

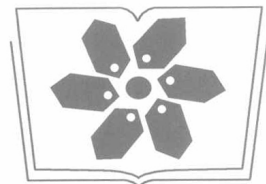
电力系统稳定分析直接法

——理论基础、BCU方法论及其应用

江晓东 江宁强 吴浩 王蕾 房晟辰 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

电力系统稳定分析直接法

——理论基础、BCU 方法论及其应用

江晓东 江宁强 吴浩 王蕾 房晟辰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

直接法的研究历史已长达 60 多年,很多研究者和用户仍然认为它在电力系统应用中还是不实用的。事实上,直接法必须克服一些局限才能成为一个实用的工具。本书在系统全面地介绍了直接法的理论基础之上,发展了综合 BCU 方法体系。本书汇集了作者及其课题组多年来在电力系统暂态稳定分析方法的研究成果,全书共 25 章,从直接法的基础理论知识开始,引入 BCU 系列方法以及群 BCU 法的理论基础,并从理论和实际应用角度证明了该方法的有效性,表明了理论分析可以为解决实际问题发展可靠而高效的求解方法。本书可作为高校电气工程专业教材和从事该领域研究工作的本科生、研究生和教师阅读参考,也可供从事电力系统规划、运行、控制及管理工作的工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统稳定分析直接法:理论基础、BCU 方法论及其应用/江晓东等著. —北京:科学出版社,2016. 6

ISBN 978-7-03-048347-8

I. ①电… II. ①江… III. ①电力系统稳定-稳定分析 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 111597 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张倩 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

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:27 1/4

字数:550 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

对现代社会而言,电力系统失稳是不可接受的。实际上,近年来北美和欧洲发生的几次大规模停电事故表明,电力供应中断、电网传输阻塞或停电事故严重影响了社会和经济活动的正常进行。目前,世界各地的电力部门常用的稳定分析程序大多是采用对电力系统稳定模型的逐步数值积分来模拟系统的动态行为。这种离线方式不能对当前的运行环境进行处理,因此,急需对时刻变化的全系统状态进行在线的评估。

暂态稳定分析从离线方式转为在线方式具有若干显著的优势和潜在的应用。然而这种转换是一项极具挑战的任务,需要在量测系统、分析工具、计算方法及控制策略等领域取得突破。基于能量函数的直接法(简称直接法)是一种使用能量函数的暂态稳定分析工具,与时域仿真方法不同的是,它具有若干独特的优势,如直接法不需要对故障后的电力系统进行费时的数值积分就能够判断系统的稳定性。除了计算速度快之外,直接法还能为提高电力系统稳定性的预防控制及增强控制提供有用的信息。

直接法的发展已经有 60 余年的历史。尽管取得了长足的发展,但很多研究人员和用户仍认为该方法并不实用。为使其成为实用化工具,直接法还需要克服若干难题和局限。本书致力于解决这些难题,克服这些局限。

本书的主要目的是讲解直接法的完整理论基础,并发展综合 BCU 方法论及其理论基础。能量函数理论是李雅普诺夫函数理论的延伸,本书提出了为通用电力系统暂态稳定模型构造数值能量函数的一般步骤。笔者认为,解决实际中的难题,需要深入理解相应的理论基础,并结合实际问题中的特性,才能开发出有效的方法。

本书共 25 个章节,可分为如下几类。

通过以下几个阶段的研究和发展,可使直接法取得丰富而实际的应用。

- 阶段 1 理论基础的发展;
- 阶段 2 方法论的发展;
- 阶段 3 方法论的可靠数值方法的发展;
- 阶段 4 软件实现与评估;
- 阶段 5 工业用户互动;
- 阶段 6 实际系统安装。

