



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

互联电网广域动态监测与 稳定控制

李 勇 刘 芳 杨德昌 著
 杨德友 曹一家



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

互联电网广域动态监测与稳定控制

李 勇 刘 芳 杨德昌 杨德友 曹一家 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

电网互联是解决能源大范围优化配置的有效途径。随着电网互联规模的增大,低频振荡等稳定性问题随之凸显。本书研究互联电力系统低频振荡产生的机理与特征;探讨低频振荡参数的提取及振荡模态的计算方法;介绍广域测量系统的发展现状;深入研究本地电力系统稳定器和广域阻尼控制器的协调设计方法、多类型广域阻尼控制器的控制输入信号优选方法、广域信号随机时滞的补偿设计方法;介绍广域阻尼控制策略的闭环实时仿真测试及实现方法。

本书可供电力系统、电力电子及相关电力与能源领域的高年级本科生、研究生、科研工作者和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

互联电网广域动态监测与稳定控制/李勇等著. —北京:科学出版社, 2016.6

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-048846-6

I. ①互… II. ①李… III. ①联合电网-动态监测 ②联合电网-稳定控制 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 133966 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:黄华斌

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:13 1/2 插页:2

字数:270 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
 吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）	张纪峰（中科院数学与系统科学研究院）
王 龙（北京大学）	陈 杰（北京理工大学）
王化祥（天津大学）	陈 虹（吉林大学）
王红卫（华中科技大学）	范 铠（上海工业自动化仪表研究院）
王耀南（湖南大学）	周东华（清华大学）
卢建刚（浙江大学）	荣 冈（浙江大学）
朱群雄（北京化工大学）	段广仁（哈尔滨工业大学）
乔 非（同济大学）	俞 立（浙江工业大学）
刘 飞（江南大学）	胥布工（华南理工大学）
刘德荣（中国科学院自动化研究所）	桂卫华（中南大学）
关新平（上海交通大学）	贾 磊（山东大学）
许晓鸣（上海理工大学）	贾英民（北京航空航天大学）
孙长银（北京科技大学）	钱 锋（华东理工大学）
孙彦广（冶金自动化研究设计院）	徐 昕（国防科学技术大学）
李少远（上海交通大学）	唐 涛（北京交通大学）
吴 敏（中南大学）	曹建福（西安交通大学）
邹 云（南京理工大学）	彭 瑜（上海工业自动化仪表研究院）
张化光（东北大学）	薛安克（杭州电子科技大学）

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化

为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Sun Yizhong, the Chinese Academy of Engineering member mentioned in the text below.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

近年来,随着能源互联网技术的兴起,以电网为载体,实现可再生能源与化石能源等多种类型能源供需的大范围优化配置,成为国内外电力与能源系统研究的热点领域。伴随着电网互联规模的日益庞大,电网源端发电方式的变化(如大规模风力发电系统的接入)、电网受端负荷类型的变化(如电动汽车负荷的随机接入)、电网网架结构的变化(如交直流混联输电),电力系统的运行方式越发复杂,电网安全与稳定性问题呈现出新的形势与内容。低频振荡是大规模互联电网存在的典型稳定性问题,它通常表征为频率在 $0.2\sim 3\text{Hz}$ 范围内的不同区域机组间的振荡。在实际电力系统运行中,小扰动(如负荷变化)或大扰动(如线路短路故障)均易激发出电网的低频振荡模态,如果不实施有效的控制措施,势必对电网的安全可靠运行带来威胁,降低电网的互联水平与传输功率。

以广域测量信息为基础的电力系统动态监测与控制技术为互联电网低频振荡及其抑制方法研究带来了契机。同步测量单元(PMU)及由此构建的广域测量系统(WAMS)在美国、欧洲、中国等世界多个国家与区域的电网中得到了广泛应用,为低频振荡的动态在线监测与闭环控制奠定了软硬件基础。迄今,基于广域测量信息的低频振荡监测已经得到了一定程度的应用与推广,广域阻尼控制技术也在逐步走向工程应用。本书是作者在电力系统稳定性广域监测与控制领域研究成果的比较全面的总结,希望读者通过阅读本书能够对互联电网低频振荡问题及广域监测与控制技术具有比较全面的了解。

