

# 电力系统广域

## 动态稳定辨识与控制

陆超 张俊勃 韩英铎 / 著



科学出版社

# 电力系统广域动态稳定 辨识与控制

陆 超 张俊勃 韩英铎 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书针对电力系统动态稳定问题,系统介绍了利用广域实测信息进行电力系统特性辨识和控制器设计的理论方法与工程应用的最新进展。首先,介绍了广域测量系统条件下电力系统动态稳定的基本分析方法。然后,针对电力系统不同类型测量信号的辨识方法进行了说明,包括电网内扰动后的响应信号辨识、日常稳态运行时的类噪声信号辨识、采用人工微幅激励实验的辨识等。在此基础上,对广域动态稳定控制方法和应用技术进行了深入阐述,包括基于模型的鲁棒极点配置法和留数法、基于数据驱动的近似动态规划法和无模型自适应控制法。最后,介绍了闭环控制系统中对固定延时和随机延时的分析和处理方法,并对南方电网多回直流广域阻尼控制工程的相关工作进行了详细说明。

本书可供电力系统等相关专业的高等院校的教师和学生阅读,也可供电网运行部门的研究人员及工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统广域动态稳定辨识与控制/陆超,张俊勃,韩英铎著. —北京:科学出版社,2014.12

ISBN 978-7-03-042957-7

I. ①电… II. ①陆…②张…③韩… III. ①电力系统-动态监测②电力系统-动态控制 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 005941 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:陈敬

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:468 000

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

我国电网日趋复杂,对能源利用效率的要求越来越高,因此,对电网稳定性的要求日益增加。传统解决电网安全问题的基本策略是仿真,但离线模型与实际电网存在偏差,导致实际系统采用“以保守性换可靠性”的方法制定稳定性策略。正如该书中所说,输送能力最大可达 2300MW 的 500kV 线路,受“N-1”考核、稳定极限约束、仿真准确性裕度等因素的影响,实际传输功率大部分时间均小于 800MW,造成国民经济投资浪费。

由于稳定性极限计算不准,电力系统效能低下一直是国内电力工作者重点研究的困难问题。自 20 世纪 90 年代起,我们与清华大学韩英铎教授团队展开合作,共同致力于解决我国电力工业发展过程中凸显的这一类“硬骨头”问题。其中,如何利用广域信息技术提升电力系统稳定性是重要的研究方向。在韩英铎教授务实作风的带动下,清华大学的科研团队进行了一系列技术攻关,我们共同实现了科研成果向生产力的转化,在国内开展了一系列以广域信息平台为基础的试验与示范工程项目,极大推动了电力系统信息化的进程。

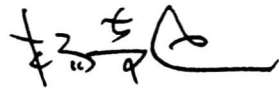
从学术理论上讲,广域信息技术是以同步相量测量技术为基础,以电力系统稳定监测、分析和控制为目标的实时监控信息技术。广域测量系统具有异地、高速、同步的优良性能,自 20 世纪 80 年代末被提出后,经过近三十年的发展,已经在我国电力工业中普及,并广泛用于电力系统的参数辨识、状态估计、稳定性在线预警、动态控制、系统保持等领域。其中,电力系统广域动态稳定辨识与分析控制是解决我国大规模电网互联发展过程中凸显的以低频振荡为代表的动态稳定问题的创新性解决方案,也是该书阐述的主要内容。

该书利用广域测量系统实测数据进行电力系统动态建模,并基于建模或辨识结果研究电力系统动态稳定问题,这将克服传统的依赖离线模型研究方法的一系列缺点,具有很高的理论价值和实用价值。该书的作者团队克服了重重困难,在不影响系统安全的条件下,综合利用实测的扰动响应信号、稳态类噪声信号和微幅激励信号,提出了许多创新方法,解决了这一领域存在的重大问题,为发展基于广域实测信息的新一代电力系统在线安全稳定分析、预警与控制保持技术开辟了新方向,奠定了基础。

