耗和人工费用都将减少。本书提出了一种在发电机跨外单面平衡法方法, 以及平衡成功的判断准则。

发电机转子故障诊断的机电信息融合框架

通过信息的集成与融合,可以使多个单维信息集成或融合成一个多维信息,从而使得信息的特征更为突出、明显地表露出来,而且各个单维信息之间的联系和相互关系也可以得到充分的体现。发电机转子的故障诊断过程可看作是信息传感和处理的过程。在发电机转子故障诊断的信息融合过程中,提出一个较为有效的信息融合框架是非常重要的。因为信息融合框架不仅能够从整体上反映信息融合的一般思路 and 实现过程,而且能为具体的诊断实施提供指导。如果在诊断过程中充分利用信息集成与融合的原理,有效地将振动类机械信号和电气信号加以集成与综合,更深入地理解和把握发电机转子故障特征,就可以提高发电机转子故障诊断的效率和精度。

2.1 信息集成与融合

信息传感和处理是指把由传感器获得的原始数据转换为有用的信息。它是一门涉及信息论、决策论和控制论的交叉学科。随着计算机技术和通信技术的发展,信息传感和处理得到了快速的发展和广泛的应用。

一个信息传感和处理系统可能包括许多空间分布或时间分布的传感器,它们也被称为分布传感器网络。信息传感和处理系统可分为以下四个层次:信息采集、信号预处理、集成以及分析和决策。原始的物理量经过传感器的采集变为传感器数据,这些原始数据经过数据预处理,归一化为可以用于信息集成与融合的形式,融合后的结果送入决策层进行决策分析,最后得出最终的决策。

传感器的测量值一般是一个时间或空间的函数,由于测量条件、测量位置、工作环境和其他因素的影响,多个传感器所获得的可能有以下四种关系测量值:冗余数据(相互竞争的数据)、互补数据(交迭的局部数据)、合作数据(不交迭

的局部数据)、独立数据(不相关的数据)。恰当地组合这些传感器的测量值,以减小不确定性及提高可靠性和容错性是传感器信息集成和融合的任务。

2.1.1 信息集成与融合的类型

一个传感器信息处理系统存在以下四种可能的传感器组合情况:

(1) 单个传感器。这是最简单的一种情况,系统无需集成与融合。

(2) 重复的传感器。为了提高系统的容错性,防止由于传感器的失效引起系统的瘫痪,往往采用重复的传感器来增进系统的可靠性。

(3) 不同种类的传感器。在一个系统里,往往同时安装有不同种类的多个传感器,这些传感器的优缺点互相补偿。例如,一个智能故障诊断系统往往同时接收振动、温度、压力、功率等传感器信号。

(4) 空间分布的传感器。在某些情况下,需要同时从多个观测点或角度来观察或检测一个目标,这时,传感器往往是空间分布的。而且,这些传感器既可以是重复的同类型传感器,也可以是不同类型的。在本书讨论的大型发电机转子,往往安装的是空间分布的同类型传感器,如每个轴承附近的测量面均安装有两个相互垂直的非接触相对轴振动传感器,同时在轴承座或轴承箱上安装有速度传感器,在发电机内部还安装有气隙磁场探测线圈等。

(5) 根据不同的传感器组合类型以及不同的测量数据,存在多种信息集成和融合的方法:竞争集成、互补集成、合作集成、独立集成、时间集成、空间集成。

2.1.2 信息集成与融合的层次

从信息融合的层次上看,信息融合有以下三个层次:

(1) 数据层融合。数据层融合是对原始的传感器数据联合后直接融合,然后从融合结果中提取特征向量,最后通过提取的特征向量进行决策。在数据层融合过程中,传感器的数据应具有均质性,也就是说传感器一般应是同类型的,对不同类型的传感器需要在特征层上进行融合。将转子振动信号和有功、无功、励磁电流等电气信号进行综合分析就是一种数据层融合。