本书共 10 章。第 1 章主要介绍电网发展的趋势、低频振荡的研究现状及广域测量系统的发展现状。第 2 章主要分析互联电网低频振荡的机理、分类和主要特征。第 3 章主要介绍低频振荡参数的提取方法,包括基于系统线性化模型的参数提取方法和基于广域测量信息的波形分析方法。第 4 章主要介绍低频振荡模态计算方法,该部分是信号处理方法,如希尔伯特-黄变换(HHT)方法、复奇异值分解法等的应用。第 5 章对本地电力系统稳定器阻尼振荡的有效性进行分析。第 6 章研究本地电力系统稳定器和广域阻尼控制器的协调设计方法。第 7 章提出多类型广域阻尼控制器输入信号的评估和优选方法。第 8 章和第 9 章对广域控制的时滞问题进行研究,介绍一种基于自由权矩阵的广域阻尼控制时滞补偿设计方法;第 10 章探讨广域阻尼控制策略的软硬件设计方法。

本书得到了国家自然科学基金重点项目(61233008)、国家自然科学基金面上项目(51377001、51477046)、国家国际科技合作专项(2015DFR70850)、国家自然

科学基金国际合作与交流项目(51520105011)、国家青年千人计划项目、湖湘青年英才项目(2015RS4022)等的资助,在此一并表示衷心的感谢。此外,本书还得到国内外同仁的大力支持。作者要特别感谢德国多特蒙德工业大学的 Christian Rehtanz教授、澳大利亚昆士兰大学的 Tapan K. Saha 教授、日本早稻田大学的横山隆一教授、华中科技大学的程时杰院士和文劲宇教授、武汉大学的孙元章教授、中国地质大学(武汉)的吴敏教授和何勇教授给予的大力支持。湖南大学的博士研究生施星宇、贺悝、王炜宇,硕士研究生周洋、田文超、万程、熊家敏、黎昀轩、李霞和江天天,中南大学的硕士研究生张文丹和李然然为本书的整理做了大量工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 全球能源互联网——世界电网发展趋势	1
1.2 互联电网低频振荡研究现状	3
1.2.1 低频振荡分类	3
1.2.2 低频振荡机理	4
1.2.3 低频振荡分析方法	5
1.3 广域测量系统	6
1.3.1 国内外广域测量技术的发展现状	7
1.3.2 基于电力系统阻尼控制的广域测量	10
1.3.3 广域阻尼控制器的设计方法	12
参考文献	13
第 2 章 互联电力系统低频振荡的机理和特征	17
2.1 互联电力系统低频振荡机理	17
2.1.1 线性机理	17
2.1.2 非线性机理	23
2.2 低频振荡分类和典型特征分析	30
2.2.1 局部振荡模式	30
2.2.2 区域间振荡模式	32
参考文献	35
第 3 章 低频振荡参数提取	39
3.1 系统模型分析方法	39
3.1.1 状态方程的线性化	39
3.1.2 特征值和特征向量的计算	40
3.1.3 振荡参数的确定	41
3.1.4 总结	42
3.2 信号测量分析方法	42
3.2.1 离散傅里叶变换	42

3.2.2	Prony 和 Multi-Prony 分析法	45
3.2.3	小波变换及改进	47
3.2.4	HHT 方法	51
3.2.5	原子分解法	55
3.3	本章小结	57
	参考文献	58
第 4 章	低频振荡模态计算	59
4.1	多信号特征值分析法	59
4.1.1	理论基础	59
4.1.2	SSI 算法有效性分析	61
4.1.3	基于 EMD 与 SSI 的低频振荡分析流程	63
4.1.4	多机互联系统数字仿真分析	63
4.1.5	总结	69
4.2	Multi-HHT 算法	69
4.2.1	基于 HHM 的主振荡模态识别	69
4.2.2	来自 WAMS 的多测量信号	70
4.2.3	主振荡模态识别	70
4.2.4	IMF 的绝对相位和相对相位的计算	72
4.2.5	节点贡献因子确定	73
4.2.6	AMS 的计算	74
4.2.7	测量信号的一致性	75
4.2.8	非线性混合方法流程图	76
4.2.9	NHM 的应用	77
4.2.10	总结	83
4.3	复奇异值分解法	83
4.3.1	基于 C-SVD 的总体测量矩阵分解	83
4.3.2	POD 和 EMD 关系分析	85
4.3.3	算法流程	86
4.3.4	实例分析	87
4.3.5	总结	91
4.4	自适应迭代滤波算法	91
4.4.1	本征模态分量及其筛选	91
4.4.2	自适应迭代滤波分解算法	92
4.4.3	基于 Hilbert 变换的振荡参数识别	94