除理论成果外,该书的作者团队与北京四方继保自动化股份有限公司开展了紧密合作,将理论成果应用于实际电力系统,特别是在中国南方电网公司实际系统中进行了工程化校核,无论是现场试验还是并网运行,都充分展示了该书所提

方法的可行性和良好的性能。相信不久之后,这种利用广域信息实现电力系统动态稳定辨识与控制的方法,能较好地解决我国电力系统中动态稳定瓶颈导致的运行效率低下等问题,发挥更加重要的工程作用,体现其巨大的经济价值和社会价值。

中国工程院院士、华北电力大学教授



2014年12月

## 前 言

电力系统动态稳定问题与大电网互联紧密相关,随着电网规模和惯性的增加,系统的主导区间振荡频率逐渐降低。但是,已广泛采用的发电机快速励磁在低频段呈现负阻尼特性,频率越低,负阻尼作用越显著,所以,弱阻尼低频振荡成为威胁互联电网安全稳定运行的重要因素。传统的电力系统动态稳定分析和控制器设计主要基于离线的仿真模型进行,但这与实际复杂电网存在显著误差;阻尼控制器参数基于单机无穷大简单模型和典型工况整定,不能满足实际电网多变的运行方式和大量控制器的协调要求;控制输入信息仅采用本地信号,难以准确地反映区间振荡的动态过程等,进一步加剧了系统的动态稳定问题。国内外电力系统已发生过多次振荡事件,甚至由此导致大停电事故,如1996年8月10日美国西部电网(WSCC)的振荡解列等。

近年来迅速发展的同步相量测量技术为上述问题的解决提供了关键支撑,目前,相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)和广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)已广泛应用。截至2013年年底,国内布点超过2500个,覆盖全部500kV节点、部分220kV节点和重要电厂,获取了海量的电力系统实时信息,使得改变传统动态稳定分析单纯依靠离线仿真模型的情况成为可能。基于电网日常运行中的类似噪声信号,可以辨识出不同的振荡模式和模态信息,实现弱阻尼预警;针对故障等扰动后的响应信号,可以更加快速地告警;控制器的参数设计可以在辨识得到系统降阶模型的基础上进行,同时其参数还可以在不同运行方式下根据实测数据进行自适应调整等,已经形成了一整套基于广域实测数据的电力系统动态稳定辨识与控制理论体系与具体方法。

作者所在团队在韩英铎院士的带领下,从事广域测量技术及应用研究已有约20年的时间。1993年,《IEEE Spectrum》杂志介绍全球卫星定位系统的技术进展,韩英铎教授敏锐地发现了其精确授时功能在电力系统中的广阔应用前景。从研究基础的相量计算算法,到与企业合作研制了PMU并在国内广泛应用;从提出同步相量测量技术应用体系,到合作完成国内首个广域测量主站系统;从开展Prony低频振荡辨识方法研究,到投运国际上第一个实际电网广域阻尼控制工程,取得了一系列的标志性成果。本书针对动态稳定问题,结合作者十余年的理论研究成果和工程应用体会,系统介绍了利用广域实测信息进行电力系统特性辨识和控制器设计方面的基础知识和最新进展。

本书第1、2章是相关背景和基础知识的介绍,包括实际电网的事故或案例、

同步相量测量技术与广域测量系统、电力系统动态稳定概念与基本分析方法等。第3~6章是对电力系统各种不同类型测量信号辨识方法的介绍,包括电网内故障或扰动后响应信号的辨识、日常稳态运行情况下类噪声信号的辨识、面向阻尼控制器设计采用人工微幅激励得到的输入-输出信号的辨识等。其中,类噪声信号辨识是一种新技术,本书在介绍方法的同时,也详细说明了辨识前后的数据处理技术。进一步地,面向控制器设计,还对电力系统闭环可辨识性、辨识结果的偏差和方差特性、辨识方法等进行了分析。第7~13章是对广域动态稳定控制方法和应用技术的介绍,由于实际电力系统运行方式多变,因此该部分各类方法均包括了对控制器自适应的处理。第7章是对广域动态稳定控制器设计基本流程和方法的说明;第8章为基于闭环辨识模型和鲁棒极点配置方法的自适应控制;第9章基于留数方法和多点类噪声信号辨识所提供的振荡模式、模态信息,发展出了一套不依赖于扰动的自适应控制新方法;第10、11章为代表性的数据驱动(data driven)控制方法,分别为近似动态规划和无模型自适应控制,可直接基于被控系统的输入、输出信息进行在线控制器设计和自适应调整,这两类方法也可用于非线性系统;第12章介绍了对闭环控制系统中固定延时和随机延时的分析和处理方法,这是电力系统广域控制的新问题;第13章是对南方电网多回直流广域阻尼控制工程的说明,包括设计方法、系统组成、测试流程、现场人工大扰动试验与运行等内容,本书中的很多成果在其中得到了应用和检验。

