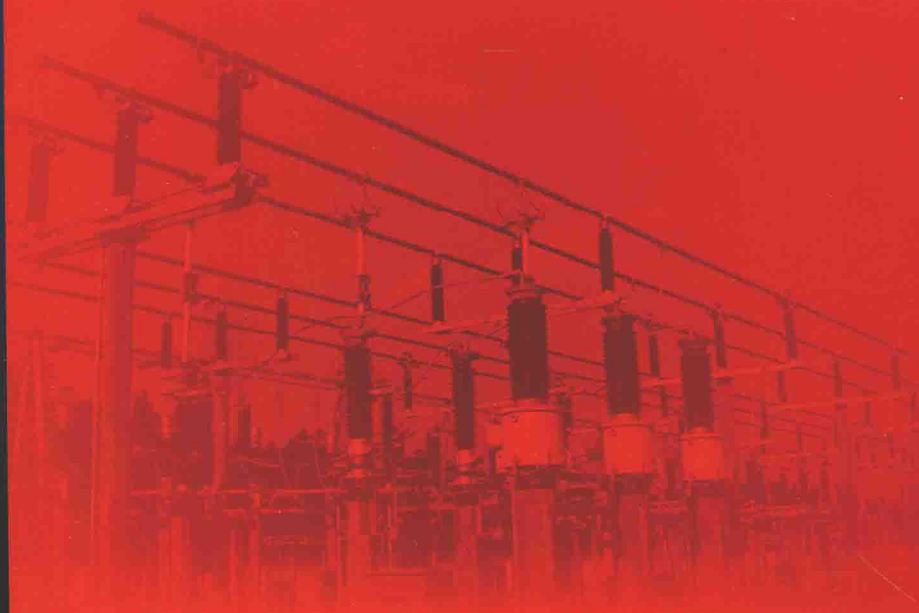


电力系统低频功率振荡阻尼 转矩分析理论与方法

杜文娟 王海风 著



科学出版社

电力系统低频功率振荡阻尼 转矩分析理论与方法

杜文娟 王海风 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍电力系统低功率振荡分析与阻尼控制中广泛应用的阻尼转矩分析法。首先以简单的单机无穷大电力系统为背景,介绍阻尼转矩分析的基本理论及应用于电力系统稳定器的原理;然后介绍阻尼转矩分析理论和方法在灵活交流输电系统控制中的应用;随后介绍阻尼转矩分析理论和方法在复杂多机电力系统中的推广;最后介绍阻尼转矩分析理论和方法研究的最新进展,即图形解释法及其在新能源接入电力系统中的应用。

本书可供电力系统领域科研人员、工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统低功率振荡阻尼转矩分析理论与方法/杜文娟,王海凤著. —北京:科学出版社, 2015.3

ISBN 978-7-03-043746-4

I. ①电… II. ①杜… ②王… III. ①电力系统-阻尼矩阵-研究 IV. ①TM43-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 051499 号

责任编辑:孙 芳 余 丁 邢宝钦/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩/封面设计:蓝 正

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

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:422 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力系统低频功率振荡严重威胁着电力系统安全稳定运行,是一个长期未得到有效解决的复杂工程科学问题。目前电力系统低频振荡分析理论与控制方法主要有两类:阻尼转矩分析和模式分析。阻尼转矩分析是 deMello 和 Concordia 对电力系统稳定性理论与实践发展作出的奠基性贡献。1969 年,他们合作的论文 *Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control* 在 *IEEE Transaction on Power Apparatuses and Systems* 发表,提出了阻尼转矩分析的基本概念与原理。随后在 1981 年, Larsen 和 Swann 在同一期刊上发表了著名的论文 *Applying power system stabilizers Part I-III*,对阻尼转矩分析基础上提出的稳定器相位补偿设计法进行了总结性的介绍,是电力系统稳定性理论与实践发展的里程碑。几十年来,阻尼转矩分析以其清晰的物理概念和简单实用的特点,在电力系统稳定控制工程实践中广泛应用。