4.4.4 算例分析	96
4.5 本章小结	105
参考文献	105
第 5 章 对局部 PSS 阻尼振荡作用的有效分析	107
5.1 引言	107
5.2 PSS 针对振荡阻尼的工作原理	107
5.3 PSS 的类型	108
5.4 特征值分析法	110
5.4.1 小信号模型的建立	110
5.4.2 阻尼比与线性频率	110
5.4.3 模态形式和参与因子	111
5.5 案例研究	111
5.5.1 4 机 2 区域测试系统	111
5.5.2 16 机 5 区域测试系统	115
5.6 本章小结	122
参考文献	122
第 6 章 本地 PSS 和广域阻尼控制器的协调设计	124
6.1 现有优化方法综述	124
6.2 SDGO 方法介绍	125
6.2.1 PSS 和 HVDC-WADC 的结构	125
6.2.2 设计过程	126
6.3 方法实现	127
6.3.1 分布式阻尼	127
6.3.2 序贯设计	127
6.3.3 全局优化	128
6.4 案例分析	129
6.4.1 交/直流混合互联系统	129
6.4.2 阻尼分配结果	130
6.4.3 设计结果	132
6.4.4 性能验证	135
6.5 本章小结	139
参考文献	140
第 7 章 多类型 WADCs 输入信号评价方法	142
7.1 信号选择方法综述	142

7.2 相对增益矩阵法和留数法	142
7.2.1 电力系统模型	142
7.2.2 留数法	143
7.2.3 相对增益矩阵法	143
7.3 信号选择流程	145
7.4 案例分析	146
7.4.1 预选输入候选信号	147
7.4.2 确定有效输入信号	149
7.4.3 局部控制与广域控制组合间的比较	151
7.4.4 多类型 HVDC 和 FACTS-WADCs 设计	152
7.4.5 控制效果验证	153
7.5 本章小结	156
参考文献	156
第 8 章 基于自由权矩阵的 FACTS 时滞广域阻尼控制	158
8.1 引言	158
8.2 自由权矩阵分析法	158
8.3 基于 FWMs 的 FACTS-WADC 的常规配置	160
8.4 基于 FACTS-WADC 的 FWMs 分析法	161
8.5 案例分析	165
8.5.1 4 机 2 区域测试系统	165
8.5.2 16 机 5 区域测试系统	168
8.6 本章小结	172
参考文献	173
第 9 章 考虑信号时变时滞的 DOF 型广域控制	175
9.1 DOF 型 HVDC-WADC 概述	175
9.2 DOF-WADC 设计	176
9.2.1 含时变时滞的离散时间模型	176
9.2.2 闭环系统 DOF-WADC	176
9.2.3 稳定性判据	177
9.2.4 目标函数和优化算法	178
9.3 仿真算例	179
9.4 本章小结	182
参考文献	182

第 10 章 广域阻尼控制策略的硬件实现	183
10.1 软件设计.....	183
10.1.1 双线性变换	183
10.1.2 硬件控制器的离散时间模型	185
10.1.3 算法流程图	186
10.2 硬件设计.....	191
10.3 闭环实验.....	193
10.3.1 HIL 系统的建立	193
10.3.2 实验结果	194
10.4 本章小结.....	197
参考文献.....	198
索引.....	199
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 全球能源互联网——世界电网发展趋势

20 世纪以来,传统电网规模变得越来越大,与能源互联也越来越紧密。现有的利用煤、气、油的火力发电技术在大规模使用时相对成本较低,通过大容量传输线路,就可以将各火电厂产生的电能传送到负荷中心,现已在世界范围内得到了广泛使用。然而,随着化石燃料的过度使用,地球上的煤矿资源越来越少,其价格也将变得越来越昂贵。同时,化石燃料的使用对全球气候变暖也有着不可忽视的影响。因此,将可再生能源作为分布式电源,逐步取代现有的能源结构,来缓解现有的经济和环境问题已经是不可避免的发展趋势。