本书在系统介绍理论和方法的同时,也结合了大量实际电网的仿真和应用案例,可供从事相关工作的高校师生、研究人员或电网运行部门工程师参考。

本书及相关工作的完成,离不开众多专家的指导和支持,以及朋友、同事的关心和帮助。衷心感谢清华大学电机系王仲鸿的悉心指导,感谢谢小荣给予的支持;感谢已毕业的研究生贺静波、吴超、赵艺、肖晋宇等,本书的不少内容和他们的刻苦努力是分不开的,感谢程云峰、张静怡、张欣然、王颖、要鹏飞、林俊杰、于松泰等在本书整理过程中的辛勤工作;感谢华北电力大学杨奇逊院士的指导;感谢北京四方继保自动化股份有限公司吴京涛、石景海、胡炯等在软硬件实现和工程实施中的大力帮助;感谢中国南方电网公司为本书提供了实际应用的机会和条件,特别是李立涅、吴小辰、李鹏等在控制策略设计和现场调试试验等方面的大量指导和配合。

本书得到国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB215206)、国家自然科学基金项目(51037002,51107061)的资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

陆超 张俊勃

2014年9月于清华园

# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 电力系统重大稳定事件 .....	2
1.1.1 几次重大的停电事故及启示 .....	2
1.1.2 我国的稳定性试验及启示 .....	7
1.2 广域测量系统 .....	8
1.2.1 广域测量系统的发展 .....	9
1.2.2 同步相量测量技术 .....	9
1.2.3 广域测量技术的应用及进展 .....	11
1.2.4 国内外基于广域测量系统的典型工程应用 .....	15
1.3 电力系统动态功角稳定性 .....	16
1.3.1 电力系统稳定性 .....	16
1.3.2 动态功角稳定性 .....	17
1.3.3 广域电力系统条件下的动态功角稳定问题 .....	18
1.4 本书的主要内容 .....	20
参考文献 .....	21
第 2 章 电力系统动态建模与分析 .....	25
2.1 多机系统动态建模 .....	25
2.1.1 同步发电机 6 阶 Park 模型 .....	25
2.1.2 同步发电机 $d$ - $q$ 轴等值电路 .....	27
2.1.3 同步发电机实用模型 .....	28
2.1.4 多机系统线性化模型 .....	29
2.2 幅频域模式分析 .....	35
2.2.1 模式分析 .....	35
2.2.2 传递函数、留数、可控性与可观性 .....	36
2.3 基于数据的建模分析 .....	38
2.3.1 主导模式 .....	38
2.3.2 模型降阶 .....	40
2.3.3 降阶辨识原理 .....	43