自 20 世纪 60 年代末以来,电力系统低频振荡分析与控制的研究取得了许多成果,我国电力科技工作者在这一研究领域也作出了重要贡献。本书集王海风教授早期应用阻尼转矩分析对灵活交流输电系统展开研究的成果,结合作者推广阻尼转矩分析到一般多机电力系统,并用于研究储能系统和新能源接入的最新进展,系统介绍电力系统低频功率振荡阻尼转矩分析理论与方法。全书共 10 章。第 1 章综述电力系统低频功率振荡分析与控制研究的基本概念和问题。第 2 章结合作者对 deMello、Concordia、Larsen 和 Swann 工作的理解,介绍单机无穷大电力系统中实施阻尼转矩分析和电力系统稳定器相位补偿设计的基本原理。第 3~5 章介绍阻尼转矩分析应用于单机无穷大灵活交流输电系统稳定性分析与控制的方法。其中,第 3 章专注于晶闸管控制型的灵活交流输电装置;第 4 章和第 5 章介绍电压源变换器控制型的灵活交流输电装置。第 6 章和第 7 章介绍阻尼转矩分析在多机电力系统中的推广。第 8 章和第 9 章介绍作者近年来提出的阻尼转矩分析的图形解释原理与应用。第 10 章介绍阻尼转矩分析在新能源接入电力系统中的应用,这是作者近年来的主要研究方向和取得的初步研究成果。总之,本书介绍的内容在时间上跨越近半个世纪直至当代,充分显示了阻尼转矩分析理论与方法发展的持久生命力。希望本书可以对进一步推广阻尼转矩分析理论与方法起到一点作用,能让更多关注电力系统稳定性问题的科技工作者对阻尼转矩分析产生兴趣。

作者的部分研究工作及本书的撰写和出版得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“智能电网中大规模新能源电力安全高效利用基础研究”(项目

编号：2012CB215200)、国家自然科学基金青年基金项目“风电场虚拟惯性控制影响电力系统功角稳定性机理研究”(项目编号：51407068)及华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室重点项目的资助，研究生曹军、葛毅、蔡辉、毕经天、姚亦章、颜泽远、吴锡昌、苏田宇等参加了本书部分电力系统举例计算、验证和文字编辑工作，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。ddwenjuan@gmail.com。

杜文娟

2014年夏于北京

目 录

前言

第 1 章 电力系统低频功率振荡分析与阻尼控制	1
1.1 电力系统低频功率振荡	1
1.2 电力系统低频振荡分析	3
1.3 电力系统低频振荡阻尼控制	5
1.4 基于电压源换流器的电力系统稳定器	8
1.5 可再生能源电源接入对电力系统振荡稳定性的影响	10
参考文献	11
第 2 章 单机无穷大电力系统阻尼转矩分析——电力系统稳定器	18
2.1 装有电力系统稳定器的单机无穷大电力系统 Phillips-Heffron 线性化模型 ..	18
2.1.1 同步发电机数学模型	18
2.1.2 同步发电机简化模型	19
2.1.3 发电机励磁系统与自动电压调节器模型	20
2.1.4 装有电力系统稳定器的单机无穷大电力系统简化模型	22
2.1.5 装有电力系统稳定器的单机无穷大系统 Phillips-Heffron 线性化模型	25
2.2 阻尼转矩分析法和电力系统稳定器设计	27
2.2.1 阻尼转矩分析法	27
2.2.2 阻尼转矩分析法的理论依据	29
2.2.3 采用相位补偿法设计电力系统稳定器	31
2.3 举例	34
2.3.1 系统及模型	34
2.3.2 阻尼转矩分析	36
2.3.3 电力系统稳定器设计	40
参考文献	45
第 3 章 单机无穷大电力系统阻尼转矩分析——晶闸管控制型的灵活交流输电装置 ..	46
3.1 装有 SVC 稳定器的单机无穷大电力系统扩展 Phillips-Heffron 模型 ..	46
3.1.1 装有 SVC 稳定器的单机无穷大电力系统的非线性数学模型	46
3.1.2 扩展 Phillips-Heffron 线性化模型	48
3.1.3 考虑 SVC 电压和阻尼控制功能的扩展 Phillips-Heffron 模型	50

