



电力新技术丛书

ELECTRIC POWER NEW TECHNOLOGY SERIES

$$\begin{aligned} &= V_{kc} + V_{pc} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M \omega_{ci}^2 + \sum_{i=1}^n (-P_i)(\theta_{ci} - \theta_{ui}) \\ &\quad - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n C_{ij}(\cos \theta_{c,i,j} - \cos \theta_{s,i,j}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^a \frac{a}{b} (\sin \theta_{c,i,j} - \sin \theta_{s,i,j}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

直接法稳定分析

傅书遑₉ 倪以信 薛禹胜 编著



中国电力出版社

电力新技术丛书

直接法稳定分析

傅书颢 倪以信 薛禹胜 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

稳定破坏是电力系统中较为严重的事故之一。常规的时域仿真计算比较精确,可以考虑任意复杂的模型,但缺点是太慢。为了寻找快速、精确的稳定分析方法,各国进行了不懈的努力。本书重点介绍国内外研究得比较多、比较有在线应用前景的三种直接法,试图用深入浅出的方式向读者介绍它们的理论基础、算法和使用经验,希望对从事这项工作的人员有所帮助。

本书可供电力系统从事科研、运行和教学工作的管理干部和技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

直接法稳定分析/傅书遏等编著. -北京:中国电力出版社, 1999

(电力新技术丛书)

ISBN 7-80125-868-1

I. 直… II. 傅… III. 电力系统-直接法-分析
IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 29104 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

梨园印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 1 月第一版 1999 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 6 印张 129 千字

印数 0001—2500 册 定价 11.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电力新技术丛书》出版说明

我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就,从1978年到1997年的19年中装机容量及发电容量连续上两个台阶(1987年装机容量达1亿kW及1995年装机容量达2亿kW),到1996年底已居于世界第2位。电力工业的领导者向我们提出了建“一流电网”的号召,针对当前两个根本性转变的关键时刻,提出要进行由计划经济体制向具有中国特色的社会主义市场经济体制转变的第二次创业。其目标就是要保持电力工业持续、快速、健康地发展和电力供给与需求的平衡,从而保证国民经济的发展和社会的进步以及人民生活水平的日益提高。为达到建成“一流电网”的目的,必须有一流的人才,用一流的技术,并且得到各行业的关心、支持和理解。本套《电力新技术丛书》即是用深入浅出的叙述方法,介绍有关一流电网的新技术。希望关心这些问题的有关人员可以用较短的时间理解这些问题的概要,加深对这些问题的关注和支持。

本丛书的作者们都是从事所写专题多年的工作者,并在该专题领域有开拓性的贡献。他们出于“甘为人梯”的想法,把自己的体会及资料尽可能深入浅出地写出,希望读者能用最少的投入,掌握作者的所知所得。

本丛书包括一些具有现实意义和广阔应用前景,并在国际上或国内处于前沿地位的高新技术。例如微机继电保护、电力网中的谐波、电网调度员培训模拟(DTS)、人工神经网络原理及其应用、配电系统自动化及其发展、面向对象设计的

开放式能量管理系统、模糊数学在电力系统中的应用、电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统、直接法稳定分析、无功补偿的矢量控制等，读者可以根据需要与可能选用。

本丛书的宗旨是用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地就各专题题目的引出，专题的基本原理和理论及对电力系统的影响进行简要论述，并对专题的应用领域和前景及可能产生的效益作出评述。

本丛书的读者对象为：科研、教学、生产第一线的电力工程技术人员，特别是工作五年左右的年轻工程师及大、中专院校有关专业的学生。由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限，丛书肯定会存在许多不足，丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

王平洋 周孝信

前 言

经过多年的探索 and 不断改进,直接法稳定分析终于到了可供在线应用的前夜。我们深信,再经过几年的努力,直接法稳定分析将在许多大电网得到应用,成为能量管理系统的一个组成部分。为了促进直接法稳定分析在我国电网的推广应用,我们编了这本书,书中重点介绍了国内外研究得比较多,较有在线应用前景的三种直接法,即 RUEP 法、PEBS 法和 EEAC 法。试图用深入浅出的方式介绍它们的理论基础、计算方法和使用经验,希望对有兴趣从事这项工作的人员有所帮助。

本书由 3 个作者合作写成,其中第 1、4、6 章由傅书邈执笔,第 2、3 章由倪以信执笔,第 5 章由薛禹胜执笔。由于技术在不断发展,加以我们的水平有限,书中如有错误和不足之处,请读者们提出宝贵意见和建议。

目 录

《电力新技术丛书》出版说明

前言

1	概述	1
1.1	引言	1
1.2	直接法稳定研究的综述	3
1.3	本书的主要内容	5
2	直接法的理论基础	7
2.1	引言	7
2.2	单机无穷大系统的直接法暂稳分析	9
2.3	李雅普诺夫稳定性和李雅普诺夫直接法	17
2.4	小结	23
3	UEP 法直接暂态稳定分析	25
3.1	经典模型多机系统数学模型	25
3.2	同步坐标下的暂态能量函数 和临界能量	27
3.3	惯量中心坐标下的暂态能量函数和临界能量	34
3.4	UEP 法直接暂态稳定分析步骤	40
3.5	UEP 法的算例及误差分析	49
3.6	考虑元件复杂模型时的 UEP 法暂稳分析	55
3.7	小结	71
4	PEBS 法及其应用	73