2.3.4 降阶辨识的误差分析 .....	45
参考文献 .....	48
<b>第3章 响应信号分析方法</b> .....	49
3.1 电力系统响应信号 .....	49
3.2 响应信号分析方法 .....	50
3.2.1 傅里叶变换 .....	50
3.2.2 Prony 方法 .....	52
3.2.3 Hilbert-Huang 变换法 .....	54
3.2.4 ESPRIT 法 .....	58
3.2.5 其他方法简介 .....	60
3.3 实际系统应用 .....	61
3.3.1 江苏电网低频振荡动态跟踪系统 .....	61
3.3.2 日本西部电网振荡模式分析案例 .....	62
参考文献 .....	65
<b>第4章 类噪声信号辨识方法</b> .....	66
4.1 类噪声信号 .....	66
4.2 类噪声信号辨识方法 .....	69
4.2.1 ARMA 模型法 .....	69
4.2.2 随机子空间方法 .....	75
4.2.3 自适应滤波器算法 .....	79
4.2.4 其他方法简介 .....	82
4.3 辨识信号的选取 .....	84
4.3.1 类噪声信号的功率谱 .....	85
4.3.2 关键节点选取功率谱指标 .....	85
4.3.3 关键节点信号的选择方法 .....	87
4.4 辨识信号的预处理 .....	88
4.4.1 去趋势 .....	88
4.4.2 预滤波 .....	89
4.4.3 再采样 .....	89
4.5 辨识结果可信度分析 .....	89
4.5.1 蒙特卡罗法 .....	90
4.5.2 自助分析法 .....	90
4.6 实际系统应用 .....	91
4.6.1 南方电网仿真算例 .....	91
4.6.2 WECC 实时动态监控系统 .....	95

参考文献 .....	97
<b>第 5 章 小幅激励响应辨识方法 .....</b>	<b>99</b>
5.1 电力系统激励实验 .....	99
5.2 电力系统激励辨识方法 .....	100
5.2.1 基于 Prony 的传递函数辨识方法 .....	100
5.2.2 状态子空间数值辨识方法 .....	102
5.2.3 基于正交投影的子空间方法 .....	106
5.2.4 其他方法简介 .....	110
5.3 基于小幅激励的电力系统激励辨识方法 .....	112
5.3.1 实验设计分析 .....	112
5.3.2 实验设计要点 .....	114
5.3.3 设计流程 .....	121
5.4 实际系统应用 .....	122
5.4.1 南方电网仿真算例 .....	122
5.4.2 WECC 的实验 .....	127
参考文献 .....	131
<b>第 6 章 电力系统闭环辨识理论 .....</b>	<b>133</b>
6.1 闭环辨识基本概念 .....	133
6.1.1 闭环辨识系统 .....	133
6.1.2 闭环辨识方法 .....	133
6.2 多干扰情况下的闭环可辨识性 .....	136
6.2.1 可辨识性基本概念 .....	136
6.2.2 闭环可辨识性 .....	137
6.3 多干扰情况下的闭环辨识一致性研究 .....	142
6.4 多干扰情况下的闭环辨识收敛性研究 .....	145
6.4.1 辨识时干扰模型未固定 .....	145
6.4.2 辨识时干扰模型固定 .....	146
6.5 多干扰情况下实现系统闭环辨识的条件 .....	147
参考文献 .....	151
<b>第 7 章 电力系统广域动态稳定控制 .....</b>	<b>152</b>
7.1 广域阻尼控制 .....	152
7.2 控制点及反馈信号选择 .....	153
7.2.1 基于模型的方法 .....	153
7.2.2 基于数据的方法 .....	155
7.2.3 选点选信号方法小结 .....	157