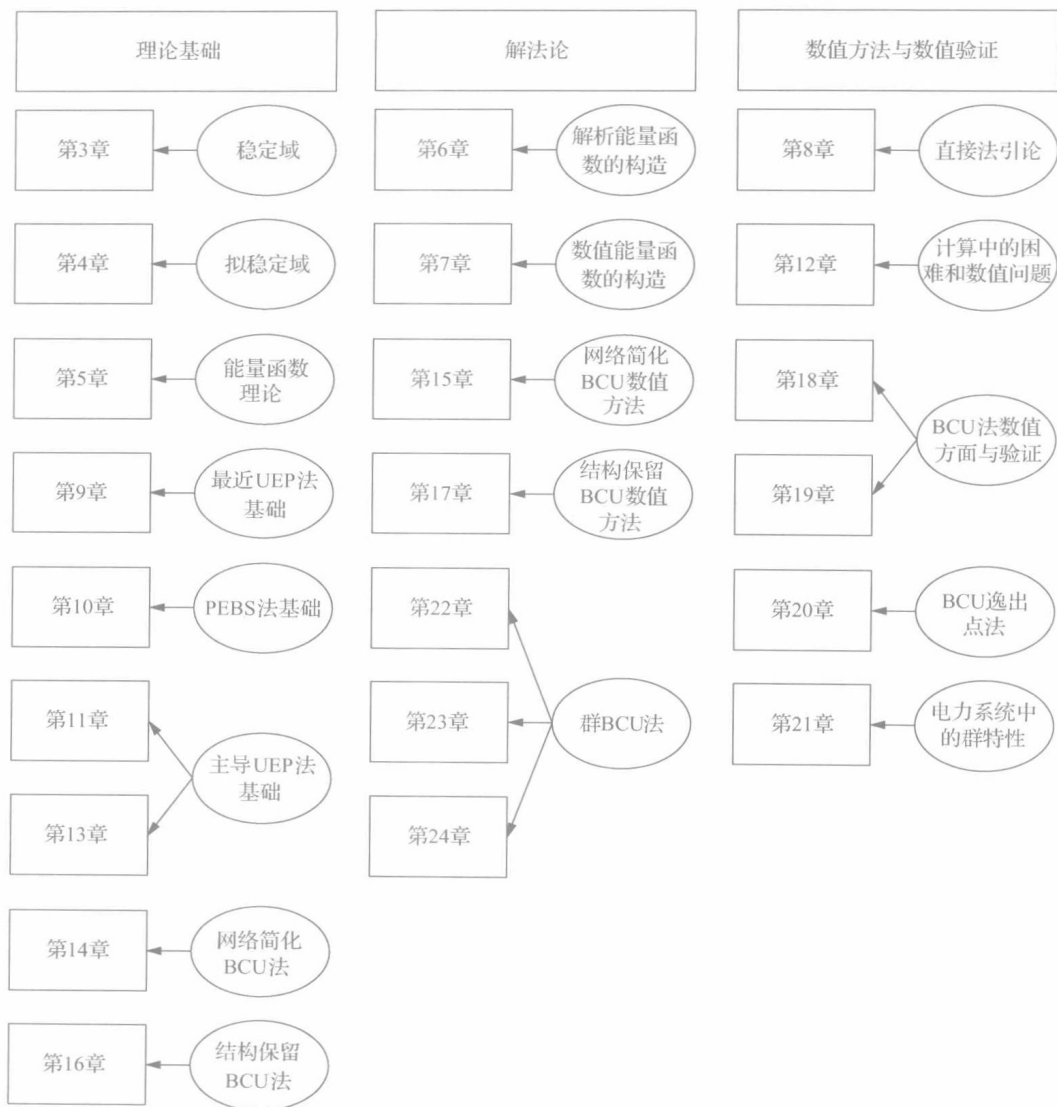


图 0-1 本书结构框架图

前三个阶段适合在大学和研究机构中进行,后四个阶段更适合在商业机构中进行。本书着墨于前两个阶段,并对第三阶段略加介绍。本书后卷将对第 3~第 6 阶段进行探究。

江晓东

Ithaca, New York

May 2015

目 录

序

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 运行环境的变化趋势	2
1.3 在线暂态稳定评估	3
1.4 对新工具的要求	5
1.5 直接法:局限与挑战	5
1.6 本书的目的	7
第 2 章 系统建模与稳定性问题	10
2.1 引言	10
2.2 电力系统的稳定性问题	11
2.3 模型结构与参数	15
2.4 基于测量的建模方法	16
2.5 电力系统的稳定性问题	18
2.6 稳定性分析方法	19
2.7 本章小结	21
第 3 章 非线性动力系统的李雅普诺夫稳定与稳定域	22
3.1 引言	22
3.2 平衡点与李雅普诺夫稳定性	22
3.3 李雅普诺夫函数理论	25
3.4 稳定流形与不稳定流形	26
3.5 稳定域	29
3.6 稳定边界的局部性质	30
3.7 稳定边界的全局特性	34
3.8 确定稳定边界的算法	35
3.9 本章小结	40
第 4 章 拟稳定域:分析与刻画	41
4.1 引言	41
4.2 拟稳定域	41
4.3 拟稳定域的特性	46

