

Safety Analysis and Application on
Torsional Vibration of Turbo-Generator Set

汽轮发电机组 扭振安全性分析与应用

顾煜炯 著



科学出版社

汽轮发电机组扭振安全性 分析与应用

Safety Analysis and Application on Torsional
Vibration of Turbo-Generator Set

顾煜炯 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了机电网耦合作用下汽轮发电机组轴系扭振的基本理论和技术体系,对扭振的产生机理、扭振分析与安全性评价方法、扭振监测与保护等问题进行了细致的论述。本书主要内容包括:汽轮发电机组扭振问题概述、轴系扭振固有特性计算、轴系扭振动态响应计算、轴系扭振安全性分析、电力系统次同步振荡、轴系扭振监测与保护。本书较系统地汇集了汽轮发电机组扭振的基本理论与分析方法,论述循序渐进,给出了很多案例,有利于读者理解并能将书中的分析方法应用于工程实践。

本书可供电力系统相关工程技术和科学研究人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮发电机组扭振安全性分析与应用 = Safety Analysis and Application on Torsional Vibration of Turbo-Generator Set / 顾煜炯著. —北京:科学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-03-036879-9

I. ①汽… II. ①顾… III. ①汽车发电机组-扭转振动-安全性-研究
IV. ①TM311.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040580 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:韩 杨
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 2 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 232 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

扭转振动简称扭振,是旋转机械中普遍存在的一种特殊形式的机械振动,它本质上是由于转子并非绝对刚体而存在弹性,在以平均速度旋转的过程中,各弹性部件间会因各种原因产生不同大小、不同相位的瞬时速度起伏,形成沿旋转方向的来回扭动。这种振动形式将引起材料内部的切向交变扭应力,若扭动幅度过大,剪切应力超过弹性限度,材料就会产生疲劳积累,当累积疲劳寿命损耗达到一定程度时,材料就会开始出现裂纹,而裂纹逐渐发展,终将导致材料断裂的恶性事故,这对一些重要的设备(如大型汽轮发电机组、大型船舶、机车、大型轧钢设备等)所产生的破坏后果和损失是不堪设想、无法估计的。扭振具有普遍性、潜伏性、事故的突发性、事故的严重性等特点。

从根本上来说,机电网耦合作用下汽轮发电机组轴系扭振产生的主要原因有两个,一是系统的同步力矩不足,即机械力矩与电磁力矩不平衡;二是系统的阻尼不足,即机械阻尼与电气阻尼之和小于零。瞬时性对称与不对称短路、自动重合闸、非同期并网、甩负荷、瞬间快控汽门及线路开关切合操作等突发性机电扰动,都将有可能产生短时间性冲击扭矩,形成短时间冲击性轴系扭振;输电系统的串联电容补偿、直流输电、加装不当的电力系统稳定器以及发电机的励磁系统、可控硅控制系统和电液调节系统的反馈作用等,均有可能诱发系统的次同步振荡和轴系扭振。

1970年和1971年美国莫哈维电站连续两次因汽轮发电机组轴系扭振造成大轴断裂,这一典型扭振事故引起了国际学术界和电力工程界的高度关注,从此掀起了大机组轴系扭振研究的热潮。通过几十年的努力,迄今一些带有普遍性的扭振问题已基本解决,但由于这一课题涉及电力系统、电机、汽轮机、自动控制、力学、材料、通信、计算机等多个专业学科,研究起来比较困难,机电网耦合因素众多,因此仍有许多问题有待深入研究。目前,大机组轴系扭振的研究重点已转向符合实际情况的轴系疲劳寿命损耗的准确确定、在线监测装置性能的进一步改进、利用控制与调节手段抑制和消除轴系扭振以及轴系扭振标准的制定等。

随着我国经济的迅猛发展,社会各行业对电力的需求量日益增长。为满足需要,一批矿口电厂及能源基地相继建立,串联电容补偿装置和高压直流输电等电力电子设备广泛投入使用,使我国电力系统结构日趋复杂;另外,为提高机组效