2008 年,美国国家科学基金(National Science Foundation,NSF)设立项目“未来可再生电力能源传输与管理系统:能源互联网”,并成立未来可再生电力能源传输与管理中心(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System,FREEDM),其提出了能源互联网的概念,指出能源互联网是一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构,是智能电网的发展方向。许多高校、研究机构都参与了能源互联网的研究。绝大部分清洁能源只有转化为电能才能高效利用,而作为优质、清洁、高效的二次能源,电能可以替代绝大多数能源需求。因此,构建全球电力能源互联网是构建全球能源互联网的关键。全球电力能源互联网是以特高压电网为骨干网架,以输送清洁能源为主导,各级电网协调发展的高效、清洁、坚强、灵活的坚强智能电网。全球能源互联网由跨洲、跨国骨干网架和各国各电压等级电网(输电网、配电网)构成,连接“一极一道”(北极、赤道)大型能源基地,适应各种集中式、分布式电源,能够将风能、太阳能、海洋能等可再生能源输送到各类用户,是服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的全球配置平台,具备网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的特征^[1]。

作为智能电网的骨干网架,我国现有的由华北—华中、华东、东北、西北、南方、西藏 6 个交流同步电网组成的特高压电网已经越来越不适应全国能源优化配置和清洁能源快速发展的需求。国家电网公司提出,我国现在的特高压电网发展目标分为两个阶段:第一阶段是到 2020 年,在现有的 6 个同步电网格局基础上,将西部不同资源类型的电网进行互联,构建西部电网,将东部主要受电地区电网进行互联,构建东部电网,建成 19 回特高压直流,其中跨区跨国 13 回,形成送、受端结构清晰,交流和直流协调发展的 2 个同步电网格局;第二阶段是到 2025 年,建设东

部、西部电网同步联网工程,特高压骨干网架进一步加强,国家电网形成一个同步电网的格局,为构建全球能源互联网奠定坚实基础^[2]。

大电网互联具有很多优势。在大电网互联的背景下,电力系统的经济投资和装机容量可以大幅度缩减;世界范围内的电力资源能够得到更加高效的优化配置;同时,当电力系统的某一部分突然发生故障时,其他部分系统能够迅速响应来支援故障部分,提高了整个系统运行的安全性和可靠性。然而,随着电力系统网联进程的加快和电力市场改革的深入开展,出现了很多高电压、长距离的弱联网输电线路,容易引发低频振荡等系统稳定性问题;同时,不同国家的电力系统频率存在差异,无法互联,目前尚未有解决方案^[3]。

能源互联网是在智能电网的基础上,加大可再生能源的并网使用,满足经济和社会发展所需的日益增加的能源要求。能源互联网可分为源端综合能源系统和终端综合能源系统两个部分:源端综合能源系统主要面对电源,通过广域范围内的能源网络互联,将集中式风能发电、太阳能发电、燃气发电、水力发电、煤电等接入电网,通过不同电源的特性互补及输电和输气的联合优化运行实现能源高效优化配置;终端综合能源系统主要面对用户,通过各种用能设备实现电力、天然气、热/冷等系统之间高度耦合互联。然而,未来能源互联网的构建和运行涉及多方面的科学问题,其中,稳定性问题将是一个巨大的挑战。

对于源端综合能源系统,可再生能源大规模开发和直流电网技术等新技术的应用,将使系统运行特性发生变化,也将对系统稳定性带来重大影响;对于终端综合能源系统,多能源系统耦合运行,不同系统的异质元件相互作用,产生强烈的非线性、不确定的影响,分析和保障系统稳定性更为困难;未来能源互联网中,信息通信、传感、互联网和大数据技术等将是支撑能源优化配置、系统协调运行的基础,能量流和信息流相互作用,也将影响系统稳定性。大规模可再生电源接入电网,其波动性、间歇性和随机性不仅增加电力系统调峰压力,而且影响电力系统的安全稳定运行。由于风能发电和太阳能发电等清洁能源发电的大规模应用,基于电力电子技术的风电机组和光伏机组将逐步替代传统火电机组,系统惯性明显变小,使得在同样扰动条件下,系统频率变化更快,变化的幅度更大,严重情况下,可能引起系统崩溃,造成大面积停电。

全球能源互联网的建设分为三个阶段和三个层次,如图 1.1 所示,第一阶段是从现在到 2020 年,建成国家内部能源互联网,探索跨国互联网建设的可行性,推动达成共识和形成框架方案,启动大型能源基地建设,加强洲内联;第二阶段是 2020~2030 年,利用 10 年时间,建设跨国部能源互联网;第三阶段是 2030~2050 年,利用 20 年时间,建成全球能源互联网^[4]。