3.1.4 初始补偿计算	52
3.2 SVC 稳定器阻尼转矩分析	55
3.2.1 SVC 稳定器提供的电磁转矩	55
3.2.2 线路潮流的影响	56
3.2.3 发电机参数的影响	57
3.2.4 输电线路长度的影响	58
3.2.5 SVC 装设地点的影响	60
3.3 采用相位补偿法设计 SVC 稳定器	61
3.4 举例——SVC 稳定器	68
3.4.1 系统线性化模型	68
3.4.2 SVC 稳定器控制分析	73
3.5 装有晶闸管控制串联补偿器或晶闸管控制移相器的单机无穷大电力系统扩展 Phillips-Heffron 模型	76
3.5.1 装有晶闸管控制串联补偿器的单机无穷大电力系统扩展 Phillips-Heffron 模型	76
3.5.2 装有晶闸管控制移相器的单机无穷大电力系统扩展 Phillips-Heffron 模型	78
3.6 TCSC 与 TCPS 稳定器的阻尼转矩分析	81
3.6.1 TCSC 与 TCPS 稳定器提供的阻尼转矩	81
3.6.2 TCSC 稳定器提供的阻尼转矩	82
3.6.3 TCPS 稳定器提供的阻尼转矩	84
参考文献	85
第 4 章 单机无穷大电力系统阻尼转矩分析——静止同步补偿器或储能系统	86
4.1 装有静止同步补偿器或储能系统的单机无穷大电力系统数学模型	86
4.1.1 静止同步补偿器与储能系统模型	86
4.1.2 装有静止同步补偿器或储能系统的单机无穷大电力系统非线性模型	89
4.1.3 装有静止同步补偿器或储能系统的单机无穷大电力系统的线性化 Phillips-Heffron 模型	92
4.2 静止同步补偿器和储能系统电压控制阻尼转矩分析	97
4.2.1 静止同步补偿器和储能系统提供的电磁转矩	97
4.2.2 静止同步补偿器、储能系统交流电压控制环节及直流电压控制对系统振荡阻尼的影响	100
4.3 静止同步补偿器和储能系统的附加阻尼控制	102
4.3.1 发电机发出的有功功率	102
4.3.2 静止同步补偿器和储能附加系统阻尼控制阻尼转矩分析	105
4.4 举例 1——装有静止同步补偿器的单机无穷大系统	107
4.4.1 静止同步补偿器交流控制和直流控制	107

4.4.2 静止同步补偿器的附加阻尼控制	112
4.5 举例 2——装有储能系统的单机无穷大系统	112
4.5.1 储能系统的交流电压控制和直流电压控制	113
4.5.2 储能系统的附加阻尼控制	116
参考文献	119
第 5 章 单机无穷大电力系统阻尼转矩分析——静止同步串联补偿器和统一潮流控制器	120
5.1 装有静止同步串联补偿器的单机无穷大电力系统	120
5.1.1 装有静止同步串联补偿器的单机无穷大电力系统模型	120
5.1.2 装有静止同步串联补偿器的单机无穷大电力系统扩展 Phillips-Heffron 模型	123
5.1.3 SSSC 稳定器的设计	126
5.1.4 举例——装有静止同步串联补偿器的单机无穷大电力系统	129
5.2 装有统一潮流控制器的单机无穷大电力系统	133
5.2.1 统一潮流控制器的动态模型	133
5.2.2 装有统一潮流控制器的单机无穷大电力系统的非线性模型	136
5.2.3 装有统一潮流控制器的单机无穷大系统的线性化模型	138
5.2.4 选择统一潮流控制器阻尼控制信号的附加方式	145
5.2.5 电力系统运行点变化时阻尼控制的鲁棒性	147
5.2.6 举例——装有 UPFC 稳定器的单机无穷大电力系统	149
参考文献	155
第 6 章 装有电力系统稳定器的多机电力系统阻尼转矩分析	156
6.1 多机电力系统 Phillips-Heffron 模型	156
6.2 举例——建立线性化模型	161
6.2.1 状态变量初始值的计算	162
6.2.2 线性化模型	163
6.3 电力系统稳定器阻尼转矩分析及安装地点和反馈信号的选择	167
6.4 举例——两机电力系统稳定器安装地点选择	172
6.5 多机电力系统中电力系统稳定器的协调设计	177
6.6 多机电力系统中电力系统稳定器非负交互影响设计	179
参考文献	182
第 7 章 多机电力系统阻尼转矩分析——灵活交流输电装置	183
7.1 装有晶闸管控制型灵活交流输电稳定器的多机电力系统线性化数学模型	183
7.1.1 装有静止无功补偿器的多机电力系统线性化数学模型	183
7.1.2 装有晶闸管控制串联补偿器的多机电力系统线性化数学模型	187

