

DIANLI XITONG JIWANG XIETIAO

电力系统机网协调

闵勇 胡伟 陈磊 徐飞 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANLI XITONG JI WANG XIETIAO

电力系统机网协调

闵勇 胡伟 陈磊 徐飞 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电力系统机网协调是指发电机组与电网之间在规划、设计、运行等方面的相互配合、协调发展,是保障电力系统安全稳定运行的重要问题。

本书共9章,主要包括机网协调在一次调频、二次调频,低频振荡、次同步振荡问题,发电机励磁系统、AVC中的作用,以及发电机励磁与调速、AGC与AVC协调控制,发电机二次设备保护与电网安全稳定的协调配合。

本书可供电力系统中从事规划、设计、运行和管理的人员在实际工作中参考,也可作为电力企业机网协调技术培训教材,还可供高等院校从事机网协调领域工作的电气专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统机网协调/闵勇等著. —北京:中国电力出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5198-2362-7

I. ①电… II. ①闵… III. ①电力系统-系统管理 IV. ①TM73

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第204107号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:罗翠兰

责任校对:黄蓓 闫秀英

装帧设计:张俊霞

责任印制:石 雷

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018年10月第一版

印 次:2018年10月北京第一次印刷

开 本:710毫米×1000毫米 16开本

印 张:17.75

字 数:326千字

印 数:0001—1500册

定 价:82.00元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

21 世纪以来,我国电力工业逐步全面进入大电网与大机组时代。电网安全稳定运行风险增大,一方面,大容量机组异常运行对电网安全稳定运行的影响更加显著;另一方面,各区域电网之间的相互影响和相互作用进一步增强,新技术、新设备的大量应用使电网运行特性更加复杂,因此大电网安全对机网协调运行提出了更高要求。

电力系统机网协调指的是发电机的各种保护可以适应电网运行方式的变化,并且能与自动装置达到最佳配合,从而保证整个电网的安全稳定性。各种保护包括发电机的失磁保护、失步保护、电压和频率异常保护等与电网密切相关的保护,自动装置包括励磁、调速、电力系统稳定器(PSS)、自动发电控制(AGC)、自动电压控制(AVC)等自动控制装置。由此可见,电力系统机网协调是一个涉及范围广,并具有理论深度和工程实践意义的课题。

本书所介绍的研究成果,大部分来源于清华大学电机系新能源电力系统动态分析与运行团队承担的国家重点研发计划项目(2017YFB0902200)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2011AA05A112 和 2012AA050207)、国家自然科学基金项目(51777104 和 50607011)以及国家电网公司科技项目等多项科学技术项目的研究成果。本书基于实际电网中存在的机网协调问题,探究其原因和解决策略。本书详细地论述了机网协调在电力系统频率、功角和电压稳定三方面的作用,涵盖内容全面。基于现代控制理论和电力系统协调控制方法,本书构建了电力系统一次调频和二次调频在线评估系统,从多个角度对电力系统调频能力进行全面的分析和评价;研究了中长期稳定计算中的电厂动力系统模型,得到了中长期稳定计算中水力系统以及热力系统的建模要求;对 SSR/SSO 问题进行了机理分析、风险评估和抑制措施设计;建立了以网源智能协调监控系统为平台的完整的励磁系统评价体系;研究了发电机组励磁—调速系统协调控制技术;提出了 AGC 和 AVC 分层协调优化系统;同时还基于机组涉网保护的网源协调思路对发电机失磁保护进行了研究。本书的论述过程由浅入深,包含丰富的算例。书中提出的大量协调控制方法已通过工程实践的验

证，具有很强的实用性。

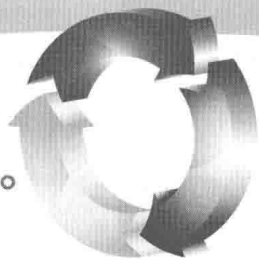
本书的研究成果大部分来源于作者所在的课题组及他们指导的诸多研究生共同工作所得，同时书中涉及的部分研究工作得到了清华大学电机工程与应用电子技术系的鲁宗相、乔颖、张毅威、谢小荣和桂林等老师的大力支持；另外国网冀北电力科学研究院的李群炬高工也提出了宝贵意见，在此一并向他们表示感谢。