率,大功率超临界、超超临界机组不断投入运营,600MW 及以上的机组成为电网的主力机组,机组的蒸汽参数不断提高,轴系结构越来越复杂,轻质、柔性、多支承、大跨距、高功率密度的特征更加明显。这些因素都极大地增加了汽轮发电机组发生扭振特别是发生次同步振荡的危险。因此,次同步振荡和轴系扭振的有关理论和技术研究已经成为近年来的热门课题。

对扭振问题进行详细研究,研究扭振故障模型的建立、响应求解方法、轴系稳定性分析和监测与保护策略的制定,可以进一步完善扭振基础理论和分析方法;积极探寻有效的扭振故障预防和诊断方法,从而掌握汽轮发电机组轴系扭振可监测特征与故障工况的变化规律,并将扭振可监测特征作为汽轮发电机组运行状态评价的重要指标,综合利用汽轮发电机组的其他在线和离线监测诊断数据、运行实时数据、可靠性评价数据、维修历史数据等多种信息综合评价其运行状态,可以为汽轮发电机组轴系的运行状态预测和维修决策提供科学依据;研究在扭振发生的情况下电力系统中机、电、磁耦合扰动的传播,对各类扭振故障进行风险评估、制定机组扭振的监测、保护、预防与控制策略,是保证电力系统安全稳定运行最直接的手段,对于我国电力系统灾变防治、避免出现电力设备严重损毁的重大事故和安全稳定运行具有重大理论意义和工程应用价值。

本书作者在国家自然科学基金项目(51075145)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0769)的资助下,结合课题组多年来从事汽轮发电机组轴系扭振理论研究和工程应用的经验,组织撰写了这部专著。本书内容全面,详细介绍了扭振相关基础理论和方法,在扭振模型的建立、扭振固有特性计算、扭振动态响应计算、扭振安全性分析、扭振监测与保护策略等多个方面进行了深入讨论,并提出了很多原创性方法。本书的理论与方法循序渐进,重点突出,便于自学,并注重联系实际提出问题,给出了很多扭振分析实例,利于读者将书中的分析方法应用于工程实践。

本书可供电力系统相关工程技术和科学研究人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的参考书。书中所提出的方法均切实可行,并且已在工程实践中得到验证。在本书介绍的理论与方法的基础上,作者及其研究团队开发了机组扭振及弯扭耦合振动的在线监测与分析装置,已在多家电力企业得到推广应用,对机组振动故障起到了良好的监测和分析效果。

本书主要内容是作者及其研究团队的研究成果,尤其是凝聚了历届研究生在该领域的创造性工作。金铁铮、陈东超、徐婧、戴佳栩、俎海东、王宏伟等为本书的撰写做了很多富有创造性的工作,其中金铁铮和陈东超对全书进行了审阅,何成兵也对部分书稿进行了审阅,感谢他们为此付出的辛勤劳动。

特别感谢杨昆教授,是他最早鼓励作者完成本书,并提出了卓有成效的建议。

感谢所有本书所引用文献的作者及为本书提供资料的个人和单位, 特别感谢本书所引用的各种案例的原作者。

感谢所有关注本书和支持作者的各界朋友。

作者学识有限, 书中不足之处在所难免, 恳请广大读者和学术同行不吝赐教。

顾煜炯

2012 年 12 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 汽轮发电机组扭振问题概述	1
1.1.1 扭转振动现象	1
1.1.2 机电系统扰动类型及轴系扭振基本形式	2
1.1.3 扭振研究的意义	4
1.2 汽轮发电机组扭振研究进展	5
1.2.1 扭振模型	6
1.2.2 扭振的仿真计算	7
1.2.3 扭振的测试与监测	7
1.2.4 预防和抑制机组轴系扭振的措施和对策	10
1.3 本书内容安排	16
参考文献	17
第 2 章 轴系扭振固有特性计算	19
2.1 连续质量扭振模型	19
2.1.1 连续质量系统的振动分析	19
2.1.2 轴系的连续质量扭振模型模化方法	20
2.1.3 基于连续质量模型的扭振固有特性分析方法	22
2.2 集中质量扭振模型	28
2.2.1 多自由度系统的振动分析	28
2.2.2 轴系的集中质量扭振模型模化方法	32
2.2.3 基于集中质量模型的扭振固有特性分析方法	33
2.3 轴系扭振固有特性分析实例	36
2.4 小结	37
参考文献	37
第 3 章 轴系扭振动态响应计算	38
3.1 多自由度扭振系统的振动响应	38