7.1.3 装有晶闸管控制移相器的多机电力系统线性化数学模型	191
7.2 装有静止同步补偿器或储能系统的多机系统线性化数学模型	193
7.2.1 多机电力系统数学模型	193
7.2.2 装有静止同步补偿器或储能系统的多机电力系统	194
7.2.3 装有静止同步补偿器或储能系统的多机电力系统线性化模型	197
7.2.4 阻尼转矩分析	200
7.3 举例 1——静止同步补偿器	203
7.4 举例 2——储能系统	208
参考文献	217
第 8 章 阻尼转矩分析的图形解释及其应用——单机无穷大电力系统	218
8.1 阻尼转矩分析的图形解释	218
8.2 STATCOM 控制对电力系统振荡稳定性影响	223
8.2.1 理论分析	223
8.2.2 举例	229
8.3 BESS 控制对电力系统振荡稳定性的影响	234
8.3.1 理论分析	234
8.3.2 举例	240
参考文献	245
第 9 章 阻尼转矩分析的图形解释及其应用——多机电力系统	246
9.1 多机电力系统中阻尼转矩分析图形解释原理的推广应用	246
9.1.1 多机电力系统中线路功率振荡的线性化表达式	246
9.1.2 多机电力系统中稳定器向线路功率振荡提供正阻尼分量的形式	249
9.1.3 稳定器就地相位补偿设计	251
9.2 多机电力系统中 PSS 就地设计的相位补偿法	252
9.3 基于电压源变换器的电力装置的局部线性化模型	259
9.3.1 DC/AC 电压源变换器电压控制的线性化模型	259
9.3.2 DC/AC 电压源变换器的线性化动态方程	261
9.3.3 DC/AC 电压源变换器接口电压的线性化变量	263
9.3.4 与线路功率变化相关联的线性化模型	266
9.4 燃料电池电厂稳定器设计	269
9.4.1 固态氧化物燃料电池电厂的动态模型	269
9.4.2 与线路功率变化相关联的燃料电池电厂的局部线性化模型	272
9.4.3 使用就地补偿法设计附加稳定器实例	275
9.4.4 接有燃料电池电厂的多机电力系统全系统的线性化模型	279
9.5 多机电力系统中储能系统稳定器控制的鲁棒性分析	281

9.5.1 多机电力系统中与线路功率变化相关联的储能系统局部线性化模型	282
9.5.2 储能系统稳定器控制的鲁棒性分析	284
9.5.3 举例	287
参考文献	294
第 10 章 新能源接入单机无穷大电力系统阻尼转矩分析	296
10.1 光伏发电厂接入电力系统阻尼转矩分析	296
10.1.1 光伏发电厂非线性动态模型	296
10.1.2 有光伏发电厂接入的单机无穷大电力系统动态模型	298
10.1.3 光伏发电厂影响电力系统振荡稳定性的阻尼转矩分析	304
10.1.4 举例	306
10.2 风电场接入电力系统阻尼转矩分析	311
10.2.1 双馈感应发电机的动态模型	311
10.2.2 双馈感应发电机控制系统模型	313
10.2.3 风电厂简化动态模型	316
10.2.4 风电厂接入单机无穷大电力系统	319
10.2.5 风电厂接入单机无穷大电力系统的线性化模型	320
10.2.6 风电厂提供的阻尼转矩	327
10.2.7 举例	332
参考文献	334

第 1 章 电力系统低频功率振荡分析与阻尼控制

1.1 电力系统低频功率振荡

电力系统低频功率振荡是发生在电力系统中的一种有功功率振荡，振荡频率通常在 $0.1\sim 2\text{Hz}$ 。近年来有学者认为，这种低频振荡可能与电力系统的非线性密切相关，或者是由系统中的某些特定干扰所造成的一种强迫振荡。但目前较为普遍的观点认为：电力系统低频功率振荡是电力系统机电振荡模式阻尼缺乏的结果^[1-3]。本书介绍的工作是在这一观点的基础上展开的。为叙述简便，电力系统低频功率振荡在本书中简称为电力系统低频振荡或低频振荡。

电力系统低频振荡可能在系统遭受大干扰（如三相接地短路、输电线跳闸故障等）时发生，也可能在系统稳态运行情况下由小干扰而诱发。因此，电力系统低频振荡既属于大干扰功角稳定性问题，又属于小干扰功角稳定性问题^[4]。为叙述方便，本书将其统称为电力系统低频振荡稳定性问题，或简称为电力系统振荡稳定性。如果电力系统低频振荡发生后，虽持续一段时间但最终能够平息，那么可认为这是系统振荡稳定的情况；如果低频振荡发生后，振荡幅值不断增加，最终导致电力系统崩溃，那么可认为这是系统振荡不稳定的情况。对于系统振荡稳定的情况，若振荡能够很快平息（系统机电振荡模式阻尼比大于 0.1 ），则一般可以认为系统振荡有较好的阻尼；若振荡持续数秒以上甚至几十秒才能平息，则认为系统振荡呈现弱阻尼，此时系统机电振荡模式阻尼比远小于 0.1 ，这种弱阻尼的情况是不满足电力系统稳定运行要求的^[1-3]。

1964 年 10 月，美国西北电网和西南电网两个区域电网联合试运行时，在其联络线上观测到一个频率为 0.1Hz 的持续功率振荡^[5]，这是世界上最早见诸报道的电力系统低频振荡事故。此后，许多实际电力系统曾出现电力系统低频振荡问题。

(1) 20 世纪 80 年代，英国电网在连接苏格兰电网和英格兰电网的输电通道上多次发生频率为 0.5Hz 的低频振荡。为了寻找低频振荡发生的原因和解决办法，在 1980~1985 年英国国家电网公司进行了一系列有针对性的现场实验。结果表明，当该输电通道的负载增加到一定程度时，低频振荡就会出现。后来，在苏格兰电网的各个电厂装设了电力系统稳定器（power system stabilizer, PSS），才使这一低频振荡问题得到了一定程度的解决^[6]。