7.3	控制方法 .....	158
7.3.1	基于模型的控制方法 .....	158
7.3.2	基于数据驱动的控制方法 .....	159
7.4	广域阻尼控制器综合设计 .....	160
7.4.1	综合设计方案 .....	160
7.4.2	整定流程 .....	161
	参考文献 .....	162
<b>第 8 章</b>	<b>鲁棒极点配置法 .....</b>	<b>167</b>
8.1	极点配置方法 .....	167
8.1.1	基本原理 .....	167
8.1.2	电力系统阻尼控制器设计的要求 .....	168
8.1.3	频域的鲁棒阻尼控制器设计 .....	169
8.1.4	时域的多目标控制器设计 .....	171
8.1.5	四机系统仿真算例 .....	174
8.2	闭环自适应控制方法 .....	178
8.2.1	自适应控制中的闭环辨识问题 .....	178
8.2.2	模型监控辨识体系 .....	179
8.2.3	在线鲁棒阻尼控制器设计 .....	182
	参考文献 .....	186
<b>第 9 章</b>	<b>留数补偿控制法 .....</b>	<b>188</b>
9.1	基于留数法的广域阻尼控制器设计 .....	188
9.1.1	基于留数法的阻尼控制原理 .....	188
9.1.2	广域阻尼控制器的设计条件 .....	189
9.1.3	广域 PSS 在线设计方法 .....	191
9.1.4	南方电网仿真算例 .....	194
9.2	基于广域信息的自适应阻尼控制 .....	198
9.2.1	实现方案研究 .....	198
9.2.2	在线参数自适应整定方法 .....	200
9.2.3	南方电网仿真算例 .....	200
9.3	多个控制器的协调控制方法 .....	203
9.3.1	多控制器协调方法 .....	203
9.3.2	南方电网仿真算例 .....	206
	参考文献 .....	208
<b>第 10 章</b>	<b>近似动态规划控制方法 .....</b>	<b>210</b>
10.1	近似动态规划控制原理 .....	210

10.1.1	经典动态规划的基本原理	210
10.1.2	动态规划的近似方法	212
10.1.3	函数近似结构的选择	214
10.1.4	直接神经动态规划方法	216
10.2	线性二次调节器问题中 DNDP 方法的收敛性证明	217
10.2.1	多层感知器 BP 算法的收敛性	217
10.2.2	DNDP 方法的收敛性	218
10.3	电力系统 DNDP 自适应控制	222
10.3.1	电力系统控制对自适应的要求	222
10.3.2	DNDP 方法在电力系统稳定控制中的实现	227
10.3.3	4 机 2 区系统的仿真结果	232
10.4	移相式 DNDP 自适应协调控制方法	239
10.4.1	移相式神经网络	240
10.4.2	南方电网多回直流功率调制的协调设计	243
	参考文献	245
<b>第 11 章</b>	<b>无模型自适应控制方法</b>	<b>247</b>
11.1	无模型自适应控制基本原理	247
11.1.1	非线性离散时间系统的动态线性化描述	247
11.1.2	无模型自适应控制律	249
11.1.3	伪梯度向量估计算法	250
11.1.4	包含噪声的无模型自适应控制算法	251
11.2	单输入单输出电力系统无模型自适应控制	252
11.2.1	适于 WADC 的无模型自适应控制改进算法	252
11.2.2	无模型自适应控制改进算法稳定性分析及参数设置	256
11.3	多输入多输出电力系统无模型自适应控制	260
11.4	无模型自适应控制仿真算例	264
11.4.1	SISO 情况 36 节点系统仿真算例	264
11.4.2	MIMO 情况四川及其互联系统仿真算例	273
	参考文献	279
<b>第 12 章</b>	<b>广域时滞系统分析与控制器设计</b>	<b>281</b>
12.1	广域时滞系统	281
12.1.1	固定延时的影响分析	282
12.1.2	固定时滞系统的稳定判据	284
12.1.3	Padé 近似方法	286
12.1.4	随机延时的影响分析及工程处理方法	288