4.4	本章小结	48
第 5 章	能量函数理论与直接法	49
5.1	引言	49
5.2	能量函数	50
5.3	能量函数理论	52
5.4	用能量函数进行稳定域估计	56
5.5	稳定域估计的最佳方法	59
5.6	拟稳定域与能量函数	61
5.7	本章小结	64
第 6 章	暂态稳定模型解析能量函数的构造	65
6.1	引言	65
6.2	无损网络简化模型的能量函数	66
6.3	无损结构保留模型的能量函数	67
6.4	有损耗模型能量函数的不存在性	73
6.5	局部能量函数的存在性	75
6.6	本章小结	76
第 7 章	有损耗暂态稳定模型数值能量函数的构造	77
7.1	引言	77
7.2	两步法	77
7.3	基于首次积分的方法	80
7.3.1	与摇摆方程相关的能量函数	82
7.3.2	与潮流方程相关的能量函数	83
7.3.3	与转子电路方程相关的能量函数	84
7.4	数值病态问题	87
7.5	近似方法的数值评价	91
7.6	多步梯形法	92
7.7	关于修正的数值能量函数	96
7.8	本章小结	96
第 8 章	稳定分析的直接法	98
8.1	引言	98
8.2	一个简单系统	99
8.3	最近 UEP 法	100
8.4	主导 UEP 法	102
8.5	PEBS 法	103
8.6	本章小结	104

第 9 章 最近不稳定平衡点法的理论基础	107
9.1 引言	107
9.2 结构保留模型	107
9.3 最近不稳定平衡点	109
9.4 最近 UEP 的性质	111
9.5 最近 UEP 法	112
9.6 改进的最近 UEP 法	113
9.7 最近 UEP 的鲁棒性	117
9.8 数值研究	120
9.9 本章小结	122
第 10 章 势能界面法基础	124
10.1 引言.....	124
10.2 PEBS 法的步骤	124
10.3 原模型与降阶模型.....	126
10.4 广义梯度系统.....	129
10.5 一类二阶动力系统.....	132
10.6 原模型与构造模型的关系.....	135
10.7 PEBS 法分析	138
10.8 本章小结.....	148
第 11 章 主导不稳定平衡点法的理论部分	149
11.1 引言.....	149
11.2 主导 UEP	149
11.3 存在性与唯一性.....	151
11.4 主导 UEP 法	152
11.5 主导 UEP 法分析	155
11.6 数值算例.....	160
11.7 动态特性和几何特征.....	163
11.8 本章小结.....	164
第 12 章 主导不稳定平衡点法的计算部分	166
12.1 引言.....	166
12.2 计算上的挑战.....	166
12.3 有约束非线性方程组的平衡点.....	168
12.3.1 转子运动方程	168
12.3.2 发电机电气方程	168
12.3.3 励磁系统和电力系统稳定器	169

12.3.4	网络方程	169
12.3.5	平衡点方程	169
12.4	平衡点数值计算技术	170
12.5	平衡点的收敛域	171
12.6	计算主导 UEP 的概念方法	173
12.7	数值研究	175
12.8	本章小结	181
第 13 章	结构保留暂态稳定模型主导不稳定平衡点法基础	182
13.1	引言	182
13.2	系统模型	183
13.3	稳定域	184
13.4	奇异摄动法	185
13.5	结构保留模型的能量函数	186
13.6	DAE 系统的主导 UEP	188
13.7	DAE 系统的主导 UEP 法	189
13.8	数值研究	191
13.9	本章小结	198
第 14 章	网络简化 BCU 法及其理论基础	199
14.1	引言	199
14.2	降阶模型	200
14.3	分析结论	201
14.4	静态关系和动态关系	207
14.5	动态特性	208
14.6	网络简化 BCU 的概念方法	211
14.7	本章小结	213
第 15 章	网络简化 BCU 的数值方法	214
15.1	引言	214
15.2	逸出点的计算	215
15.3	稳定边界跟踪技术	217
15.4	保障方案	220
15.5	示例	221
15.6	数值算例	227
15.7	IEEE 测试系统	231
15.8	本章小结	235