3.1.1	多自由度扭振系统的自由振动	38
3.1.2	多自由度扭振系统的强迫振动	43
3.2	汽轮发电机组轴系扭振动态响应计算方法	46
3.2.1	汽轮机蒸汽力矩计算	46
3.2.2	发电机电磁力矩计算	47
3.2.3	轴系扭振动态响应计算	49
3.3	小结	53
	参考文献	53
第4章	轴系扭振安全性分析	55
4.1	轴系扭振危险截面应力分析	55
4.1.1	轴系扭振危险截面的确定	55
4.1.2	扭振危险截面应力计算	57
4.2	转子钢材料扭转疲劳特性计算	67
4.2.1	转子钢材料 S-N 曲线估算	67
4.2.2	疲劳影响因素	70
4.3	轴系扭振寿命损耗计算	73
4.3.1	扭振疲劳破坏的特性	74
4.3.2	局部应力应变法计算疲劳寿命	74
4.3.3	疲劳累积损伤理论	85
4.3.4	扭振疲劳寿命损耗分析模型	87
4.4	机网扰动下汽轮发电机组轴系扭振的评估	89
4.4.1	机网大扰动下轴系扭振的评估指标	89
4.4.2	大扰动对轴系扭振影响的评估标准	91
4.4.3	长期低幅振荡的评估	93
4.5	小结	93
	参考文献	94
第5章	电力系统次同步振荡	95
5.1	电力系统次同步振荡问题概述	95
5.1.1	次同步振荡定义及分类	95
5.1.2	次同步振荡产生机理	97
5.2	次同步振荡分析用数学模型	100
5.2.1	Park 变换和 Clarke 变换	100

5.2.2	同步发电机数学模型	101
5.2.3	励磁系统数学模型	108
5.2.4	汽轮发电机组轴系数学模型	110
5.2.5	汽轮机及其调速系统数学模型	112
5.2.6	交流电力网络数学模型	113
5.2.7	故障/操作模型	117
5.2.8	机网接口模型	119
5.2.9	高压直流输电系统的数学模型	121
5.3	次同步振荡的主要分析方法	124
5.3.1	频率扫描法	125
5.3.2	机组作用系数法	126
5.3.3	时域仿真分析法	127
5.3.4	特征值分析法	130
5.3.5	复转矩系数法及测试信号法	130
5.4	Prony 算法在次同步振荡分析中的应用	131
5.4.1	Prony 算法描述	131
5.4.2	Prony 算法分析次同步振荡的实用化	132
5.4.3	算例	133
5.5	小结	136
	参考文献	136
第 6 章	轴系扭振监测、分析与保护	139
6.1	扭角监测方法	139
6.1.1	测速齿轮扭角测量	139
6.1.2	弯振干扰的消除	140
6.1.3	齿轮安装、加工误差的消除	142
6.2	轴系扭振实时应力分析方法	142
6.2.1	瞬态冲击类故障下轴系应力分析方法	142
6.2.2	次同步振荡故障下轴系应力分析方法	145
6.3	轴系扭振发展趋势分析	152
6.4	轴系扭振监测与保护策略	154
6.4.1	电磁力矩瞬态冲击类扭振的监测与保护方法	155
6.4.2	共振类扭振的监测与保护方法	156

6.4.3 轴系扭振报警与保护逻辑	157
6.4.4 扭振监测、分析与保护装置	162
6.5 小结	165
参考文献	166
第7章 实例分析	167
7.1 机组概况	167
7.2 轴系扭振固有特性分析	167
7.3 转子钢材料 S-N 曲线计算	170
7.4 轴系扭振危险截面的确定	171
7.5 应力集中系数计算	173
7.6 扭振仿真与安全性评价	174
附录	180