在项目研究和本书编写过程中，还得到了华中科技大学、武汉大学、湖南大学、东北电力大学和三峡大学的诸多老师的热情帮助；中国电力出版社对本书的出版也给予了宝贵的支持和帮助，谨借此机会表达深深的谢意。

由于作者水平有限，且部分研究工作尚待深入，书中难免存在疏漏和不当之处，恳请读者们批评指正。

作者

2018年6月

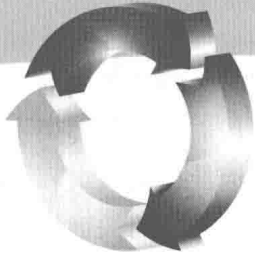


目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 现代电网与机网协调	1
1.2 电力系统机网协调现状	2
1.3 电力系统稳定性分类	3
参考文献	4
第 2 章 一次调频中的机网协调	6
2.1 一次调频在线评估指标体系	7
2.2 一次调频评估指标算法	14
2.3 一次调频分布特性对联络线潮流影响分析	20
参考文献	25
第 3 章 二次调频中的机网协调	26
3.1 自动发电控制	26
3.2 二次调频在线评估指标体系	27
3.3 AGC 机组调节性能指标算法	42
参考文献	45
第 4 章 低频振荡中的机网协调	46
4.1 中长期过程中的机网协调	46
4.2 中长期稳定计算中的电厂动力系统模型	53
4.3 发电厂动力系统对低频振荡的影响	67
参考文献	99
第 5 章 次同步振荡中的机网协调	105
5.1 次同步振荡问题概述	106
5.2 串联补偿输电系统的机网非线性耦合模型	112
5.3 多模式 SSR 的特征值分析方法	117

5.4	基于机组扭振模式阻尼量化分析的厂对网串联补偿 输电系统 SSR 风险评估方法	134
5.5	SSR 的机网协调抑制方法研究	142
	参考文献	154
第 6 章	发电机励磁系统在线监测	158
6.1	发电机励磁系统稳态监测	158
6.2	发电机励磁系统动态监测	164
	参考文献	172
第 7 章	发电机励磁-调速协调控制	173
7.1	鲁棒励磁控制器的设计及仿真	173
7.2	GPSS 与 PSS 的配合在调速器部分的应用	190
7.3	鲁棒励磁与调速侧电力系统稳定器的结合	198
	参考文献	205
第 8 章	AGC 与 AVC 自动协调控制系统	206
8.1	有功频率与无功电压控制的研究现状	206
8.2	AGC 和 AVC 分层自动协调优化系统的整体方案	214
8.3	协调优化控制模型及控制策略	217
8.4	协调优化系统运行情况分析	226
	参考文献	228
第 9 章	发电机二次设备保护与电网安全稳定的协调配合	230
9.1	发电机失磁保护	230
9.2	考虑网源协调下失磁保护延时元件的分析	235
9.3	考虑网源协调下失磁保护低电压判据分析	242
9.4	发电机失磁、系统振荡时的动态行为研究	250
9.5	新型失磁保护方案的设计与仿真	261
	参考文献	275



第 1 章

概 述

1.1 现代电网与机网协调

21 世纪以来,我国电力工业逐步全面进入大电网与大机组时代。一方面,特高压线路相继建成投运,华北、华东、华中(“三华”)联网工程稳步实施,“西电东送”、大区联网的大电网格局在合理利用能源、减少备用容量、提供相互支援,以及提高电网稳定性、经济性、可靠性等方面具有重要的战略意义;另一方面,华能玉环、上海外高桥三期等一批单机容量 1000MW 的火电机组也陆续投入运行,向家坝水电站的单机容量已达 800MW,大容量、高参数的发电机组具有技术先进、效率高、节能环保等优点,对调整电力工业结构、完成节能减排指标具有十分重要的意义。