第 16 章 结构保留 BCU 法及其理论基础	236
16.1 引言	236
16.2 降阶模型	236
16.3 静态性质和动态性质	241
16.4 分析结论	242
16.5 静态和动态联系的整合	246
16.6 动态性质	247
16.7 结构保留 BCU 的概念方法	248
16.8 本章小结	251
第 17 章 结构保留 BCU 的数值方法	252
17.1 引言	252
17.2 计算方面的考虑	256
17.3 逸出点检测的数值方法	256
17.4 MGP 的计算	258
17.5 平衡点的计算	259
17.5.1 转子运动方程	259
17.5.2 发电机电气动态方程	259
17.5.3 励磁系统和 PSS	259
17.5.4 网络方程	260
17.5.5 平衡点	260
17.6 数值算例	264
17.7 大规模测试系统	273
17.8 本章小结	275
第 18 章 从稳定边界角度出发的 BCU 法数值研究	277
18.1 引言	277
18.2 网络简化模型的稳定边界	278
18.3 结构保留模型	284
18.4 主导 UEP 的一个动态性质	288
18.5 本章小结	292
第 19 章 BCU 法横截性条件的研究	293
19.1 引言	293
19.2 参数研究	294
19.3 稳定边界性质的分析研究	299
19.4 双机无限大母线系统	301
19.5 数值研究	308

19.6	本章小结	311
第 20 章	BCU-逸出点法	312
20.1	引言	312
20.2	稳定边界性质	312
20.2.1	稳定边界性质的验证方案	314
20.2.2	稳定边界性质与系统阻尼	317
20.3	BCU-逸出点的计算	320
20.4	BCU-逸出点和临界能量	322
20.5	BCU-逸出点法	323
20.6	本章小结	326
第 21 章	电力系统事故的群特性	327
21.1	引言	327
21.2	同调事故群	328
21.3	同调事故群的识别	329
21.4	静态群性质	330
21.5	动态群特性	340
21.6	本章小结	341
第 22 章	群 BCU-逸出点法	343
22.1	引言	343
22.2	基于群的验证方案	343
22.3	线性和非线性关系	345
22.4	群 BCU-逸出点法	352
22.5	数值研究	354
22.6	本章小结	360
第 23 章	群 BCU-CUEP 法	361
23.1	引言	361
23.2	计算主导 UEP 的正确方法	362
23.3	群 BCU-CUEP 法	363
23.4	数值研究	366
23.5	本章小结	368
第 24 章	群 BCU 法	370
24.1	引言	370
24.2	用于计算准确临界能量的群 BCU 法	370
24.3	用于计算 CUEP 的群 BCU 法	374
24.4	数值研究	378

24.5 本章小结	384
第 25 章 远景和未来方向展望	385
25.1 目前的进展	385
25.2 在线动态事故筛选	387
25.3 建模的改进	389
25.4 同步相量测量装置辅助的 ATC 在线计算	389
25.5 新的应用	392
25.6 本章小结	393
参考文献	394
附录	408
A1.1 数学基础	408
A1.2 第 9 章定理证明	409
A1.3 第 10 章定理证明	414
致谢	422

第 1 章 概 述

1.1 引 言

对现代社会而言,电力系统失稳是不能接受的。实际上,近来北美和欧洲发生的几次主要的停电事故表明,电力供应中断、电网传输阻塞或大停电严重影响了社会和经济活动的正常进行。例如,1996年8月西海岸输电系统发生的连锁故障造成了1200万名用户长达8小时的停电事故,损失估计20亿美元。1998年6月,受输电系统约束的影响,中西部电力批发市场崩溃,导致电价从均价30美元/(兆瓦·时)涨至峰值高达1万美元/(兆瓦·时)。1999年和2000年夏也出现过类似的电价飙升的情况。2003年的东北部大停电使5000万名用户失去电力供应,经济损失估计为60亿美元。据某研究机构统计,全球范围内每年因电力故障和波动造成的损失为1190亿~1880亿美元。由此可见,电力故障和中断会给社会经济带来严重影响。

随着电网负荷需求的稳步增长,输电网载荷不断加重,世界上许多电力系统的运行状态更加接近其稳定极限。由于建购的新输电、发电设备有限,同时电网开放使用有新的监管要求,此外还需要考虑环境因素,这些都迫使输电网络承担着超过其设计水平的电力负荷。运行安全裕度减小这一问题还与其他各种因素掺杂在一起,如:①电力交换大宗交易数额增加的同时,非统调发电机(non-utility generator)也越来越多;②发电机的安装使用朝着大出力、低惯量和高短路比的方向发展;③可再生能源的使用量不断增加。在这种情况下,任何超出电力系统动态安全极限的状态都将给系统整体带来严重后果。