第 1 章 绪 论

1.1 汽轮发电机组扭振问题概述

1.1.1 扭转振动现象

扭转振动是旋转机械中普遍存在的一种特殊形式的机械振动,它本质上是由于转子并非绝对刚体而存在弹性,在以平均速度的旋转过程中,各弹性部件间会因各种原因而产生不同大小、不同相位的瞬时速度起伏,形成沿旋转方向的来回扭动(形象地说,就像来回扭“麻花”)。显然,这种振动形式将引起材料内部的切向交变扭应力。若扭动幅度过大,剪切应力超过弹性限度,材料就会产生疲劳积累;当累积疲劳寿命损耗达到一定程度时,材料就会开始出现裂纹,而裂纹逐渐发展,终将导致材料断裂的恶性事故,这对一些重要的设备(如大型汽轮发电机组、大型船舶、机车、大型轧钢设备等)所产生的后果和损失是不堪设想、无法估计的。

总的说来,“扭转振动”这种特殊的振动现象具有如下特点:

(1)普遍性。凡是较大型、结构复杂的旋转机械转子都或多或少、或强或弱、或持续或短暂地发生扭转振动。这可能是由于机械也可能是由于电气方面的原因引起,如可能来源于动力或来源于负载方面的任何不稳定过程;也可能是由交变的激励力矩引起的强迫振动或由于阶跃或脉冲激励引起的自由振动。它不像一般的弯曲振动,只要从机械方面着手,找到了其不平衡、不对称等缺陷,振动往往就可消除。

(2)潜伏性。旋转机械转子的扭转振动大多是由于各种干扰引起的短暂过程,当然也有持续作用的干扰引起的持续性强迫振动,如汽轮发电机组的次同步振荡以及由于三相负荷不平衡形成的负序电流引起的二倍电网频率的扭转振动等,如果没有专门的扭转振动监测仪一般是无法发现的,造成的“暗伤”也难以觉察出来。此外,扭转振动往往会引发其他形式的振动,这就更会掩盖其存在,从而引起误判。

(3)事故的突发性。只要扭转振动造成的疲劳积累一次又一次地加强,形成裂纹、切口,并逐渐扩展,最终会造成转子的断裂和崩溃,而在此之前可能毫无征候,或不易被觉察。

(4)事故的严重性。扭转振动事故爆发后,其后果往往都是毁灭性的恶性事故,造成的损失极为惨重。

由于扭转振动危害的潜伏性,有时它还会和其他故障混淆在一起。因此,尽管它相当普遍地存在,但仍被许多人忽视,或人们对它难以觉察、不理解、不承认,即使已经造成了破坏,人们也很难弄清机械在长期的运行过程中究竟是否产生了扭转振动,以及它如何积累起来的,这也是扭转振动的各项研究成果难以被理解和推广的重要原因。另一方面,随着生产特别是高速、强载、大功率旋转机械的发展,新的问题(例如对称分支系中的偏振等)仍不断出现,新的研究领域(如非线性扭转振动、扭转与轴向的耦合振动等)也不断扩展。因此,扭转振动的研究仍然值得重视。

1.1.2 机电系统扰动类型及轴系扭振基本形式

汽轮发电机组工作在稳定负荷时,轴系受到三种力矩作用:从锅炉来的新蒸汽和再热蒸汽通过对汽轮机叶轮做功所产生的力矩,发电机定子负荷对转子的电磁力矩,以及由于摩擦、蒸汽的黏性阻尼等产生的阻尼力矩。这三种力矩相互平衡时,尽管汽轮发电机组轴系也处于一定的扭转变形状态,但此扭转角是传递扭矩所产生的结果,是一个稳定的常量。当机组发生机电扰动时,力矩平衡被破坏,轴系会发生扭振。从汽轮发电机组轴系的外施激励来看,引起轴系扭振的原因来自两方面,即由同步发电机引入的电气扰动和汽轮机引入的机械扰动。电气扰动包括电气短路故障、自动重合闸、非同期并网、甩负荷及串联电容补偿、高压直流输电的调节环节和电力系统稳定器等不适当的配置等;机械方面的扰动相对较少,如不适当的进汽方式、调速系统晃动、快控汽门等。不同类型的机电系统扰动对机组轴系的扭振有着不同的影响,通常将机电系统扰动下的轴系扭振分成三种基本形式:次同步共振、超同步共振和振荡扭矩冲击性扭振^[1,2]。