现代电网一方面在向高电压、大机组、大功率远距离传输、交直流混合运行的方向发展,另一方面也在向分布式发电、电力电子化、多种能源综合的方向发展,电网组成元件和运行特性日趋复杂,因而对电源和电网之间的协调性提出了更高要求。目前大型同步发电机组仍是电力生产任务的主要承担者,因此,从保障电网安全运行的角度深入开展对发电机组自动装置和保护技术的分析研究,强化机组与电网的协调运行能力,有助于提高电力系统安全稳定水平和应对大面积停电事故的能力,是构筑坚强电网的基础。

发电机组运行特性主要由发电机组参数、励磁系统、调速系统、自动发电控制、自动电压控制、一次调频和二次调频功能、继电保护及安全自动装置等多种相关因素综合作用决定,这些设备及控制系统参数的设定与配置,对保障电力系统稳定运行起着至关重要的作用。近年来随着科学技术的进步和发展,数字型调节系统在我国电力系统中得到越来越广泛的应用,大大提高了机组调节运行水平,但是实际运行中发现以下问题:一是发电机组调节器性能不一、生产厂家种类繁多,存在系统性能未达标的情况,对电网的暂态、动态特性造成影响;二是厂网分开后由于管理监督机制尚未完善,部分电厂仅考虑自身利益,更改了调节器的功能和参数,造成机组调节器特性的变化以及模型实际参

数与电网掌握的情况不一致,从而削弱了电网的调节能力,同时也降低了电网仿真的精度,增加了电网事故的风险;三是目前电网的调节手段有限,各类调节器以及保护之间缺乏有效的协调控制,无法兼顾厂网安全。因此,大机组和大电网之间的相互作用及影响已成为关系到电力生产安全性和经济性的关键技术问题之一。

1.2 电力系统机网协调现状

电力系统机网协调问题涉及电网安全,近年来国内外发生的多起电网事故,都与机网协调问题有关。

2003年8月14日的美加大停电事故负荷损失总计6180万kW,停电范围为9300多平方英里($14\,966\text{km}^2$),涉及美国的8个州和加拿大的2个省,受影响的居民约5000万人。根据北美电力可靠性协会(NERC)公布的美加“8·14”大停电事故的分析报告,可以看出,由于未建立机网协调的继电保护和安全稳定控制系统,使得在系统电压下降时,许多发电机组很快退出运行,加剧了电压崩溃过程。IEEE继电保护工作组(J-6)与旋转电机工作组(J-5)的联合撰文也指出上述大停电事故中许多发电机组的跳闸属于机组保护在系统大扰动中的误动作,进而提出发电机相关保护与发电机容量曲线、励磁调节和静稳极限的配合策略,以确保发电机在系统大扰动中的在线运行,这对于恢复系统稳定至关重要。

2006年11月4日22:10,西欧8个国家发生了大面积停电事故。这是欧洲30年来最严重的一次停电事故,1000多万人受到影响。这也是继上述美加大停电之后又一次严重的大停电事故,引起了德国乃至欧洲各国的极大震动。处理报告确认本次事故起源于德国西北部,某条双回380kV线路正常停运,潮流转移至南部的联络线,导致其他输电线路负荷过重,同时影响了西欧其他国家的电力平衡。事故发生后,调度员立刻采取了相关应急措施,安全自动控制装置也发生动作,取得了一定的效果,但机组保护与系统控制的协调性不好,解网后没有实现子网内的功率平衡,又有众多机组解列,导致大量负荷被切除。除此之外,电网与风力发电机组之间的机网协调不足也是事故进一步发展的一个重要原因:解网后,风电的频率适应性没有发挥出来,当时德国西南电网频率偏差小于1Hz,东南电网频率偏差小于0.3Hz,但是风电机组都立即开始切机,从而影响了电网的稳定性。

