



电力系统低频振荡

分析方法与控制策略

杨培宏 著

非外借



电子科技大学出版社

电力系统低频振荡

分析方法与控制策略

常州大学图书馆藏书章 杨楠宏 著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

电力系统低频振荡分析方法与控制策略 / 杨培宏著.

— 成都 : 电子科技大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5647-5085-5

I. ①电… II. ①杨… III. ①电力系统—振荡—分析方法—研究 IV. ① TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 222266 号

电力系统低频振荡分析方法与控制策略

杨培宏 著

策划编辑 谭炜麟

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都新千年印制有限公司

成品尺寸 145mm×210mm

印 张 6.25

字 数 129 千字

版 次 2017 年 9 月第一版

印 次 2017 年 9 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5085-5

定 价 48.00 元

版权所有, 侵权必究

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电力系统低频振荡的研究意义和研究内容	2
1.2.1 电力系统低频振荡的研究意义	2
1.2.2 电力系统低频振荡的研究内容	3
1.3 低频振荡分析方法与控制策略的研究现状	5
1.3.1 低频振荡分析方法的研究现状	5
1.3.2 低频振荡控制策略的研究现状	14
1.4 本书研究的目的和意义	18
1.5 主要研究内容	19
第 2 章 基于 Prony 方法的电力系统低频振荡模态辨识	22
2.1 引言	22
2.2 Prony 方法的原理	23
2.2.1 Prony 方法的基本原理	23
2.2.2 数值仿真	25
2.2.3 小结	27
2.3 改进 Prony 方法的原理	27
2.3.1 基于奇异值分解的模型阶数估计	27
2.3.2 基于总体最小二乘的参数估计	29

2.3.3	实例分析	30
2.3.4	采样频率和时间序列长度对辨识结果的影响	33
2.3.5	时间序列长度估计	35
2.3.6	改进 Prony 方法与 FFT 方法比较	38
2.3.7	小结	40
2.4	改进 Prony 方法辨识低频振荡模态的应用	41
2.4.1	在线辨识低频振荡模态流程	41
2.4.2	算例分析	43
2.4.3	小结	49
2.5	本章小结	49
第 3 章	基于 HHT 方法的电力系统低频振荡模态辨识	51
3.1	引言	51
3.2	HHT 方法的原理与算法	52
3.2.1	EMD 分解的原理与算法	52
3.2.2	Hilbert 变换	54
3.2.3	EMD 数值仿真	55
3.2.4	小结	56
3.3	改进的 HHT 方法原理与算法	57
3.3.1	端点效应和模态混叠	57
3.3.2	一种解决端点效应和模态混叠的新方法	59
3.3.3	改进 HHT 方法的算法流程	62
3.3.4	两区域四机系统实例分析	68
3.3.5	小结	70
3.4	基于 EEMD 法的广域阻尼控制研究	70
3.4.1	EEMD 算法及仿真	71
3.4.2	基于 EEMD 算法的广域阻尼控制	73

3.4.3 小结	79
3.5 本章小结	79
第4章 基于 PSS 的电力系统低频振荡控制策略研究	81
4.1 引言	81
4.2 PSS 抑制低频振荡机理分析	82
4.2.1 PSS 的机理分析	82
4.2.2 PSS 抑制低频振荡的仿真分析	84
4.2.3 PSS 参数优化	91
4.2.4 小结	95
4.3 基于 PSS 的广域阻尼控制	95
4.3.1 基于 EEMD 和 Hilbert 变换提取低频振荡 模态	96
4.3.2 广域自适应阻尼控制器设计	97
4.3.3 算例分析	100
4.3.4 小结	103
4.4 PSS 与 TCSC 协调控制低频振荡	104
4.4.1 含 TCSC 及 PSS 的多机系统线性化方程的建立	105
4.4.2 基于改进遗传算法的阻尼控制器协调控制	109
4.4.3 应用实例	112
4.4.4 小结	114
4.5 本章小结	115
第5章 基于励磁控制抑制电力系统低频振荡策略研究	116
5.1 引言	116
5.2 基于反演变结构方法的电力系统自适应阻尼 控制器设计	117