1. 次同步共振

次同步共振也称亚同步共振,是机电系统的一种自激振荡状态,即电网在低于系统同步的一个或几个频率下与汽轮发电机进行能量交换。设电网的电气振荡频率为 f_e ,电网的同步频率为 f_n ,轴系机械系统的某阶扭振固有频率为 f_m ;若 $f_m = f_n - f_e$,则电气系统将出现负阻尼的振荡状态,轴系频率 f_m 所对应的主振型的振幅将逐渐放大,最终使转子损伤,甚至造成毁机的恶性事故。因其振荡频率低于系统的同步频率,故称之为次同步共振或亚同步共振。

输电系统的串联电容补偿、直流输电、加装不当的电力系统稳定器以及发电机的励磁系统、可控硅控制系统和电液调节系统的反馈作用等,均有可能诱发次

同步机电共振。由于汽轮机和发电机转子的惯性较大,对轴系本身的低阶扭振模态十分敏感,呈低周应力的受力状态,因此这种机电共振直接威胁着机组的安全可靠运行。

2. 超同步共振

在电网三相负荷不平衡、各种不对称短路等情况下,发电机定子绕组中除存在正序电流外,还会出现负序电流。负序电流在发电机气隙中将产生转速为 f_n 的旋转磁场(负序旋转磁场),但因其转向与转子旋转磁场(正序旋转磁场)相反,两旋转磁场之间存在相对运动,且相对速度为 $f_n - (-f_n) = 2f_n$,即两旋转磁场的相互作用将产生频率为 $2f_n$ 的交变扭矩并作用到机组轴系上;如果这个频率同机组轴系的某一阶固有频率相等或接近,就会激发起机电共振。由于这种共振频率大于同步周波频率(一般为周波频率的两倍),因此称这种共振为超同步共振,亦称倍频机电共振。

除倍频机电共振外,还有可能产生所谓的工频或同步机电共振,这是因为在电厂出线附近发生短路、非同期并网以及切除故障时,就有可能在发电机定子电流中出现直流分量。由它产生的磁场(相对于定子静止不动)同转子励磁磁场相互作用,将产生频率为周波频率的扭矩并作用于机组轴系上;若轴系存在某一阶与周波频率相等或相近的固有扭振频率,就将产生工频机电共振。

理论分析与经验表明,汽轮机叶片和大型发电机的风扇叶片对倍频共振最为敏感,动叶片在这种共振状态下的最大交变应力要比正常的高出 5 倍多。这类事故的破坏过程一般是汽轮机叶片先断裂飞脱,由此在轴系上产生很大的不平衡力,以致事故扩大甚至造成毁机。

3. 振荡扭矩冲击性扭振

瞬时性对称与不对称短路、自动重合闸、非同期并网、甩负荷、瞬间快控汽门及线路开关切合操作等突发性机电扰动,将有可能产生短时间冲击性扭矩,形成短时间冲击性轴系扭振。这种扭振虽然时间不长,但在不利的配合条件下,仍有可能产生高到轴系无法承受的交变应力而造成一次性破坏,或者产生疲劳损耗积累。

发电厂母线通过输电线路同系统相连,当输电线路发生各种类型短路时,不论重合闸成功与否,都会不同程度地引起紧靠故障点的汽轮发电机组扭振并导致轴系疲劳。在切合时间和条件最不利的配合情况下,仅一次高速自动重合闸就有可能造成轴系严重损坏,即轴系扭转疲劳寿命损耗达 100%。