2005年9月1日18:53~21:12,我国发生了3次蒙西电网机组对主网的低频振荡。3次振荡的持续时间分别为6min 40s、2min 25s和13min 55s。振荡的引发地点在万家寨电厂,引发原因是振荡前与万家寨电厂机组强相关的系统

振荡模式的阻尼已经较弱,随着该厂有功出力的增加和无功出力的减少,进一步降低了该振荡模式的阻尼,引发了万家寨电厂机组对系统的低频振荡,由此激发了蒙西电网机组对主网的低频振荡。采用现场试验数据拟合出的励磁系统模型参数计算结果显示,万家寨电厂对系统振荡模式呈现弱阻尼,在万家寨电厂三台机满发且机端电压较低的情况下,甚至出现负阻尼。发电机 PSS 参数整定不当,是引起弱阻尼振荡的主要原因。

以上事故的发生都与电力系统机网协调不当相关,其凸显出的问题主要表现在发电厂与电网位置、结构上的配合以及发电机控制与电网调度指令的协调。前者需要在电网建设前期对其进行规划,后者需要发电厂控制装置的准确动作以及调度员在工作中正确地做出判断。

为了减少由机网协调问题引起的电网事故,我国对机网协调问题展开了积极的研究,在 DL/T 1040—2007《电网运行准则》和 DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》等行业标准中,针对电网企业、发电企业、供电企业、直接供电用户等在从规划设计到并网运行各阶段所应遵循的基本技术和管理要求做出了明确规定。电网公司的各级调度根据所在地的具体情况制定了相应的机网协调方面的规章制度,如《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》《国家电网公司发电厂重大反事故措施》中都列有防止机网协调事故规程。

然而,随着电网结构的日益复杂,关于机网协调还存在很多尚未解决的问题。因此,必须对机网协调的理论依据、影响因素、分析方法、应用成果等方面进行深入探讨,以期对进一步研究和改善机网协调问题提供帮助。

1.3 电力系统稳定性分类

IEEE/CIGRE 工作组根据电力系统失稳的物理特性、受扰动的大小以及研究稳定问题必须考虑的设备、过程和时间框架,将电力系统稳定分为频率稳定、功角稳定和电压稳定 3 大类。我国目前也采用类似划分,但细节略有差异。

(1) 频率稳定:电力系统频率稳定性是指电力系统受到严重扰动以后,发电和负荷产生大的不平衡,电力系统仍能维持频率在合理的数值范围内的能力。频率稳定分为长期频率稳定和短期频率稳定等。一次调频、二次调频是保证电力系统频率稳定的重要手段。

(2) 功角稳定:正常情况下,系统中各发电机以相同速度旋转,机间相对转子角度维持恒定,即处于同步运行状态。若受到扰动后,系统中各发电机之间的相对功角随时间衰减并最终达到一个新的稳态值,则系统功角稳定。若受到扰动后,系统中各发电机之间的相对功角随时间不断增加,导致发电机失去

同步,则系统功角失稳。功角稳定分为小扰动功角稳定和暂态功角稳定两种^①。小扰动功角稳定是指电力系统运行于某一稳态运行方式时,系统经受小扰动后,能恢复到受扰动前状态,或接近扰动前可接受的稳定运行状态的能力。暂态功角稳定是指电力系统受到大干扰后,各发电机维持同步并过渡到新的稳定方式的能力,通常指第一或第二振荡周期不失步。

(3) 电压稳定:电力系统电压稳定性就是电力系统维持节点电压在合理的数值范围内的能力。按照系统受到扰动的大小可以将电压稳定问题分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定。小扰动电压稳定研究的是电力系统在某一种潮流状况下,受到小的扰动系统能否保持稳定并维持各节点电压在合理的数值范围内。例如,负荷的缓慢增加有可能使系统达到承受负荷的极限,任何使系统偏离该平衡点的扰动都将导致母线电压发生不可逆转的下降,而其他状态变量没有明显的变化。大扰动电压稳定问题,是电力系统受到大的扰动后伴随着系统保护的動作与事故处理,某些母线电压发生不可逆转的突然下降,而此时电力系统中其他的状态变量仍处于合理的数值范围内。