(2) 特征层融合。特征层融合首先对每个传感器提供的数据进行特征提取,然后通过联合后送入特征层融合中心进行融合,最后根据融合结果进行决策,如图2-1所示。特征层融合一般发生在数据层融合之后,是对不同类型的传感器进行融合,将每类传感器产生的特征向量综合成一个特征向量,然后利用这个特征向量进行下一步的决策。图2-1所示的仅是一种较简单的形式,送入特征层融合处理中心的特征也可能是来自数据层融合之后产生的特征,从这个意义上看,特

征层融合比数据层融合更高级。

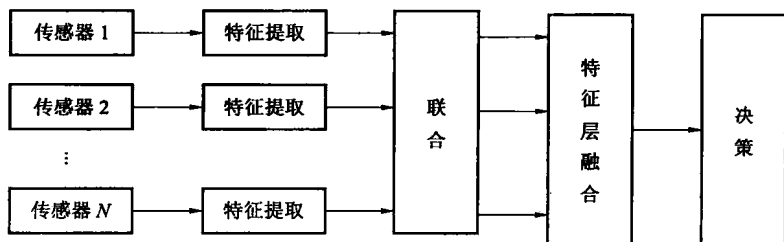


图 2-1 特征层融合

(3) 决策层融合。决策层融合首先对每个传感器分别进行特征提取和决策，然后将各个决策结果联合后送入决策层融合中心进行融合，最后根据融合结果给出决策。决策层融合首先要对每类传感器进行特征提取和决策，然后才进行融合，因而一般发生在数据层融合和特征层融合之后。在决策层融合是高层次的信息融合，在判断发电机转子故障时，常需要进行决策层融合。

2.1.3 信息集成与融合的优点

多个传感器信息集成与融合系统可以得到单个传感器所不能得到的信息，它能够有效地利用传感器资源，从而可以最大限度地获得有关被测对象和状态的信息量。多传感器信息集成与融合系统与普通的传感器信息处理系统相比，具有更为复杂的形式，而且可以在不同的信息层次上出现。与单一传感器系统相比，其优点可综合如下：

- (1) 提高了信息的可信度。
- (2) 增强了系统的稳定性。
- (3) 能够提供更广的空间覆盖范围。
- (4) 能够提供更广的时间覆盖范围。
- (5) 减少了目标或事件的不确定性，降低了测量信息的模糊度。
- (6) 减少了信息获取的代价和时间。

总的说来，多传感器信息集成与融合系统的优势主要体现在容错性、互补性、实时性和经济性。

2.2 发电机转子典型振动故障

本节简单介绍了一些发电机转子的常见故障，如转子匝间短路、转子偏心、

转子不对称冷却、励磁绕组与转子本体和护环的不对称摩擦等。有些故障是电磁力引起的原因，有些是转子本体不对称的加热或冷却引起的转子热弯曲。

2.2.1 电磁引起的振动

2.2.1.1 转子绕组匝间短路故障

转子绕组匝间短路故障是发电机运行中比较常见的故障，也是影响安全运行的主要原因之一。轻微的转子绕组匝间短路故障对机组正常运行的影响不大，并且故障特征不明显，运行中此类故障经常被忽略。但是匝间短路长期运行下去，可能会导致转子线圈一点甚至两点接地故障，引起大轴烧损、转子剧烈振动和转子本体的严重磁化。转子绕组匝间短路后，电机中便会出现气隙磁通波形的畸变，并在定子两条并联支路间产生高次谐波环流，增加线圈的发热，影响发电机的无功出力，从而引起机组振动等机械故障，最终出现轴电压升高，灼烧转子护环，发生机座及大轴磁化并进而烧伤轴瓦和大轴的严重后果。因此准确诊断转子绕组匝间短路故障并采取相应的处理措施具有重要的意义。