12.2	时滞鲁棒稳定控制器设计 .....	295
12.2.1	基于 Padé 近似的频域鲁棒控制器设计方法 .....	295
12.2.2	幅频整形与留数法控制设计的优势互补讨论 .....	298
12.2.3	时滞的在线实测与调整技术 .....	299
12.3	南方电网广域直流控制实时数字仿真实验 .....	300
12.3.1	南方电网等值系统及实验硬件系统 .....	301
12.3.2	幅频整形与相位补偿设计实验结果 .....	303
	参考文献 .....	309
<b>第 13 章</b>	<b>多回直流广域自适应阻尼控制介绍 .....</b>	<b>311</b>
13.1	背景介绍 .....	311
13.2	广域直流自适应阻尼控制系统设计与实现 .....	311
13.2.1	实际工程中的广域自适应阻尼控制器设计 .....	312
13.2.2	控制系统的防误设计 .....	316
13.2.3	控制系统硬件实现及工程实施 .....	318
13.3	南方电网交直流混合系统仿真与实时数字仿真实验 .....	320
13.3.1	仿真与 RTDS 实验系统 .....	320
13.3.2	仿真与 RTDS 测试方案 .....	321
13.3.3	自适应控制 RTDS 测试结果 .....	323
13.3.4	南方电网西电东送输电极限的提高 .....	324
13.4	现场调试与闭环扰动试验 .....	329
13.4.1	现场调试方案 .....	329
13.4.2	实际系统大扰动试验 .....	331
	参考文献 .....	342
<b>附录 A</b>	<b>同步发电机 <math>d</math>-<math>q</math> 轴等值电路方程及参数推导 .....</b>	<b>343</b>
<b>附录 B</b>	<b>同步发电机实用模型推导 .....</b>	<b>347</b>
<b>附录 C</b>	<b>电力系统无模型自适应控制中的限幅环节处理 .....</b>	<b>352</b>
<b>附录 D</b>	<b>无模型自适应控制闭环系统有界性条件证明 .....</b>	<b>356</b>

# 第 1 章 绪 论

电力作为最广泛应用的能源方式,在国民经济发展中有着举足轻重的作用。近十年来,我国电力工业持续快速发展。国家能源局统计资料显示,截至 2013 年年底,全国发电装机总量达 12.47 亿 kW,居世界首位;全国电网 220kV 及以上输电线路回路长度为 48.03 万 km、公用变设备容量为 21.99 亿 kV·A,电网规模居世界首位<sup>[1]</sup>。庞大的电网规模,万亿计的基础投资,电力系统的一举一动都关系着我国经济的增长。然而,在一项项壮举的背后,也透露出我国工业发展的粗放以及资源利用的低效。

2013 年,全国 6MW 及以上电厂发电设备平均利用小时持续下降,为 4511h,同比降低 68h,相当于 5.15%<sup>[2]</sup>。500kV 输电网夏季典型运行方式用电高峰的输送潮流普遍低于 500MW,不到设计输送 1000MW 容量的一半。由于电源与负荷分布不均匀,在稳定约束限制下,风电场大面积弃风,夏季水电存在窝电问题,清洁能源利用效率持续低下。从新能源到特高压,巨大的投资并没有带来能源的高效利用,反而折射出电力系统在运行方面存在的困难。由于系统模型不准确,为了避免大停电事故,电力系统运营部门“以保守性换可靠性”,导致效率低下、资源浪费严重。

为应对上述困难,我国加快了建设智能电网的步伐,期望借助信息化、自动化发展的成果,大幅度提升电力生产与供应的安全性、经济性、便捷性,以达到最大限度地提高设备使用效率、改善用户供电质量和提升能源利用效率的目的。在这样的背景下,广域测量系统(WAMS)及其高级应用作为代表性的信息技术和自动化技术,在电力系统在线监测、动态建模、稳定控制与保护等方面具有广阔的应用前景,有望从根本上改善电力系统运行的保守性问题。

本书主要介绍利用 WAMS 实现电力系统动态稳定的辨识与控制,是 WAMS 高级应用的重要组成部分。在介绍本书的主要内容之前,首先回顾分析近年来发生的几次电力系统重大稳定事故,总结其主要原因,挖掘广域动态稳定辨识与控制相关的关键问题,明确本书的目标和期望。接下来介绍 WAMS,并就 WAMS 对电力系统动态稳定分析与控制带来的变化进行评述,最后介绍本书的主要内容。

## 1.1 电力系统重大稳定事件

互联电力系统覆盖面广,元件众多,动态行为复杂,具有运行、调度、维护复杂的特点。考虑到电力系统运行安全性问题,在系统中进行试验是比较困难的,数据非常珍贵。同时,大电网事故作为实际发生的案例,具有很高的研究价值。