本书着眼于机网协调在电力系统稳定性方面的作用,包括以下几方面。

(1) 机网协调在频率稳定方面的作用。

这部分包括本书的第2章、第4章,将介绍一次调频、二次调频中的机网协调。

(2) 机网协调在功角稳定方面的作用。

这部分包括本书的第4章、第5章,将介绍机网协调在低频振荡、次同步振荡上的作用。

(3) 机网协调在电压稳定方面的作用。

这部分包括本书的第6章、第7章和第8章,将介绍发电机励磁系统、AVC上的机网协调,以及发电机励磁和调速协调、AGC和AVC协调。

(4) 电力系统继电保护对机网协调的影响。

这部分包括本书的第9章,将介绍继电保护在机网协调问题上的应用。

参考文献

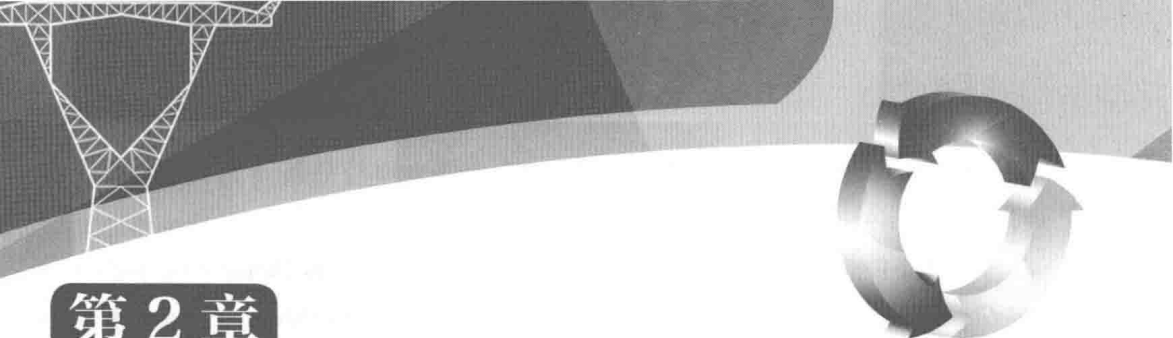
[1] 印永华,郭剑波,赵建军,等.美加“8·14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):8-11.

^① 我国原有功角稳定分类中有静态稳定和动态稳定,静态稳定一般特指不考虑发电机自动控制系统时的小扰动稳定,动态稳定考虑发电机自动控制系统(特别是励磁控制系统)时的小扰动稳定。CIGRE和IEEE建议不再使用该分类。

[2] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1): 1-3.

[3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. *Definition and Classification of Power System Stability* [J]. IEEE Transactions on Power Systems Pwrs, 2004, 19 (2): 1387-1401.

[4] 闵勇, 陈磊, 姜齐荣. 电力系统稳定分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.