5.2.1	反演变结构自适应阻尼控制器设计	118
5.2.2	仿真计算	124
5.2.3	小结	125
5.3	基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制	126
5.3.1	自适应逆推变结构数学模型	127
5.3.2	非线性励磁控制器设计	131
5.3.3	仿真计算	133
5.3.4	小结	135
5.4	发电机励磁控制与 TCSC 非线性最优控制研究	135
5.4.1	含 TCSC 多机电力系统精确线性化设计	136
5.4.2	最优控制器设计	140
5.4.3	算例分析	141
5.4.4	小结	143
5.5	发电机励磁控制与 TCSC 非线性协调控制	143
5.5.1	数学模型	144
5.5.2	非线性控制系统的线性化	146
5.5.3	协调控制器设计	149
5.5.4	仿真计算	150
5.5.5	小结	152
5.6	本章小结	152
第 6 章	总结与展望	154
参考文献		159

第1章 绪论

1.1 引言

电网互联可以合理利用资源,提供事故支援,因而极大地提高了发电和输电的经济可靠性,但它同时也带来了一些新的问题。电力系统运行在稳定极限边缘的风险急剧增加,使得互联电网的运行安全和稳定控制形势异常严峻^[1,2],其中,低频振荡问题是目前威胁互联电网安全稳定运行和制约电网传输能力的首要问题^[3,4]。如果得不到有效的抑制,将会引起连锁故障,造成大面积的停电^[5-7]。因此,充分认识低频振荡产生机理,科学合理制定控制策略,才能有效地抑制电力系统低频振荡的发生。

随着广域测量系统(Wide Area Measure System, WAMS)在电力系统的应用,基于广域实测信号的互联电力系统稳定分析和控制技术已成为研究复杂电力系统低频振荡特性的重要途径和技术手段,WAMS能够提供同一时标下电力系统各测量点处的实时状态信息,为此,使得基于实时测量信号分析低频振荡模态和抑制低频振荡成为新的研究热点,极大地丰富了低频振荡分析方法和控制策略的理论和技術,推动了低频振荡分析和控制策略向更高、更深层次发展^[8-12]。

在电力系统低频振荡分析与控制研究中,低频振荡模态特征

参数的精确分析是认识电力系统低频振荡现象的重要基础,也是制定控制策略的理论依据。本书应用改进的 Prony 方法和改进的 HHT(Hilbert-Huang Transform)方法进行电力系统低频振荡模态辨识,并将辨识结果作为优化 PSS 参数的理论依据,实现电力系统的广域阻尼控制,同时,本书也研究了非线性励磁控制以及非线性励磁控制系统与 TCSC 协调控制等策略实现电力系统低频振荡的抑制。

本章首先论述了电力系统低频振荡分析方法与控制策略的研究意义、研究内容;其次,进一步简述了低频振荡分析方法与控制策略技术的研究现状;最后,说明了本书研究的目的和意义,并简述了本书的主要研究内容。

1.2 电力系统低频振荡的研究意义和研究内容

1.2.1 电力系统低频振荡的研究意义

区域电网交直流互联和特高压输电系统将是我国未来电网格局的发展方向,到 2020 年将要建成“五纵六横”的格局,连接华北、华东和华中地区。然而特高压、长距离、重负荷输电很容易造成系统阻尼不足,特别是采用快速高放大倍数的励磁系统后,互联电网的阻尼可能被进一步恶化,极易引起区域间联络线上的功率产生低频振荡^[13]。低频振荡现象在大型互联电网中时有发生,成为威胁互联电网安全稳定运行、制约电网传输能力的重要因素之一。