(2) 文献[7]报道了 1984 年在中国台湾电网中发生的一起持续低频振荡事故。低频振荡发生在用电低谷时段, 一条承担重负荷输送任务的高压输电线出现了持续低频功率振荡现象。后续研究发现: 降低输电线负荷或者在合适地点装设电力系统稳定器可以有效地解决这个低频振荡问题^[7]。

(3) 1996 年 8 月 10 日美国西部电力系统 (Western Systems Coordinating Council, WSCC) 发生了一起严重的大停电事故。事后调查表明: 事故发生的主要起因是电力系统低频振荡。当时系统处于输电线过负载、低电压运行的恶劣条件, 一条 500kV 输电线跳闸激发了一个 0.23Hz 的区域振荡模式的低频功率振荡; 随后, 事故很快扩散, 更多的输电线和发电机组相继跳闸, 最后导致全系统解列成 4 个孤岛电网。此次大停电持续了 9 个多小时, 波及 750 万用户, 造成了无法估计的经济损失^[8]。

随着我国电网规模的日益扩大、大容量机组在电网中的不断投运以及快速励磁的普遍使用, 低频振荡自 20 世纪 80 年代以来就开始在我国电网中不断出现。1984 年广东电网与香港电网联合运行时观测到弱阻尼低频功率振荡现象, 这是我国互联电力系统发生低频振荡的首次记录。在随后的三十年中, 我国华南、西南、华中、华北、东北等互联系统中均发生过多次低频功率振荡, 对我国电网的安全运行造成了极大威胁^[9-16]。目前我国跨区互联电网正处在发展期, 电网联系较薄弱, 主要跨区联络线输送功率接近限额, 加之部分设备陈旧落后, 而一些新投入的跨区联网工程正处在设备故障率较高的时期, 总体来看, 大区电网的安全运行仍然处于相对困难的时期, 安全稳定问题尤为突出。所以, 电力系统低频振荡稳定问题在我国仍然是一个任重道远、需要研究和解决的重要课题。

在过去的四十多年里, 无数电力系统科研和工程人员致力于电力系统低频振荡问题, 期望揭示其本质并得到行之有效的解决办法。在已有研究成果的基础上, 对机电振荡模式阻尼缺乏所造成的低频振荡的发生原因已经达成一定共识, 认为低频振荡的发生一般与如下因素有关^[1-3, 17-21]:

- (1) 大规模远距离输电。
- (2) 大区域电力系统的弱连接。
- (3) 高增益快速励磁系统的应用。

按照涉及的电力系统机电振荡模式的不同, 将低频振荡分为如下几种:

- (1) 局部低频振荡 (与局部机电振荡模式相关)。
- (2) 区域间低频振荡 (与区域间机电振荡模式相关)。
- (3) 多机低频振荡 (与多机机电振荡模式相关)。

与局部机电振荡模式相关联的电力系统局部低频振荡是指一台或者一组发电机相对于一个较大规模电力系统而发生的低频功率振荡, 通常发生在一个发电厂远距离连接到大电网的输电线路路上, 振荡频率一般为 1~2Hz。与区域机电振荡模

式相关联的区域间低频振荡通常发生在连接两个区域电网的联络线上。它是系统中两个区域间的功率低频振荡，振荡频率比局部低频振荡的频率更低。多机低频振荡是电网中处于不同地点的多台（组）发电机共同参与的低频振荡，是电力系统低频振荡较复杂的情况。

1.2 电力系统低频振荡分析

电力系统低频振荡分析的目的是探讨系统发生功率振荡的机理，发现原因和寻找对策。电力系统本质上是非线性的，其数学模型自然也是非线性的。因此，在研究电力系统低频振荡问题的诸多方法中，目前最常用的是计算机仿真方法。但是，计算机仿真方法耗时较长，而且它并不是一种具有“解析”意义的分析方法。分析方法的优越之处不仅在于可以研究低频振荡是如何发生的，还可以揭示其发生的原因，为寻找有效的解决方法提供理论指导。与计算机仿真方法相同，实验室和现场实验方法所获得的结果一般不具备普遍适用性，只能用来佐证分析结论。