转子绕组匝间短路故障中，相当一部分是因为发电机运行一段时间后转子绕组热变形或者运行温度过高导致匝间绝缘被破坏引起的。正常情况下，转子绕组在绕组槽内是对称分布的，因此励磁电流产生的磁通密度以及对应磁极的电磁力也是均匀对称分布的。电磁力 F 和气隙中的磁通密度 B 的关系为

$$F = \frac{B^2}{2S} \times 9.81 \times 10^{-14} \quad (2-1)$$

式中 F ——电磁力，N；

B ——气隙中的磁通密度，T；

S ——发电机转子的表面积， cm^2 。

如果转子绕组某处出现匝间短路，则该处的磁通密度就会减小。由于电磁力与磁通密度的平方成正比，故在励磁电流一定时，短路的匝数越多，电磁力减小得越多。设在正常位置处的磁拉力为 F ，在有匝间短路的位置处的磁拉力为 F' ，则由匝间短路引起的不平衡力为 $\Delta F = F - F'$ 。短路的匝数越多，这种不平衡磁拉力就越大，由此引起转子产生异常。

只有当发电机通有励磁电流带负荷并网的时候才会产生该类振动，且随着励磁电流的增加而增加。在机组解列的瞬间，转子振动又可以恢复到并网前的水平。在做电气试验的时候，可以使用微分探测线圈的办法来判断转子绕组是否存在匝间短路故障，以及判断短路点的位置。现场一般采用高速动平衡的办法来减小该

类故障引起的振动,使机组能够坚持顺利运行到下次周期性大修的时候再处理。在周期性停运检修的时候,务必加强对该类故障的检测,一旦发现必须彻底处理。

转子绕组发生匝间短路故障的原因很多,主要是由转子绕组匝间的绝缘失效造成的。匝间短路故障主要出现在较长时间运行的机组上,因为绕组发生匝间短路故障随机组运行时间的增加而逐步发生,并日趋严重。当绝缘垫条损坏造成转子绕组匝间短路后,会使绕组间的阻抗降低,在该处产生局部过热点,在长期运行下,局部过热又会进一步引起绝缘损坏,导致更为严重的匝间短路。另外由匝间短路引发的局部过热还会使转子发生热弯曲,最后也产生异常振动,只不过这种异常有时间滞后,即当绕组通入励磁电流一段时间后会才会发生热弯曲。

随着国内外对转子绕组匝间短路故障的研究,目前探测转子绕组匝间短路的新方法主要有气隙线圈探测法、交流阻抗和功率损耗法,以及利用励磁电流与无功功率的变化关系等,其中气隙线圈探测法近十多年来在国内外获得了很广泛的应用。如何从将上述方法综合应用并结合振动特征,进而准确诊断匝间短路故障是目前的研究重点。

2.2.1.2 电磁信号对振动测量的干扰

电涡流传感器是发电机组常用的非接触式测量相对振动的传感器,如Bently3300系列、Epro PR642 * 系列等。电涡流传感器采用的是感应电涡流原理。当带有高频电流的线圈靠近被测金属时,线圈上的高频电流所产生的高频电磁场便在金属表面上产生感应电流,电磁学上称之为电涡流。电涡流效应与被测金属间的距离及电导率、磁导率、几何尺寸、电流频率等参数有关。通过电路可将被测金属相对于传感器探头之间距离的变化转化为电压变化,据此就可对金属物体的位移、振动等参数进行测量。

由于发电机的工作特性和电涡流传感器的工作原理,决定了采用电涡流传感器测量发电机的转轴相对振动时,较测量汽轮机更容易受到干扰,并经常在发电机振动测量中发生,有可能因此造成发电机转子振动大而跳机。因此有必要对该类振动干扰信号加以有效分析和识别,防止机组振动误动作而跳机。只有有效识别干扰信号,才能在后续的分析诊断中准确判断发电机转子的故障。

2.2.1.3 气隙不均匀故障

在已公开发表的资料当中,气隙不均匀故障的文献是最多的,这是由于电动机的气隙很小,气隙偏心对电动机性能的影响十分明显,且气隙偏心的状况在电动机中较为常见。气隙不均匀故障又称为气隙偏心故障或转子偏心故障。在理论上,希望发电机正常运行时,定子磁力中心线与转子的转动轴线完全重合,