最早报道的互联电力系统低频振荡是 20 世纪 60 年代,在北美 MAPP 的西北联合系统和西南联合系统试行互联时,发生了低频功率振荡,造成联络线过电流跳闸^[14]。随着电网规模的不断扩大,1996 年 8 月 10 日美国西部系统发生增幅低频振荡,导致大面积停

电^[15]。我国互联系统的低频振荡首次记录是在1984年,广东与香港联合系统运行中发现的^[16],随后发生过多多次低频振荡事件^[17],对系统稳定性以及电力设备造成了一定的威胁,如2005年9月1日华北电网发生内蒙古西部电网机组相对于主网的低频振荡,导致内蒙古万家寨电厂1#机,3#机相继跳闸^[18];2005年10月29日华中电网发生功率振荡,三峡电厂机组受到较大影响^[19]。

低频振荡如果得不到有效的抑制,很容易引起连锁故障,导致大面积的停电事故。大面积停电事故的发生,会造成巨大的经济损失,如2003年“美加8·14大停电”事故^[17,20]。低频振荡已对当今电力系统的安全性和可靠性提出了严峻的挑战,需要给予充分的重视。因此,本书从电力系统的实际需求出发,对电力系统低频振荡的分析方法和控制策略进行研究具有重要的意义。

1.2.2 电力系统低频振荡的研究内容

电力系统低频振荡一直受到广大学者的关注,研究内容主要包括:低频振荡分析方法和控制策略研究。

低频振荡分析是实现抑制低频振荡的理论依据和必要前提,在近二十年有了很大的发展,取得了大量的研究成果。研究低频振荡分析的主要方法有基于系统结构和参数模型的理论分析方法和基于仿真信号或实测信号的信号分析方法。理论分析法主要包括特征值分析法和非线性模式分析法,其中,特征分析法是研究电力系统低频振荡最为经典的分析方法,基本原理就是通过近似线性化的方式进行求解系统状态方程的特征值和特征向量,特征值对应着低频振荡模态,特征向量反映了振荡模态在系统中的行为。但是,特征值分析法需要建立电力系统的数学模型且只能在某一运行方式下进行分析,这对于大型互联电网而言,因其电网结构复杂、运行状况不确定而使得分析比较困难,算法效率和精度明显下

降。电力系统发生低频振荡时,状态变量直接包含着振荡信息,因此基于 WAMS 提供的实测数据辨识低频振荡模态得到了应用,能够从振荡信号中提取所需要的模态信息,包括振荡幅度、振荡频率、阻尼比以及相位,该方法为低频振荡的信号分析方法^[21]。信号分析法分析低频振荡模态时不需要依赖电力系统的数学模型,辨识结果的准确性只取决于信号处理方法。通过在线辨识低频振荡模态信息,能够快速分析和确定扰动源,实现广域阻尼控制策略^[22],信号分析法是本书主要研究的内容,包括 Prony 方法和 HHT 方法。

低频振荡分析方法的研究是合理制定低频振荡控制策略的关键,而采取控制策略抑制低频振荡是电力系统稳定运行的核心和目标,电力系统低频振荡不可避免,只能采取一些措施降低其影响,或通过这些措施使发生低频振荡的电力系统状态量尽快回到平衡点处,恢复稳定运行,减少对电力系统的影响。电力系统低频振荡属于电力系统动态稳定范畴,与发电系统、输电系统以及负荷均存在一定的关系,而负荷作为不可控因素,很难实现对低频振荡的抑制。为此,抑制低频振荡主要是通过通过在发电侧或输电侧增加附加控制为系统提供阻尼。发电侧控制,主要采用电力系统稳定器等附加励磁控制方案,发电机的励磁系统对于提高系统的稳定具有非常重要的作用,而且也是目前改善电力系统稳定性措施中,最为简单、经济而且有效的措施;输电侧控制,主要是采用直流输电的功率调制技术和柔性交流输电技术(Flexible AC Transmission System, FACTS),包括采用串联电容补偿或可控串联补偿(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)及直流输电方案^[23]、装设静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)等提供附加控制^[13,24]、增强网架,减少重负荷的输电线路^[25],或在发电侧与输电侧进行联合控制,如电力系统稳定器(Power System Sta-