### 1.1.1 几次重大的停电事故及启示

#### 1. 1996年美国西部电网停电事故<sup>[3]</sup>

1996年,美国西部电网(Western Systems Coordinating Council, WSCC,后来改名为 Western Electricity Coordinating Council, WECC,图1-1)在8月10日发生大面积停电事故,造成了巨大的经济损失和政治影响,下面简要介绍这次大停电事故的情况。

8月10日15时48分,WSCC发生大面积停电事故。该起事故的起因是邦纳维尔电力公司(Bonneville Power Administration, BPA)在输电走廊内对树木进行修剪和砍伐作业以消除对电网的危险,但是操作过程中出现了意外。事故的具体过程如下。

(1) 事故前30min~1h, BPA对树木进行修剪和砍伐作业先后引起三条500kV线路对树多次闪络退出运行。

(2) 在JohnDay-Marion(三条500kV线路中最后一条)跳闸5min后,向俄勒冈州北部Portland地区供电的一条500kV线路(Keeler-Allston)重载潮流达到1300MW,弧垂过大对树放电,15时42分37秒跳闸。

(3) 由于Keeler-Allston与两三条230kV线路在Portland地区形成弱电磁环网,其开断导致230kV线路过载。

(4) 15时47分36秒, Ross-Lexington(230kV线路)弧垂过大对树放电跳闸。

(5) 潮流大量变化,使邻近的MoNary电厂机组无功出力增加。

(6) 15时47分40~57秒,因励磁系统保护,MoNary电厂先后跳开八台机组,电网出现了0.224Hz的增幅振荡。

(7) 15时48分51秒, Marion站(500kV)观测到交流系统振荡振幅为60kV、1000MW。

(8) 几乎同时,阻抗I段断开Buekley-Crizzly(500kV线路)。

(9) 15时48分52.632秒(一个半周波后),两条太平洋交流联络线跳开,另一条随后跳开,大量潮流涌向东部,全网稳定破坏,发生不可控连锁反应。

(10) 振荡解列装置和大量继电保护装置动作,电网无序地解列为四片。

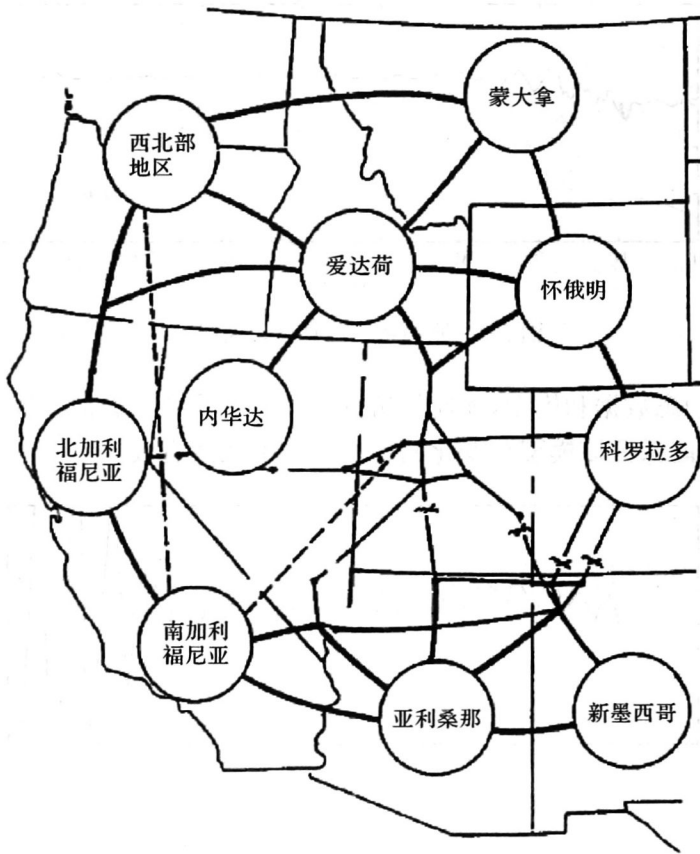


图 1-1 美国西部电网结构示意图

这起停电事故影响了大约 750 万个用户，损失负荷 30.392GW。然而，通过仿真再现事故场景时，仿真和事故记录所得结果并不一致，如图 1-2 和图 1-3 所示。