电力系统不断承受两种扰动,即事件扰动(故障)和负荷波动。雷电、大风、继保装置误动、绝缘失效、大负荷的突变,或者多种因素共同作用往往会引发短路,事件扰动(故障)是由短路故障而导致的发电元件或输电元件(线路、变压器和变电站)的缺失。事件扰动往往因为继电保护元件或断路器动作而导致电网结构发生变化。它们表现为继电保护动作后单个设备(或元件)停运或多个设备(或元件)同时停运。负荷波动是指母线上负荷需求量的变化,和/或母线之间交换功率的变化。负荷波动前后电网的结构可能保持不变。电力系统在规划和运行中都要求能够承受某些特定的扰动。北美电力可靠性委员会将安全性定义为,电力系统受到严重扰动时防止发生连锁故障的能力。个别可靠性委员会还设立了自身系统能够

承受的且不会引发连锁故障的扰动类型。

电力系统规划和运行中的一项主要工作是校验预想事故集对电力系统动态行为(如稳定性等方面)的影响。电力系统稳定性关注的是电力系统经受扰动后,能否达到一个可接受的稳定状态(运行状态)的能力。在运行阶段,电力系统稳定分析在确定系统运行极限和运行指导中发挥着重要作用。在规划阶段,电力系统稳定分析能够评定是否需要额外添加设备以及确定这些控制设备的安装位置,以提高系统的静态稳定性和动态安全性。稳定性分析还用于校验继保整定值和设置控制设备参数。稳定分析的结果为系统规划及运行的重要方针与决策提供依据和帮助。

暂态稳定问题是电力系统稳定问题中的一类。对于依靠远距离、大功率传输的地区而言(如美国西部互联系统中的大部分地区,连接安大略—纽约地区和曼尼托巴-明尼苏达地区的 Hydro-Quebec 电力系统,以及中国和巴西的一些地区),暂态稳定是主要的运行约束。目前的趋势是,各互联系统中的许多部分都将越来越受到暂态稳定极限的影响。这种变化使得事件扰动与负荷扰动对稳定性的不利影响都有所增加。因此,迫切需要开发出有力的分析工具,能够及时准确地检查系统稳定性,并提供必要的预防性及增强性控制措施。

1.2 运行环境的变化趋势

日益老化的电网,容易受到各种扰动的影响。电网中的许多变压器已经接近或者超过了其设计寿命;有些输电网络常常得不到足够的资金进行建设和维护,却经常超负载运行,这使得已经脆弱的电网一直以接近于其极限的状态运行。此外,风力发电等可再生能源所催生的分布式发电机组给系统运行环境带来了更多挑战。众所周知,这些小规模的分布式发电系统对系统的稳定性更加令人担忧。因此,在这种运行状态下,运行人员更难以通过一个预想事故列表来得到与各种运行条件相对应的运行极限值。

目前,多数的能量管理系统周期性的在线进行电力系统静态安全性评估(static security assessment, SSA)和控制,以保证电力系统能够承受一组预想事故的扰动。评估包括选择一组预想事故,评估系统对这些事故的响应。现代的能量控制中心使用各种软件包进行安全评估和控制。这些软件包几乎只是基于静态分析进行综合性的在线安全评估和控制,这使它们仅适用于 SSA 和控制,而不适用于在线的暂态稳定评估(transient stability analysis, TSA)。离线的暂态稳定分析是在假定的运行条件下进行的。一般地,研究中的评估时间取决于假定的运行状态个数和每种事故所需研究的动态过程的时间长度,通常可能长至数小时,甚至数天。这种离线的处理方式不能够应对当前的运行环境,在系统状态不断变化的状况下,

迫切需要能够及时应对系统快速变化的在线评估方法。

能量管理系统中缺少在线的 TSA 会导致严重后果。事实上,任何动态安全极限的越界都会对整个电力系统,乃至社会造成深远影响。从经济角度来看,一次电力系统停电事故的代价非常巨大。在线的动态安全评估是避免系统动态安全极限越界的重要工具。可以说,系统负荷越重,就越需要在线的动态安全分析工具。