目前，常用的电力系统低频振荡分析方法是线性化方法，即在电力系统的线性化模型上展开分析的方法。线性化方法能够实现以下功能：

- (1) 判断系统是否振荡稳定、稳定程度如何（阻尼的多少）。
- (2) 寻找和分析发生低频振荡的原因。
- (3) 为研究有效抑制低频振荡的措施提供指导。

当然，这种建立在线性化模型上的分析方法应该仅适用于与电力系统小干扰功角稳定性相关的低频振荡问题。但在研究和实践中人们发现：系统非线性动态响应与线性化分析获得的结果在大多数情况下是相同的。因此，目前线性化分析方法仍然是研究电力系统振荡稳定性问题的最常用方法，它主要包括两种：阻尼转矩分析方法和模式分析法。

阻尼转矩分析方法最早是针对单机无穷大电力系统提出的，主要目的是研究励磁控制对系统小干扰功角稳定性的影响^[22]。该方法提出的基础是单机无穷大电力系统的线性化 Phillips-Heffron 模型^[23]，分析对象可以是系统中的各种控制装置（如励磁控制、电力系统稳定器等），分析的基本步骤是：首先计算控制装置向发电机电振回路提供的电磁转矩，然后将电磁转矩分解成阻尼转矩和同步转矩两部分；同步转矩与发电机功角变化成正比，阻尼转矩与发电机转速变化成正比；正阻尼转矩表明控制装置对电力系统振荡稳定性是有利的，向系统低频振荡提供正阻尼；而负阻尼转矩表明控制装置对电力系统振荡稳定性是不利的，会导致系统低频振荡阻尼不足或发散。阻尼转矩分析建立在发电机转子运动所承受的电磁

转矩这一物理概念之上,理论依据是经典控制理论。因此,它易于理解、便于应用。在一些合理的假设前提下,使用阻尼转矩分析常可以得到一般性的理论分析结果,从而加深对研究问题的理解。所以,自 20 世纪 70 年代以来,许多研究工作致力于将阻尼转矩分析方法推广应用于多机电力系统。其中,以 Gibbard^[24-28]和 Wang^[29-34]的工作具有一定的代表性。

Gibbard 的研究工作是以传递函数框图分析多机电力系统中阻尼转矩的分配情况。在其分析过程中,当系统中发电机数量较多时,需要将所有发电机之间的动态联系表现在框图中,这样形成的框图就太过复杂。因此,为了简化分析,在 Gibbard 的早期工作中,只针对多机电力系统中的某台发电机展开阻尼转矩分析,获得阻尼转矩分配的数学表达形式^[24, 25],并揭示多机电力系统中发电机的动态联系对阻尼转矩分配的影响。例如, Gibbard 的研究清晰地显示:多机系统中的某台稳定器(电力系统稳定器)并非仅对安装地点的发电机提供阻尼转矩,还会通过该发电机与系统中其他发电机之间的动态联系,向其他发电机提供阻尼转矩。所以,在多机系统中协调设计多台稳定器(电力系统稳定器)时,就应该关注各台发电机分配的所有阻尼转矩之和。在研究多机系统中灵活交流输电(flexible AC transmission systems, FACTS)稳定器的阻尼控制作用时, Gibbard 将阻尼转矩分析法建立在传递函数矩阵框图的基础之上,并且涉及发电机分配的阻尼转矩对于振荡模式阻尼的影响。该分析包含了两个部分:一部分是 FACTS 稳定器向每台发电机所提供的阻尼转矩;另一部分是各台发电机获得的阻尼转矩对某个振荡模式阻尼影响的总和^[26-28]。

Wang 的研究工作是在 Phillips-Heffron 模型的基础上,将阻尼转矩分析法扩展到多机电力系统。Wang 早期的一项研究工作是基于静态无功补偿器(static var compensator, SVC)的阻尼控制:针对装有 SVC 稳定器的多机电力系统,建立了矩阵形式的 Phillips-Heffron 模型^[29]。在此基础上, Wang 分析得到的结论是:多机系统中的 SVC 稳定器向每一台发电机提供阻尼转矩,进而影响系统中每一个振荡模式的阻尼。这个结论与 Gibbard 获得的结论非常相似:在一个多机电力系统中,阻尼转矩分配的全景应该是稳定器向每台发电机提供阻尼转矩,进而通过发电机影响振荡模式的阻尼。Wang 后来对其他类型 FACTS 稳定器的分析也得到了相同的结论^[30-34]。文献[30]还专门给出了一个阻尼转矩分配的全景演示图,简单、清晰地说明了多机系统中的 FACTS 稳定器是如何影响系统机电振荡模式阻尼的。

模式分析(modal analysis)方法的基础是模式控制理论,它是现代控制理论的一个分支^[35]。模式分析是建立在线性系统的状态空间模型之上的。应用模式分析研究电力系统振荡稳定性问题的主要内容包括:①计算状态矩阵 A 的特征值和特征向量,从而获得电力系统的机电振荡模式(oscillation mode)及模态(mode shape);②计算稳定控制的可控性指标、可观性指标和残差,从而预测稳定控制