bilizer, PSS)和 TCSC、PSS 和 SVC 联合抑制等^[4,26]。

总之,信号处理技术和控制技术的进展关系着电力系统低频振荡的发展,因此要时刻关注信号处理技术和控制技术的发展,把先进有效的信号处理方法和控制技术引入电力系统低频振荡分析和抑制中。

1.3 低频振荡分析方法与控制策略的研究现状

研究电力系统低频振荡的目的,就是要分析系统是否存在着弱阻尼振荡模态,并在系统中有弱阻尼振荡模式时,采取措施增强这些模式阻尼,以减少发生振荡可能,或者在产生振荡时,使其能尽快地平息振荡。

1.3.1 低频振荡分析方法的研究现状

电力系统低频振荡分析的目的就是提取出系统中存在的弱阻尼振荡模态,合理有效地提取振荡模态是实现低频振荡抑制的关键。因此,更精确、更全面地提取电力系统低频振荡模态是该领域科研工作者一直追求的目标。低频振荡分析方法主要有电气转矩法、频域法、特征值分析法、时域仿真法、正规形方法以及信号分析法。这些方法为低频振荡研究的开展提供了保障。

1.3.1.1 电气转矩法

电气转矩法是最早用于分析电力系统小干扰稳定性的实用方法。文献[27]首先采用电气转矩法详细分析了单机无穷大系统小干扰稳定性问题,后来又推广到简单多机系统^[28]。文献[29]成功将此方法应用于包含电力系统稳定器 PSS 以及基于 FACTS 的控制器的复杂电力系统。电气转矩法中一般采用同步发电机的 Heffron-Phillips 模型,而 Pourbeik 与 Gibbard^[30]结合特征值分析方

法,给出了采用基于状态方程的传递函数模型的分析方法,理论上更加完善。电气转矩法的关键是计算各种控制器在任一个同步发电机机电振荡回路中引起的阻尼转矩,从而定量刻画出控制器对系统振荡模态阻尼的影响,具有明确的物理意义,加深了对控制器作用的理解。电气转矩法的特点是计算复杂,而且不适于计算大型电力系统的振荡模态。

1.3.1.2 频域法

电力系统低频振荡属于小干扰动态稳定性范畴,能够在平衡点处近似线性化进行分析,将非线性问题转化为线性时不变动态问题进行研究。频域分析法非常适合分析线性时不变动态系统,具有强有力的分析工具。在电力系统低频振荡分析中,频率法主要用来设计抑制低频振荡控制器以及优化控制器参数,通过设计优化后,控制器能够提供合适的相位和幅值补偿,为系统提供充分的阻尼。对于 PSS 的设计,可以通过计算励磁系统输入与同步发电机电气转矩之间的频率响应,来确定 PSS 应补偿的相位^[31-32]。文献[33]根据频域分析法设计自动调整控制器参数进行相位补偿,能够达到最佳的控制效果。

频域法设计步骤规范,计算简单,控制器只采用本地信号,而且结构简单,易于工程实现。频域法最大的优点是控制器有很强的鲁棒性,能适应电力系统运行条件的较大变化,非常适合大型电力系统实际运行状况。另外,通过计算指定传递函数的频率响应,还能够辅助确定控制器的最佳安装地点。

当然,可以用频域法来判断系统稳定性,如 Nyquist 判据等,也可以估计关键振荡模态。然而,对于大型电力系统,频率响应的计算量非常大,速度上难以接受,而且提供的振荡模态信息也非常有限。