第2章

一次调频中的机网协调

电网的频率是由发电功率与用电负荷大小决定的，当发电功率与用电负荷大小相等时，电网频率稳定；发电功率大于用电负荷时，电网频率升高；发电功率小于用电负荷时，电网频率降低。一次调频是指电网的频率一旦偏离额定值时，电网中机组的控制系统就自动地控制机组有功功率的增减，限制电网频率变化，使电网频率维持稳定的自动控制过程。当电网频率升高时，一次调频功能要求机组利用其蓄热等快速减发电功率；反之，机组快速增发电功率。一次调频一般由发电机的调速器进行，调节过程由发电机的自动调速系统随电力负荷的变化而改变输出功率，同时减小电网频率的变化。一次调频是电力系统有功频率控制的重要环节，反映了电网应对负荷突变的能力，对于系统的安全稳定运行有重要的作用。系统的一次调频能力与发电机组调速器的设置和机组控制方式密切相关，目前火电机组数字电液调节系统的广泛应用，使得一次调频功能不再是调节系统的固有属性，可通过人为操作进行逻辑修改及投切操作。随着电力市场改革的不断深入，厂网分开后发电机的考核管理难度加大。由于投入一次调频功能会造成机组调节系统及热力系统产生一定的波动，部分发电企业只注重机组运行稳定性，长时间切除一次调频功能或是增大动作死区，从而削弱了电网的一次调频能力，致使事故后系统的准稳态频率过低，可能导致低频减载装置动作，不利于系统的安全稳定运行。因此，如何实时、准确地评估机组的一次调频能力，对督促电厂保持发电机组良好的一次调频性能，以及实时掌握全网的一次调频水平、增加电网的运行质量和稳定性具有重要意义。

本章通过对电网频率动态过程中广域测量系统（WAMS）采集数据的分析，设计了一次调频在线评估系统，帮助电网公司实时掌握各个发电厂的一次调频运行状态，利用量化的考核方式提高管理的质量和效率，促进发电厂积极投入一次调频，确保电网的安全稳定运行。另外，还要对全网的一次调频性能展开研究，探索影响全网一次调频性能的因素，寻找提高全网一次调频性能、应对频率大扰动的方法，提升电网在频率大扰动下的安全稳定性能。

2.1 一次调频在线评估指标体系

鉴于一次调频对电网安全稳定性的重要作用，电网相关的一次调频考核管理制度正在逐渐深化。华中电网制定《华中电网发电机组一次调频技术管理规定》（简称《规定》）、提出《华中区域并网电厂运行管理及辅助服务技术支持系统——自动计算方法》等技术规范。湖北省电网公司在《湖北电网机网协调技术研究》项目中完成了发电机组调节器特性实时监测技术研究，实现部分试点电厂的相关参数上传工作。《湖北电网机网协调优化技术深入研究和高级应用》项目在此基础上，进一步开发机组一次调频性能评价功能，全面精细化地对湖北电网机组开展一次调频性能评价，促进机组充分发挥一次调频能力。

2.1.1 一次调频指标体系

近年来，基于全球定位系统（GPS）的同步相量测量技术不断成熟和发展，可在全局统一时钟协调下，对各测点的电压、电流等相量及功率、频率等模拟量进行同步测量，以 25~100 帧/s 的速率实时采样并上送至广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）主站。WAMS 是实现准确捕捉电力系统在故障扰动、低频振荡以及人工试验等情况下电网动态过程的技术手段，为系统动态行为的实时监控提供了良好的基础，也为一次调频动态特性的在线评估奠定了基础。

一次调频在线评估系统基于 WAMS 和能量管理系统（EMS）提供的数据，可详细地记录电网一次调频的动态和静态过程，获取实时数据和相关的长期统计数据，可从不同维度对系统进行全面的评价。本章提出了完整的三维一体的一次调频在线评估指标体系，如图 2-1 所示。

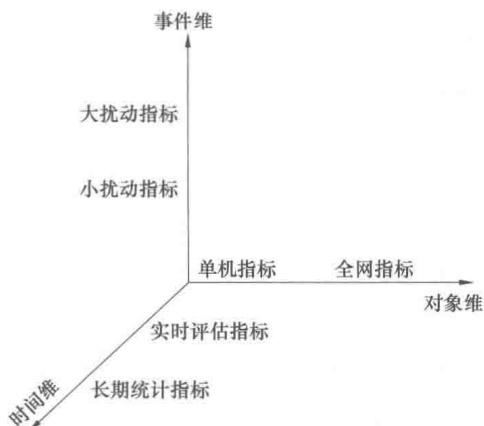


图 2-1 基于 WAMS 的一次调频在线评估指标体系

(1) 对象维。一次调频的评估对象包括全网的和单机的一次调频能力, 既对电网的一次调频性能做整体的评估, 便于调度人员实时掌握电网应对大扰动的能力, 也对单台机组进行针对性的评估和考核, 以促进机组一次调频性能的提高。