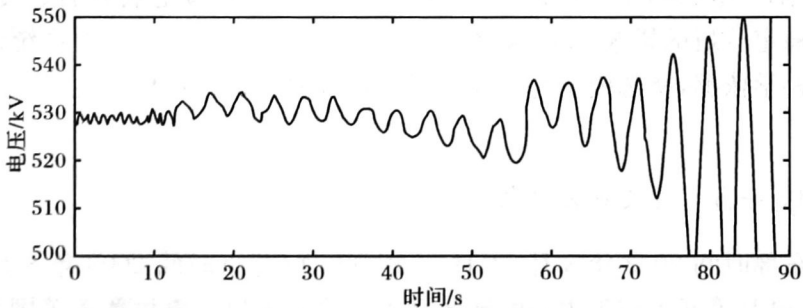


图 1-2 真实系统故障录波曲线



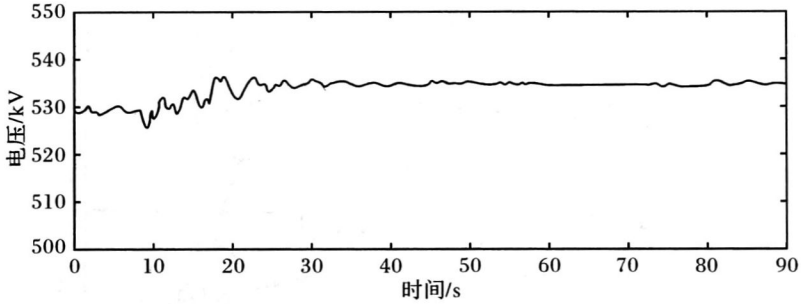


图 1-3 原始系统仿真再现曲线

不断改变动态数据和模型,才使得仿真和事故记录结果近似一致,如图 1-4 所示,但是这并不能保证该模型在变化的运行方式下依然有效。

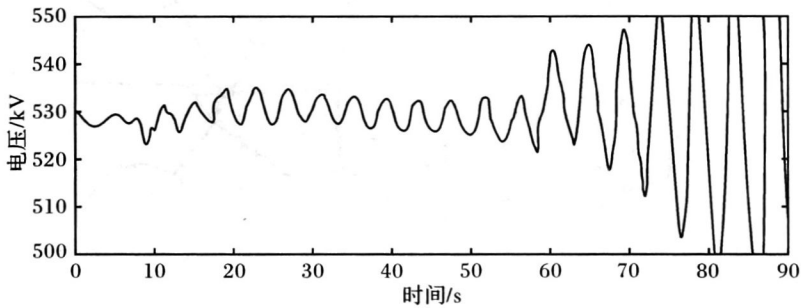


图 1-4 修改模型后仿真再现曲线

事实上,随着电网互联规模的不断扩大,电网运行特性变得复杂,如果对电网本身的特性认识不足,则运行安全存在较大风险。常规的方法是选用合理的电力系统模型及参数进行电网仿真计算,并依此分析电网运行的合理性,降低运行风险。但是,随着电网的发展和联网规模的逐渐扩大,电网动态特性日趋复杂,模型对于电网稳定分析的影响越来越敏感。由于目前对如何选择电力系统模型尚缺乏足够的科学依据,所选模型与实际电网的贴近程度也很难作出定量甚至定性的分析。

## 2. 2003 年 8·14 美加大停电<sup>[4]</sup>

美国东部时间 2003 年 8 月 14 日 16 时 11 分(北京时间 2003 年 8 月 15 日 4 时 11 分),以北美五大湖为中心的地区发生大停电事故。事故覆盖美国东部纽约州、密歇根州、俄亥俄州、马萨诸塞州、康涅狄格州、新泽西州北部等地区以及加拿大的安大略省等地区(图 1-5),是北美有史以来最大规模的停电事故。

事故导致 21 座电厂停运,其中包括位于美国四个州的九座核电厂。北美电