发电机近距离(包括发电机端部)两相或三相突然短路时,汽轮发电机组轴系

受冲击程度可能远超过发电机端部短路时轴系的扭振冲击。这是由于故障切除后电网电压突然恢复时,使发电机受到和短路故障情况相似的第二次扭矩冲击,并将使轴系在短路期内业已激发的扭振基础上,再产生一个新的扭振;当这两种扭振在最不利的条件下叠加时,就有可能产生使轴系无法接受的机械扭转剪切应力,导致联轴节螺栓甚至大轴损坏。

1.1.3 扭振研究的意义

随着电力工业的发展,一方面单机容量不断增大,功率密度相应增加,随之轴系长度加长和轴系截面相对下降,整个轴系不能再被视为一个转动刚体,而要被看成一个由多跨转子组成的弹性质量扭振系统;另一方面由于输电网络的大容量化、长距离化、系统结构复杂化、电力负荷的多样化以及新型输电技术的采用,对轴系的影响因素也日趋增多。由于这两方面的原因,容易导致机网耦合,诱发轴系扭振,并造成扭转疲劳损耗,其程度取决于机组轴系本身的扭振特性、机电扰动性质等因素,轻者可忽略不计,重者可使轴系损坏甚至酿成灾难性事故。

汽轮发电机组轴系扭振事故在国内外时有发生。1970年12月9日美国莫哈维电站的1台GE公司制造的790MW双轴机组,突然发生发电机与励磁机之间的发电机集流环处的主轴断裂;修复后不到一年,于1971年再次发生类似损坏。后经多方试验研究,发现是因为500kV线路用串补电容后,电网系统存在一个30.5Hz的电气频率,它与电网同步频率(60Hz)的滑差为29.5Hz,正好与机组轴系的第二阶扭振固有频率合拍,发生机电谐振。另外由于轴系第二阶扭转振型的最大应力位于发电机与励磁机之间的轴段上,与损坏位置一致,这种交变的振动最终使主轴疲劳损坏^[3]。1977年,美国的斯奎尔巴特发电厂在投入系统中新建成的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)线路时,发现该发电厂汽轮发电机组发生了严重的轴系扭振现象,即使将附近的串联补偿电容切除,轴系扭振的现象依然存在^[4]。1984年,我国神头电厂苏制三号机组在做完汽门快控试验后,发现高中压转子联轴器十二根螺栓断裂七根,其余五根全被打弯。1985年,我国大同电厂一台国产200MW机组在加负荷过程中发生低励失步,机组严重超速,至使大轴断裂成五段,大量汽轮机叶片折断并甩出汽缸。1988年,我国秦岭电厂一台200MW机组在发电机与电网脱离的情况下做汽轮机超速试验时,发生了大轴断裂成13段、大量轴系部件甩出的特大事故^[5]。1992年上海吴泾电厂1台300MW汽轮发电机组在发电机端发生两次短路事故,造成励磁机轴扭断。2008年,伊敏电厂3#机低发对轮发电机侧及发电机转子出现裂纹,该厂通过带串补的输电线路(伊敏—冯屯)送出,事故分析表明,该机在2007年10月曾发生主变两相短路故障,引起汽轮发电机组轴系扭振,并多次发生因线路串补电容引起的次同

步振荡(subsynchronous oscillation, SSO),最终导致出现转子裂纹的严重事故。2010年在呼伦贝尔—辽宁±500kV直流输电工程投运之后,国华宝日希勒电厂两台600MW机组加装了轴系扭振保护装置(torsional stress relay, TSR),经监测发现,该电厂频繁出现SSO问题,且常伴随系统电气阻尼较小的情况。