(2) 事件维。大电网运行中总是存在各种扰动, 而系统频率和机组频率调节特性在不同扰动下的行为特征不尽相同, 因此指标体系在事件维上分为大扰动和小扰动两类事件。小扰动下一次调频的调整量较小, 数据受到负荷随机波动和机组出力自然波动的影响较大, 但又是日常评估的最主要指标, 此场景下的评估指标既要能评估一次调频的能力, 又要尽量排除测量误差的影响, 以保证评估的准确性和考核的公正性; 大扰动下系统和机组的一次调频过程具有调节幅度大、时间较长、动作明显等特点, 利用 WAMS 系统可有效捕捉完整的频率扰动过程, 此场景下的评估指标可用于全面分析评估系统和机组的各个方面, 为电网的规划运行、管理考核制度的制定提供相应的依据。可见对事件维度的分类, 可从不同角度评价一次调频在不同场景下的行为特征。

(3) 时间维。指标体系在时间维上分为实时评估指标和长期统计指标两类, 即综合系统的短期数据和长期数据, 从单次表现和长期表现两个角度来对单机和系统的一次调频能力进行评估, 并为一次调频能力的数学描述提供更全面的数据支撑。

2.1.2 一次调频评估指标

本节提出了 7 个指标用于评估一次调频能力, 分别属于上述指标体系的三个维度的范畴, 而对于单机和全网的相关指标, 又有不同的表示方法和适用场合, 下面分别进行介绍。

2.1.2.1 调差系数

由于日常的频率波动小, 一次调频的调整量小, 计算出的调差系数不够准确。因此, 调差系数指标在事件维方面属于大扰动指标, 在对象维方面调差系数分为单机和全网 2 种指标。

1. 单机调差系数指标

发电机组的频率一次调整过程中, 其输出功率和频率关系的曲线称为发电机组的功率频率静态特性, 它可以用直线近似地表示, 由此即可计算发电机的调差系数。发电机组功率-频率特性如图 2-2 所示, 发电机组在频率 f_0 下运行时, 其输出功率为 P_0 , 相当于图中的 a 点; 当系统中的负荷增加导致系统频率下降到 f_1 时, 发电机组由于调速系统的作用, 使机组的输出功率增加到 P_1 , 相当于图中的 b 点。

调差系数的计算公式如式 (2-1) 所示:

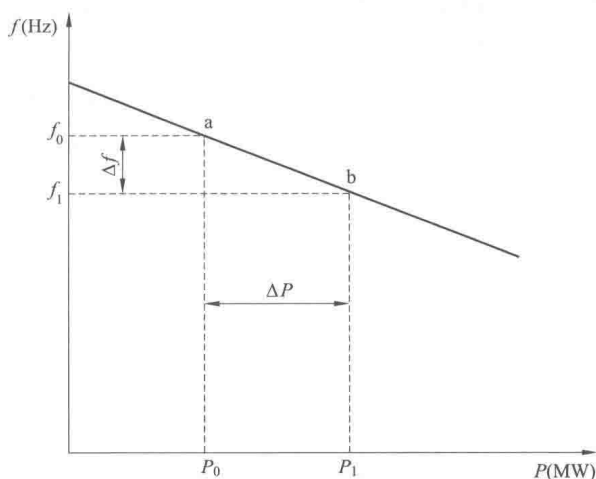


图 2-2 发电机组功率-频率特性

$$\delta = - \frac{\Delta f / f_n}{\Delta P / P_n} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 Δf ——调整后的频率和调整前的频率的差, Hz;

ΔP ——调整后的机组有功出力和调整前的机组有功出力的差, MW;

f_n ——额定频率, Hz;