对电力系统振荡稳定性的影响,为稳定器的设计提供指导。模式分析在单机和多机系统中的应用步骤并没有太大区别,只是对于大规模多机电力系统,当状态矩阵的维数很高时,矩阵特征值计算将遭遇数值计算困难,这将给机电振荡模式的辨识造成不便。

模式分析计算是目前研究电力系统振荡稳定性问题的最流行方法,被工程和研究人員广泛使用,也已成为诸多电力系统分析专用软件的标准工具。模式分析法不仅可以用于研究系统的振荡稳定性,还可以用于设计电力系统稳定器以提高系统的振荡稳定性。模式分析法有许多优点,但也不可避免地存在若干缺陷。

(1) 模式分析依赖数值计算,据此的确可以判断该系统在目前的运行状况下是否振荡稳定,但仅由计算结果并不能得出普适性的分析结论。因此,严格地讲,模式分析法只是一种依赖计算的案例型研究方法。

(2) 模式分析的基础是模式控制理论,计算结果和物理概念之间的关系有时并不清楚。因此,一般而言,模式分析用于解决“怎么办”(how)的问题时更加有效,对于“为什么”(why)的问题常显得无能为力。

作者认为模式分析是一种“黑箱”方法,在给定某个输入(如系统运行点、稳定器某个参数等)后,可以方便地由模式分析计算获得输出(如系统机电振荡模式及模态等)。但是为什么能够获得如此对应的输入、输出结果?这些结果的物理意义又是如何?此类问题常需要另外加以探讨。与之不同,阻尼转矩分析经常能够给出明确的物理意义,据此可以得到具有一般性指导意义的理论分析结果。但是阻尼转矩分析方法在多机电力系统中的推广和应用仍有待进一步简化,特别是在稳定器设计方面,需要进一步深入研究。

1.3 电力系统低频振荡阻尼控制

自20世纪70年代以来,许多理论研究和工程实践已经证实:在发电机励磁系统上附加装设电力系统稳定器,是一种提高系统振荡稳定性的有效方法。目前绝大多数的实际电力系统中均装有大量的电力系统稳定器。发电机达到一定容量,就需要装设电力系统稳定器,这已经成为一种工程实践标准。但是实践中也已发现:对于某些电力系统,即使装设大量电力系统稳定器,仍会出现低频振荡问题。这表明安装电力系统稳定器并不能完全解决电力系统的振荡稳定性问题。一个较为典型的例子是电力系统联络线上发生的低频振荡。如果联络线附近没有电厂,那么在距离联络线较远的电厂装设电力系统稳定器,有时并不能有效抑制联络线上的低频功率振荡。所以,当灵活交流输电(FACTS)在20世纪90年代开始在工程中广泛应用以后,附加其上的FACTS稳定器的研究与应用立即得到了广泛关

注^[36]。电力系统中装设 FACTS 装置往往是为了实现潮流控制、电压支撑等,因此其装设地点常是系统中的关键电气位置,例如,在联络线上或附近,而不是在发电机上。这使其不但成为一种新的振荡稳定性控制手段,而且有时会取得电力系统稳定器所无法达到的稳定控制效果。此外,在 FACTS 装置上附加安装 FACTS 稳定器,所需成本和技术与传统的电力系统稳定器相比并无太大区别。目前的电力系统低频振荡控制装置主要是电力系统稳定器和 FACTS 稳定器,前者已获得广泛应用,后者也得到了较为深入的研究。

电力系统低频振荡控制设计的诸多方法中,最早提出和应用最成功的当属相位补偿法。相位补偿法是根据阻尼转矩分析理论提出的,基本思想是整定电力系统稳定器的参数以保证电力系统稳定器向发电机的机电振荡环提供足够的阻尼转矩^[37-39]。对于单机无穷大电力系统中的电力系统稳定器设计,相位补偿法原理简单、易于理解、物理概念清晰和应用简便,在实际工程中已广泛使用。但是,几十年以来阻尼转矩分析并未成功推广应用于多机电力系统。所以,相位补偿法(包括后来提出的应用相位补偿法设计 FACTS 稳定器^[36])一直是针对单机无穷大电力系统模型实施的。

多机电力系统中稳定器(电力系统稳定器和 FACTS 稳定器)的设计主要包括两项工作:①在多机电力系统中为稳定器选择合适的安装地点和反馈信号;②在多机电力系统中整定稳定器的参数。目前,完成这两项工作可以选择的主要方法仍然是阻尼转矩分析法与模式分析法。