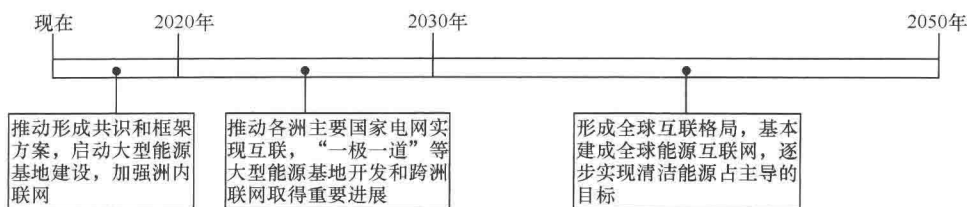


图 1.1 全球互联网建设阶段

1.2 互联电网低频振荡研究现状

随着全球能源互联网的建设，世界范围内的电网互联规模越来越大，然而由于区域互联电网之间的电气联系大大加强，运行方式变化多样，电网的稳定特性也变得越加复杂。传输线路的大容量和弱联网之间的冲突可能会引发低频振荡现象，而事实上，现在低频振荡已经成为影响电力系统安全稳定运行最重要的因素之一。

1996年8月，美国西部电网发生了大面积的停电，后经调查发现，停电原因是电网系统缺乏阻尼，引起持续的低频振荡，导致整个电力系统解裂。在我国，也常有低频振荡引发的停电事故发生。1984年，在香港和广东的联合电网系统中出现了低频振荡，这是我国首次出现的低频振荡事故记录；2000年，四川电网的二滩水电站也发生了低频振荡现象；2005年10月，华中电网范围内出现了功率振荡，对电网的安全和稳定性构成了严重的威胁^[3]。

低频振荡现象一旦发生，将严重威胁电网的安全稳定运行，甚至可能诱发连锁反应事故，造成严重的后果。因此，对电力系统低频振荡的研究具有十分重要的现实意义。

1.2.1 低频振荡分类

目前，对于低频振荡现象的分类根据标准的不同有许多不同的方法。通常情况下，将低频振荡划分在转子角稳定的范畴中。现今最为通用的低频振荡分类方法是将其分为两类：局部振荡模式和区域间振荡模式。

1. 局部振荡模式

局部振荡模式指一台发电机或一组发电机与所在区域其他发电机之间的振荡。一般来说，这种模式下的振荡频率是在1Hz到2.5Hz的范围。根据局部振动的定义可以看出，这种振荡模式的影响仅仅是在特定的区域内，而且可以方便地由电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)来控制^[5]。

2. 区域间振荡模式

区域间振荡模式是指在某个区域的发电机组相对另一区域发电机组的摆动。由于不同区域中的等效发电机惯性较大,因此这种模式的振荡频率比局部振动模式小,其频率范围为 $0.1\sim 1\text{Hz}$ 。与局部振动模式相比,区域间振动具有一些特殊的性质:持续时间较长,影响范围更广,阻尼值更小,难以控制^[5]。

1.2.2 低频振荡机理

根据电力系统的实际运行情况,可以将触发低频振荡的原因总结如下:传输系统采用链状结构;不同区域之间的弱连接和功率不平衡;备用容量不足;不同控制装置之间产生交互作用。现有文献中,主要用负阻尼机理、共振机理和非线性机理来解释低频振荡现象。

1. 负阻尼机理

负阻尼机理属于线性机理,在学术界被广泛认可。负阻尼机理认为励磁系统对发电机的调节产生了额外的负阻尼,抵消了发电机的正阻尼,使得总的阻尼比几乎为零甚至为负。在这种情况下,如果系统中出现小扰动,那么低频振荡幅度将逐渐增大,并最终导致发电机失步。根据负阻尼机理,可以在控制器中通过补偿相位来增大阻尼^[6]。

2. 共振机理

在实际的电力系统中,不是所有的低频振荡现象都可以由负阻尼机理解释。许多研究人员指出,即使阻尼强度足够大,当原动机功率的扰动频率接近电力系统的固有频率时,仍然会产生恒定幅度功率振荡^[7]。文献[8]提出了一种识别方法,通过基于对负阻尼机理和强迫振荡机理的比較的能量转换原理来定位干扰源。

3. 非线性机理

非线性机理是指当参数和扰动在特殊范围内时,电力系统的稳定结构可能会产生非线性和不规则的振荡^[9,10]。这与线性机理差别很大。然而,由于数学工具的限制,对这一机理的研究仍处于理论阶段。需要指出,本书中对低频振荡机理的研究是基于负阻尼机理的。

显然,低频振荡与电力系统的稳定性直接相关。然而,在互联电力系统中,低频振荡现象涉及大量的发电机和众多的振荡模式。现已有许多方法从不同的角度