在线的暂态稳定分析相比离线分析模式具有显著的优点和潜在的应用价值。首先,离线分析往往假定系统是在最恶劣的情况下运行的,如果根据实际的系统结构和运行状态进行动态安全评估,系统运行所需的稳定裕度可以减小 10% 或更多。目前,环境迫使电力系统在接近稳定边界的低裕度状态下运行,这种在线能力就显得尤为重要。其次,离线分析需要处理的预想事故数量非常大,而在线分析只需要对那些与实际运行条件相关的事故进行评估,由此可以更精确地确定稳定裕度,使得电网不同区域间能够传输更多电能。与离线分析模式相比,在线分析所需资源较少并且能更准确地确定稳定裕度,可以将节余的人力资源用于其他重要工作。

1.3 在线暂态稳定评估

在线 TSA 向调度员提供系统稳定的关键信息,包括:①当前运行状态下,一组给定事故的 TSA。②暂态稳定约束下,关键断面(key interface)处的(电力)传输极限。一个 TSA 周期从系统获得所有必须的数据开始,到系统准备进入下一周期时结束。通常一个完整的在线 TSA 周期是分钟级的,如 5 分钟。事故列表中的事故数目取决于电力系统的规模与系统状态。据估计,一个 15000 条母线的大型电力系统,其事故列表的事故数量在 2000~3000。事故类型主要包括主保护切除的三相短路故障和后备保护切除的单相接地故障。

一个在线 TSA 周期开始以后,预想事故列表以及来自状态估计与拓扑分析等信息交由 TSA 程序进行分析。TSA 的基本功能是从事故列表中识别出失稳故障。如果在一种运行状态下,其事故集中且没有不稳定事故,则称其为暂态稳定的;否则称为暂态不稳定的。然而,在线进行 TSA 是非常具有挑战性的。

人们已充分认识到要采用这样的策略:首先,采用有效的筛选方法来滤除大量的稳定事故,筛选出临界事故和潜在的不稳定事故;其次,只对潜在的不稳定事故进行详细仿真。这种策略在在线静态稳定评估中已经成功得到了应用。正是由于能够从数百个事故中筛选出几十个临界事故,在线 SSA 才能够得以实现。这种策略也可应用于在线 TSA。给定一个预想事故集,该策略将在线 TSA 分成两个评估阶段(Chadalavada et al., 1997; Chiang et al., 1997):

阶段 1 对动态事故进行筛选,快速从事务列表中剔除确定稳定的事故。

阶段 2 对阶段 1 中保留的每个事故进行详细的动态评估。

动态事故筛选是在线 TSA 的一项基本功能。在线 TSA 系统整体的计算速度很大程度上取决于动态事故筛选的效率。筛选的目的是识别出确定稳定的事故，避免对这类事故做进一步的稳定分析。正是由于对稳定事故的明确分类，TSA 的速度才能够得到大幅提升。那些有待确定的事故，以及被识别为临界稳定或不稳定的事故交由时域暂态稳定仿真程序做进一步的稳定性分析。

在线 TSA 能精确地确定系统在暂态稳定约束下的传输容量。这种精确计算传输容量的能力可以使得发电成本较低的远方机组能够通过经济调度将电能输送到负荷中心。假设某电力系统包含一台发电成本低的远方机组，如一台水电机组，发电成本是 2 美元/(兆瓦·时)；和一台发电成本较高的本地机组，发电成本为 5 美元/(兆瓦·时)。它们给 2500 兆瓦的负荷中心供电(图 1.1)。根据离线分析，远方机组到负荷中心的输电容量为 2105 兆瓦。预留 5% 的稳定裕度，则远方机组的出力为 2000 兆瓦。本地机组须向负荷中心提供 500 兆瓦以满足负荷需要。另一方面，根据在线 TSA 给出的远方机组到负荷中心的实际传输能力为 2526 兆瓦，而不是 2105 兆瓦。同样预留 5% 的稳定裕度，远方机组的出力可设为 2400 兆瓦，这时为满足负荷需求，本地机组的出力为 100 兆瓦。将这两种基于不同传输能力计算结果的有功功率输送方案进行比较，发电成本的差异为 1200 美元/时，即 28800 美元/天。可见，即便是 2500 兆瓦这样相对较小的负荷，在线 TSA 也能节省开支合计大约 1050 万美元/年。我们知道实际电力系统未必和这个假设的系统一样，但这个例子足以说明在线 TSA 在经济角度具有显著优势。