1.3.1.3 特征分析法

前面介绍的两种方法都不能有效地计算模式的定量信息,而特征值分析方法则是解决这一问题最有效的手段。特征值分析方法是建立在现代控制理论基础上,将电力系统非线性在平衡点处近似线性化,通过标准线性状态方程描述分析低频振荡,振荡模态完全由状态方程中特征矩阵的特征值和特征向量来确定,其中特征值能体现振荡模态的阻尼和振荡频率,特征向量则反映了振荡模态在整个电力系统中的行为^[34]。

特征分析法可以确定抑制低频振荡控制器的安装位置,只需在给定电网网架结构下计算控制器可能安装地点的定量指标,通过指标大小反映安装控制器对抑制低频振荡的效果。文献[35]将特征向量对应于发电机转速的分量作为指标进行研究 PSS 的安装位置,取得了一定的成果;文献[36]引入相对增益矩阵法应用于 PSS 安装位置的选择,该方法采用振荡模态的参与因子作为安装位置的指标,该指标包含了振荡模态的可观测性和可控性。目前也有传递函数留数作指标,它精确反映了控制器对模式的影响^[37]。同时,对 FACTS 装置的辅助阻尼控制器也采用这种指标^[38-39]。

特征值分析法也可用于控制器参数优化设计。由于特征值分析法可以方便地计算特征值对控制器参数的灵敏度,控制器参数的微小变化与特征值变化量之间的关系可近似用线性函数表达。通过给定合适的优化目标,控制器参数设计问题就转化成优化问题^[40-41]。这种设计方法可以方便地考虑系统多种运行条件、模型不确定性、多个振荡模态等复杂情况,存在的问题是可能会得到局部最优解。

特征分析法在实际工程中得到了应用,但关键技术在于可靠高效地计算特征矩阵的特征值,特征值比较经典的算法是 QR 算法^[3],但是该算法只适应于小规模电力系统,随着电力系统互联规

模的不断扩大,新设备的大量投运(如 FACTS 装置)且控制器也越来越复杂,使得状态矩阵的维数过大,存在维数灾问题,失去了适用范围。

超大规模系统特征值求解已取得了一定的成果,得到了很大的进展,主要求解方法有:Newton 和 Rayleigh 商迭代法^[42]、SMA 法^[43]、AESOPS 法^[44-45]、同时迭代法^[46-48]、Arnoldi 算法^[49]、Jacobi-Davidson 方法^[50]以及主极点迭代法^[51-52]等。这些方法对特征值分析法分析低频振荡起到了很大的作用,然而,特征分析法是建立在准确的系统模型基础上,模型参数的精度对分析结果有很大影响,同时,电力系统是强非线性形的复杂系统,在大扰动情况下,线性模式分析法存在较大的误差,另外,WAMS 在电力系统中广泛应用已成为趋势,而特征值分析方法计算速度慢,不能满足在线分析的需要。总之,以上这些都限制了特征分析法在现代大型互联电力系统中分析低频振荡的实用性,特别是构建智能电网。

1.3.1.4 时域仿真法

时域仿真法能模拟系统受扰动后,各个系统参量随时间变化的具体过渡过程,从而反映系统的稳定程度。对于电力系统小干扰稳定性分析,仿真模型可以用非线性微分方程描述,也可用其线性化模型,从仿真曲线可推算模态的频率与阻尼^[53-56]。然而,时域仿真法用于大型电力系统小干扰稳定性分析会遇到许多困难,甚至得出错误的结论。首先,不同系统变量的仿真曲线和扰动的形式、地点有关,而小干扰稳定性研究的是系统固有的性质,与扰动无关。一次扰动并不能保证激发全部的振荡模态,因此不得不改变扰动,多次仿真,而这也只能根据经验,不能从理论上保证其可靠性。其次,对于低频机电振荡现象,仿真时间必须足够长,同时大量系统参量要仿真,因此计算量很大。另外,任一条仿真曲线都包含了系统众多模式的动态,难以了解振荡模态在全系统中的