我国能源分布及负荷发展很不平衡,水利资源主要集中在西南数省,煤炭资源主要集中在山西、陕西和内蒙古西部,而负荷主要集中在东部沿海地区,因此寻求一种超远距离、超大容量的电力传输方式成为必然,在原有输电线路上加固定串联补偿装置以及采用HVDC技术,可在一定程度上解决远距离输电问题。我国已有多条串补输电线路和多个高压直流输电系统投入运行^[6-10],并且随着更多的大型发电基地外送通道投入建设,大量的电力远距离输送势必需要更多的交流串联补偿线路和直流输电线路投入运行,输电方式将呈现交直流混联的复杂模式,这将极大地增加发生SSO和轴系扭振的危险。

目前国内外对汽轮发电机组轴系振动故障的研究主要集中在弯振故障方面,而在扭振故障的产生机理研究方面则显得不足。对扭振问题进行详细研究,如研究扭振故障模型的建立、响应求解方法、轴系稳定性分析和监测、分析与保护策略的制定,可以进一步完善振动基础理论和分析方法;积极探寻有效的扭振故障预防和诊断方法,可以掌握汽轮发电机组轴系扭振可监测特征与故障工况的变化规律,并可将扭振可监测特征作为汽轮发电机组运行状态评价的重要指标,综合利用汽轮发电机组的其他在线和离线监测诊断数据、运行实时数据、可靠性评价数据、维修历史数据等多种信息综合评价其运行状态,可为汽轮发电机组轴系的运行状态预测和维修决策提供科学依据;研究在扭振发生的情况下电力系统中机、电、磁耦合扰动的传播,可以对各类扭振故障进行风险评估,制定机组扭振的监测、保护、预防与控制策略,是保证电力系统安全稳定运行最直接的手段,对于我国电力系统灾变防治,避免出现电力设备严重损毁的重大事故和安全稳定运行具有重大理论意义和工程应用价值。

1.2 汽轮发电机组扭振研究进展

大型汽轮发电机组扭振是当前大电网和大机组相互配合、作用与协调中出现的突出问题之一。直到20世纪70年代前期,美国及西欧一些国家率先开始这一问题的研究,并开始引起了人们的普遍重视。国内在这一领域的研究工作起始于80年代。目前,大机组轴系扭振问题已得到我国电力和机械制造部门的重视,并多次下达文件,召开有关会议,积极推动和支持大电网和大机组的相互作用与协调问题的研究。

客观上无法避免的各种机电扰动和非正常运行方式均可能导致轴系扭振,从而严重威胁机组的安全运行和使用寿命,这是轴系扭振研究在国外得到重视、并投入大量人力与物力进行理论与试验研究的主要原因。通过几十年的努力,迄今带有普遍性的大机组轴系扭振问题已基本解决,不少关键问题已相继突破。目前,大机组轴系扭振的研究重点已转向符合实际情况的轴系疲劳寿命损耗的准确确定、在线监测装置性能的进一步改进、利用控制与调节手段抑制和消除轴系扭振以及轴系扭振标准的制定等。

国内外对轴系扭振问题的研究主要有两方面:理论研究和现场实测。理论研究主要包括:系统模型的建立和仿真计算方法研究,汽轮发电机组轴系扭振特性和扭振响应研究,扭振疲劳寿命损耗的估计方法及材料疲劳特性的研究,扭振的非线性问题研究。现场实测主要包括:扭振特性的现场实测方法,轴系扭振信号分析及在线监测装置的研究,避免机电耦合的控制手段和运行措施的研究等。目前学者们对该领域的研究更加深入,开始转向扭振精确化建模、弯扭耦合、整个电力系统的机电耦合、扭振的非线性以及主动控制等方面的研究^[11]。

1.2.1 扭振模型

轴系扭振模型和分析方法是扭振研究的基础。汽轮发电机组轴系扭振现象的发生是机、电、网三部分相互作用的结果,扭振模型应包括机、电、网这三大部分的所有模型,可分为五个模块^[12]:①汽轮发电机组轴系(包括汽轮机转子、发电机和励磁机转子)模型;②汽轮机及其调速系统模型;③发电机及其励磁调节系统模型;④电力网络模型;⑤机网接口模型。其中,轴系模型与机网接口模型及算法是扭振模型的关键,其他三个模型已发展比较完备。