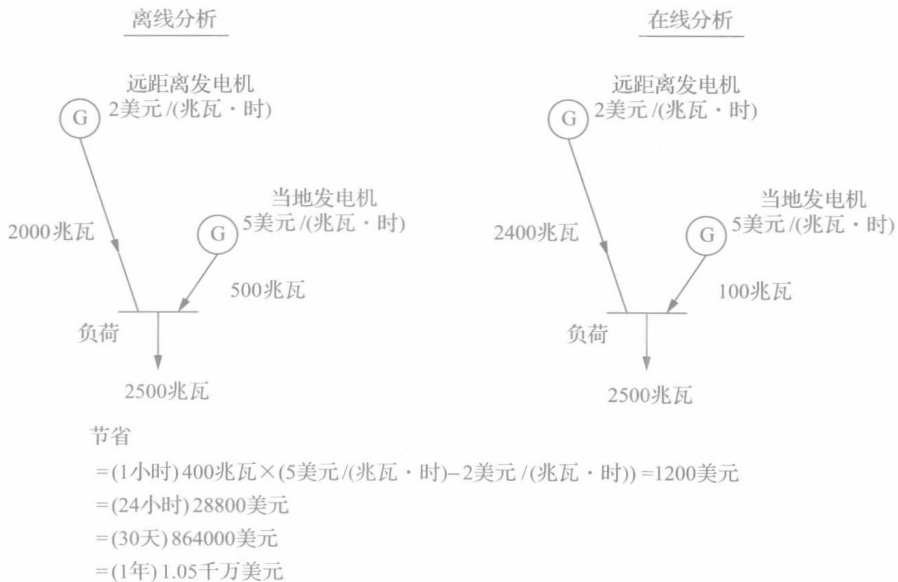


图 1.1 假想电力系统与经济效益分析

1.4 对新工具的要求

目前,实际应用的稳定性分析软件大多是通过电力系统的稳定模型进行逐步数值积分,以实现系统动态行为的仿真。采用时域仿真进行稳定性分析的方法具有很长的历史。故障后系统的稳定性分析是根据仿真故障后的轨迹进行评定的。故障后系统的典型仿真时间是 10s;当考虑多摆失稳时,可能长于 15s 或 20s,这使得这种传统时域仿真方法非常耗时。

传统的时域仿真法存在一些不足。首先,它需要做大量耗时的计算,因此不适合在线应用;其次,当系统被判别为不稳定时,怎样进行预防性控制,以及当系统被判别为处于临界稳定状态时,怎样进行增强性控制,时域仿真都不能提供这方面的信息;最后,时域仿真也不能提供有关系统稳定程度(当系统稳定时)或不稳定程度(当系统不稳定时)的信息。而上述这些信息对电力系统规划和运行是非常重要的。

从计算角度看,在线 TSA 需要求解一个由一组非线性微分方程和一组与 SSA 有关的非线性代数方程共同组成的数学模型。对于一个 14000 条母线的电力系统暂态稳定模型,评估一个动态事故下的系统稳定性需要求解一组 15000 个微分方程和 40000 个非线性代数方程,计算时间为 10~20s。在线 TSA 要求每隔 5~10 分,利用在线数据和系统状态估计的结果,对数百个甚至数千个事故进行分析,因而传统的时域仿真方法不能满足这样的要求。

在线 TSA 的计算量大致比在线 SSA 多 3 个数量级。这就是为什么在能量管理系统中 TSA 一直采用离线计算,而未能实现在线应用的原因。扩展能量管理系统的功能,加入在线 TSA 和控制是一项具有挑战性的工作,要求在测量技术、分析工具、计算方法及控制方法等多方面取得突破。

1.5 直接法:局限与挑战

另一种暂态稳定分析方法借助于能量函数,称之为直接法或基于能量函数的直接法。它最初是由 Magnusson(1947)于 20 世纪 40 年代末提出的,Aylett(1958)在 20 世纪 50 年代进行了研究。直接法的研究历史已长达 60 多年,然而近年来才被实际应用于暂态稳定分析。直接法不需要对(故障后)系统进行耗时的时域数值积分就能够直接确定系统的暂态稳定性。除了速度快以外,直接法还可以提供系统稳定程度的量度。当需要对不同的网络结构进行比较,或者需要快速计算暂态稳定约束下的系统运行极限时,其能够对系统稳定程度进行量度,这使直接法具有独特的优势。直接法的另一个优点是当系统被判定为不稳定时,可提供有