在一个多机电力系统中,为电力系统稳定器和 FACTS 稳定器选择合适的安装地点,其实际应用背景略有不同。对于电力系统稳定器,就是考虑电力系统稳定器安装在系统中的哪台发电机或者发电机组上,从而使之有效地阻尼某个指定的振荡模式;如果系统中所有发电机上均已装设电力系统稳定器,那么选择电力系统稳定器合适安装地点的工作实际上就是选择整定哪台发电机上电力系统稳定器的参数,以便有效地阻尼指定的振荡模式。对于 FACTS 稳定器,由于 FACTS 装置本身造价高昂,其安装地点的选择往往首先考虑实现 FACTS 装置潮流或电压控制的基本功能,而不是 FACTS 装置的稳定控制功能。因此,在一个电力系统中,为 FACTS 稳定器选择合适的安装地点,实际上是指在系统中哪一台 FACTS 装置上附加稳定器,从而最有效地抑制某个指定的振荡模式。

如果在选择稳定器安装地点时,不考虑上述实际应用背景,那么对于电力系统稳定器和 FACTS 稳定器,在选择安装地点时所采用的理论和方法是没有区别的。在稳定器合适安装地点选择的各种方法中,以阻尼转矩分析理论为基础的主要指标有阻尼和同步转矩系数指标(induced damping and synchronizing torque coefficient, IDSTC)^[29]、阻尼转矩系数指标^[40]、简单指标^[41]、阻尼指标^[42]等。以模式分析法为理论基础也有许多行之有效的方法^[43, 44],如较为著名的灵敏度

计算^[45]、参与性因子^[46-49]、有效阻尼地点指标(location index for effective damping, LIED)^[50]、残差指标^[51]等。使用模式分析法选择稳定器安装地点时,为了降低计算量以尽快得到计算结果,还提出了降阶方法^[52, 53]、部分模式分析法^[54]和近似模式分析法^[55]等。

在选择稳定器的反馈信号时,可供选择的局部信号有发电机角速度、线路有功功率、线路电流等。从理论上讲,稳定器反馈信号的选择与安装地点的选择是没有本质区别的。所以,已提出的各种稳定器安装地点的选择方法通常均可用于选择稳定器的反馈信号。但是,某些时候两种情况使用的着重点会有所不同。例如,在使用残差指标时^[51],安装地点的选择使用残差指标中的可控性因子,而反馈信号的选择则依赖残差指标中的可观性因子。近年来,使用远程反馈信号设计广域稳定器的研究工作得到了广泛关注^[56-58],重点之一就是如何选择稳定器的远程反馈信号。

需要指出的是,在多机电力系统中,无论选择稳定器的安装地点还是选择稳定器的反馈信号,均认为稳定器尚未安装,所以系统是开环的。因此,选择稳定器安装地点和反馈信号一概依据电力系统的开环数学模型,选择工作就是预计系统装设稳定器后的阻尼控制效果。后来的研究证明,在选择稳定器安装地点和反馈信号时,阻尼转矩分析法与模式分析在理论上是等效的^[59, 60]。

在多机系统中整定稳定器参数的方法可以大致分为两类:顺序整定法和同时整定法。在一个多机系统中,以整定两台稳定器(编号 A 和 B)参数为例,对这两类方法可以简单说明如下。

顺序整定法的流程为:首先整定稳定器 A 的参数,稳定器 A 整定完成后投入电力系统运行,之后再整定稳定器 B 的参数。顺序整定法的过程符合电力系统实践的要求,思路简单、实现容易。但在20世纪70年代末80年代初的研究发现,顺序整定法在应用过程中存在的缺陷是会造成“特征值漂移”(eigenvalue drift)问题^[61],并最终导致多个稳定器参数整定后仍无法完全取得预期的阻尼效果。

“特征值漂移”问题具体是指:在整定稳定器 B 的参数后,前面已整定的稳定器 A 所取得的阻尼效果受到不利影响。具体来说,如果稳定器 A 参数整定的目的是将系统的某个目标振荡模式配置到期望的位置 A^* ;稳定器 A 参数整定结束后,随之整定稳定器 B 的参数,目标是将系统另一个目标振荡模式配置到期望的位置 B^* 。但是,在该振荡模式被稳定器 B 配置到期望的位置 B^* 后,由于稳定器之间的动态交互影响,已经被稳定器 A 配置到目标位置 A^* 的振荡模式,将可能从配置好的位置 A^* 上“漂移”出来。换句话说,后来进行的稳定器 B 的参数整定对已经完成参数整定的稳定器 A 的阻尼效果造成了影响。所以,这种“特征值漂移”问题使得顺序整定法在完成稳定器 A 和稳定器 B 的参数整定后,并不能将两个目标系统振荡模式同时配置到期望位置 A^* 和 B^* 上。