行为。最后,由于时域仿真法给出的振荡模态的定量信息非常有限,难以有效的设计控制器。

时域仿真法的优点是能充分考虑电力系统的非线性因素,对建模几乎没有限制,仿真曲线对电力工程师来说更熟悉,而且有成熟的软件可以使用。因此,时域仿真法最适合于检验其他分析方法的结果。

1.3.1.5 正规形方法

正规形理论是由法国数学家 Poincare 于 20 世纪 20 年代提出的,是简化常微分方程和微分同胚的重要工具,目前已在非线性动力系统、分叉理论等领域的研究中得到广泛应用^[57]。正规形分析可以将非线性向量场映射为一最简形式,极大地简化了实际问题的复杂性,由于这一特点,使其在电力系统稳定分析、低频振荡研究中被关注^[58-64]。

正规形理论首次被 V. Vittal 等人于 1996 年引入电力系统的低频振荡分析中,通过正规形理论分析了模态间的非线性相关作用对低频振荡控制器设计以及控制性能的影响,指出了基于线性化设计的抑制低频振荡控制器并未考虑非线性相关性,这样会弱化控制器性能,达不到最佳抑制性能^[65]。文献[66]通过正规形理论分析了在大扰动情况下互联振荡模态,指出了自然振荡模态的非线性相关能够引起区域间的振荡模态。文献[67]采用二阶分析了大型互联电力系统暂态响应中高阶项对振荡模态行为的影响,分析结果指出,与线性化分析方法相比,系统中存在更多频率的振荡模态,对系统响应产生较大的影响。而这些频率下的振荡模态就是源于线性模式的二阶相关作用,所以传统的线性化分析是不可能得到,文献[68-72]也采用非线性相关作用指标,研究了对低频振荡控制器性能的影响,其中文献[71,72]分析了 FACTS 装置间的交互式影响,包括 SVC 以及统一潮流控制器(Unified Power

Flow Controller, UPFC)。

正规形理论在电力系统中的应用也引起了我国电力科研工作者的关注,李颖晖、邓集祥等人首次系统地研究了正规形方法在电力系统稳定分析和低频振荡中的应用,取得了一定的研究成果^[58,73-84],其中,邓集祥分析了大扰动下系统的动态特性,指出了通过系统参数对非线性相关作用的灵敏度来辨识大扰动下的振荡模态的关键参数,以及控制模式与低频振荡模态间的非线性相关性,并指出了励磁调节器参数的改变会影响模式间的非线性相关性和系统的动态特性^[78-79,81],而李颖晖利用正规形法估计了电力系统的暂态稳定域^[82,84]。

用正规形方法研究电力系统低频振荡,得到的二阶解析解把大扰动下系统动态性能的研究和模式间的非线性相关作用联系在一起,便于分析和理解系统振荡的本质,可以识别出系统的主导振荡模式以及各振荡模式之间的强非线性相关作用,明确了这种非线性相关作用对系统动态特性的影响^[85-87],可为 PSS 的配置提供依据,特别是重载系统中^[88-89]。所以说,正规形方法的研究对电力系统低频振荡的分析和控制具有重要意义。

1.3.1.6 信号分析法

随着电力系统规模不断扩大、复杂度不断增加,基于电力系统数学模型的低频振荡分析方法受困于“维数灾”问题,同时系统的运行方式以及结构参数可能在随时发生着变化,导致全面精确地描述电力系统的数学模型变得非常困难,基于模型的分析方法会因电力系统模型参数不确定性的影响而显著下降。因此,对于现代互联电力系统,急需寻求一种不依赖数学模型的低频振荡分析方法,即基于信号的低频振荡分析方法逐步发展起来。

所谓信号分析法是基于仿真数据或实测数据而脱离电力系统数学模型的一种分析方法,隶属于信号处理方法,能够提取出低频