常用的轴系模型可分为两类:分布(连续)质量模型和集中质量模型。分布质量模型用偏微分方程形式表示,一般采用有限元法求解,计算结果精确,可以得到同一模型任意截面上的扭振参数,测出扭应力最大的危险截面位置,其模型简化更接近实际系统,但其缺点是计算过程复杂,速度较慢,不便与电磁暂态仿真程序联结。在实际应用中,分布质量模型需进行离散,降阶处理。集中质量模型有简单集中质量模型和多段集中质量模型两种。简单集中质量模型能较准确地反映轴系的低阶扭振特性,方程阶数低,计算量小,可方便地与电磁暂态仿真程序联结,但其主要缺点是不能分析转子任意截面上的受力情况,且难以计算较高阶扭振特性;多段集中质量模型兼具前两者的长处,既能准确地描述低阶和高阶的扭振特性,又避免了庞大计算量,故得到了广泛应用^[13]。目前的轴系建模方法仍有几个问题有待解决:对于降阶模型,难以确定合适的阶数以便定性或定量地进行分析;未能很好地考虑阻尼系数及参数摄动对轴系模型的影响。

机网接口模型是指在轴系扭振暂态仿真时将发电机暂态过程模型和电网部分暂态模型连接进行全系统仿真的模型。该模型的选择决定了机网联解过程的复杂程度,也是产生数值仿真累积误差的重要因素。目前机网接口模型联解方法大致分为两类:归并联解和交替联解。归并联解算法指网络向发电机归并或发电机向网络归并,补偿法、等值电阻法和等值电导法属于归并解算。交替联解算法是用隐式梯形法解网络部分的微分方程,用改进欧拉法解发电机部分的微分方程。此外还有其他的数值计算方法,如龙格库塔法、Wilson- θ 数值积分法、Houbolt 法、Newmark 法、尤拉后差法等。这些方法在计算精度和数值稳定性方面各有优缺点,综合运用几种方法,不同计算阶段采用不同算法,能在一定程度上降低误差^[5,13,14]。

1.2.2 扭振的仿真计算

汽轮发电机组扭振的分析一般有稳定性分析和动态响应分析两种。稳定性分析的主要方法有传递矩阵法、特征根分析法、等值阻抗法和复转矩系数法等。传递矩阵法及其各种改进形式由于其计算量小、精度高,得到了广泛应用^[12,15]。动态响应分析主要使用时域仿真,用数值积分的方法求解描述整个系统的微分方程组,可以计算冲击扭矩响应、轴系寿命损失、不稳定扭振过程。求解扭振响应是一种刚性问题,数字仿真时步长不能太大,需要选择适合刚性问题求解的仿真方法,常用的时域响应计算有振型叠加法、传递矩阵法和时域有限元法、常微分方程初值问题数值求解等。

分析电力系统扰动下的汽轮发电机组轴系扭振,关键是分析轴系扭矩的变化过程,主要借助数值仿真手段。目前各国都发展了不少数值仿真程序,其中最有影响的是美国博纳维尔电力管理局(BPA)1975年扩展后的电磁暂态程序 EMTP 和西德电站设备联合制造公司 1972 年改编的机网程序 NETOMAC;美国西屋公司的 N. H. PH0975 汽轮发电机组轴系扭振及动力响应计算程序日趋完善,并由我国上海发电设备成套设计研究院引进。中国电力科学研究院等单位应用引进的 EMTP 修改版本分析过某些国产机组轴系的受力问题。上海交通大学编制了电力系统机网相互作用的数字仿真程序 MANDISP,并对采用引进技术生产的 300MW 和 600MW 汽轮发电机组进行了轴系扭振计算。

1.2.3 扭振的测试与监测

随着振动工程不断发展及建模计算方法的不断改革,近年来汽轮发电机组轴系扭振理论计算(包括轴系本身固有频率和机电扰动下的响应计算)已有很大的改进。但汽轮发电机组轴系的机械结构较为复杂,建模时往往难以与实际结构完