P_n ——额定有功功率, MW。

由于调差系数 δ 是根据调节前后的稳态值计算的, 因此它反映了机组一次调频的有差调节特性, 是衡量一次调频特性的静态指标。

2. 全网的复合频率调节特性系数指标

全系统的一次调频性能由发电机和负荷共同决定, 可以用系统复合频率调节特性表示。对于一个有 n 台发电机和阻尼常数为 D 的负荷的系统, 当负荷变化为 ΔP_L 时, 静态频率偏差 Δf_{ss} 计算公式如式 (2-2) 所示:

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} + \cdots + \frac{1}{\delta_n} + D \right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{\delta_{eq}} + D} \quad (2-2)$$

式中 δ_i ——第 i 台发电机的调差系数, $i=1, 2, \cdots, n$ 。

因此, 定义系统的复合频率调节特性系数 β 为:

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{eq}} + D} \quad (2-3)$$

由于计算式 (2-3) 中的负荷阻尼系数 D 由负荷水平及特性决定, 难以在

线得到, 历史数据或经验值都不能保证计算的准确性。本章根据系统复合频率调节特性的物理意义, 利用 WAMS 数据寻找系统的突变功率, 用以计算系统的一次调频指标。考虑到在大电网系统互联的情况下, 需排除外网的影响, 计算出来的指标才是反映本系统一次调频性能的指标, 故计算公式如式 (2-4) 所示:

$$\beta = \frac{\Delta f}{\Delta P_{\text{sudden}} + \Delta P_{\text{tieline}}} \quad (2-4)$$

式中 Δf ——调整前后静态频率偏差, Hz;

ΔP_{sudden} ——电网中的突变功率, MW;

$\Delta P_{\text{tieline}}$ ——调整前后联络线的功率变化, 外送为负。

若所有联络线的 $\Delta P_{\text{tieline}}$ 都与 Δf 符号相同, 则扰动发生在本系统; 反之, 则扰动发生在外部电网, $\Delta P_{\text{sudden}} = 0$ 。由于目前互联电网的频率都较为稳定, 频率大扰动一般是由于大型发电机组跳闸造成的。随着同步相量测量装置 (PMU) 的广泛应用, 大型机组的功率突变可通过 WAMS 数据分析获得, 因此式 (2-4) 具有工程实用性, 且计算准确性高, 能够真实反映全网一次调频能力。

2.1.2.2 滞后时间和稳定时间

动态指标反映的是机组一次调频过程中的动态性能, 包括反应速度和调整速度。因此, 在对象维上这两个指标属于单机指标。又由于在日常的小扰动下, 这两个时间指标的计算不准确且意义不大, 因此在事件维方面这两个指标属于大扰动指标。

机组反应速度用滞后时间 T_{lag} 来评估如式 (2-5) 所示:

$$T_{\text{lag}} = T_{P_{\text{begin}}} - T_{f_{\text{beyond}}} \quad (2-5)$$

式中 $T_{P_{\text{begin}}}$ ——有功出力开始发生变化的时刻;

$T_{f_{\text{beyond}}}$ ——电网频率超过阈值的时刻。滞后时间越短, 表示机组对频率变化的反应越快。

机组调整速度用稳定时间 T_{stable} 来评估如式 (2-6) 所示:

$$T_{\text{stable}} = T_{P_{\text{begin}}} - T_{P_{\text{end}}} \quad (2-6)$$

式中 $T_{P_{\text{begin}}}$ ——有功出力开始发生变化的时刻;

$T_{P_{\text{end}}}$ ——发电机有功出力在调整后到达新的稳定值的时刻。稳定时间越短, 表示机组调整的速度越快。

2.1.2.3 贡献率

贡献率是单机指标, 该指标可计算大扰动和小扰动情况, 因此在事件维方面同属于大扰动和小扰动指标。其中, 可以利用小扰动下的机组贡献率来判断