4.1	引言	73
4.2	基本概念	73
4.3	PEPS 法的数学模型(经典模型)	79
4.4	PEBS 法的计算步骤	81
4.5	计算实例与误差分析	83
4.6	考虑复杂模型的 PEBS 法	87
4.7	改善 PEBS 法精度的方法	92
4.8	暂态能量裕度的灵敏度分析	96
4.9	PEBS 法的应用及其优缺点	102
5	EEAC 法及其应用	105
5.1	引言	105
5.2	PCOI 映射保留了多机系统的稳定特性	107
5.3	CCI 的可行性及候选 CC 的分层筛选	115
5.4	EEAC 在积分精度的含义上提供了多机系统稳定的充要条件	118
5.5	灵敏度分析稳定极限量计算	128
5.6	复杂模型下的 EEAC	131
5.7	EEAC 的性能分析	134
5.8	EEAC 在中国电力系统中的应用	140
5.9	小结	144
6	小结与展望	146
6.1	小结	146
6.2	展望	148
附录 A	4 机系统算例参数	150
附录 B	10 机 39 母线系统数据	152
附录 C	有关 EEAC 法的理论与证明	157
C1	n 机系统稳定特性的补充	157

C2	映像 OMIB 子系统的时变特性及稳定分析 ...	160
C3	临界群辨识(CCI)原理	164
C4	多摆稳定性	166
C5	τ 对失稳模式的影响	170
	缩略语对照表	173
	参考文献	174

1. 概 述

1.1 引 言

稳定破坏是电网中较为严重的事故之一,大电力系统的稳定破坏事故,往往引起大面积停电,给国民经济造成重大损失。仅以 1965 年 11 月美国东北部与加拿大电力系统大停电事故为例,该事故由于一条线路过负荷而引起相邻线路相继跳闸,以致发展成为全系统的稳定破坏事故^[30],停电区域波及美国东北部 6 个州及加拿大的一部分,停电功率达 2500 万 kW,停电时间达 13 小时 32 分,损失是巨大的。据报导,在西欧和日本,也都发生过由于失稳而造成的大面积停电事故。

在我国,由于电网结构相对薄弱,重负荷长距离线路较多,因而稳定事故的发生较为频繁。据统计^[4],1988~1990 年的电网稳定事故如表 1.1 所示。平均全国每年有 4.7 次稳定事故,总损失电量为 280.31 万 kWh,社会上由于停电造成的损失就更大了。

为了防止稳定事故,各电网采取了各种措施,如快速保护、单相重合闸、远方切机切负荷、投入制动电阻等,其中最常用的措施是对可能发生的各种运行方式进行大量计算,从而避开可能破坏稳定的运行方式。离线的时域仿真法,或称逐次

积分法(Step By Step, 简称 SBS), 是一种可靠的方法, 可以精确考虑各种复杂模型。但当电网发展到几百个乃至上千个节点时, 这种计算耗费机时多, 计算速度慢, 只能判断是否稳定, 不能给出系统稳定裕度的定量指标。因此在目前的技术条件下还不太适宜于电力系统在线稳定计算。

表 1.1 1988~1990 年全国电网稳定事故简况

地 点	日 期	事故损失	
		损失负荷(万 kW)	损失电量(万 kWh)
华中(江西)	1988. 9. 23	0. 0	0. 0
西北(宁夏)	1988. 4. 10	9. 2	不详
东北(辽宁)	1988. 5. 31	32. 5	31. 8
东北(黑龙江)	1988. 6. 06	10. 8	不详
福建	1988. 6. 22	25. 0	8. 0
贵州	1988. 8. 06	28. 0	不详
广东	1989. 1. 18	8. 4	7. 5
山东	1989. 4. 25	30. 0	30. 6
西北(宁夏)	1989. 8. 23	28. 0	9. 83
西北(陕西)	1990. 6. 23	0. 0	0. 0
西北(陕西)	1990. 7. 09	19. 0	10. 0
云南	1990. 7. 17	0. 0	0. 0
云南	1990. 9. 02	14. 0	5. 58
广东	1990. 9. 20	80. 0	177. 0

为了寻求一种快速、精确的稳定算法, 各国电力研究人员进行了不懈的努力。自从 1966 年美国 Gless^[7] 和 El-Abiad 等人^[8] 首次提出不计电网中转移电导的李雅普诺夫函数以来, 各国进行了大量研究工作, 文献上发表的有关直接法的论文

已有数百篇之多,对各种方法的理论与实践进行了大量探讨,取得了丰硕的成果。我国有关这一课题的研究虽然起步较晚,但进步很快,也取得了一部分成果。但是,由于问题的复杂性,目前还没有找到一种非常满意和成熟的方法。

1.2 直接法稳定研究的综述

李雅普诺夫稳定性理论是在 1892 年提出的,但是直到 1947 年才由美国 Magnusson^[5]提出应用李雅普诺夫能量函数研究电力系统暂态稳定的论文。之后, Aylett^[6]在 1958 年提出了用于多机系统的能量积分准则, 1966 年 Gless^[7]和 El-Abiad 等人^[8]提出不计电网中转移电导的李雅普诺夫函数。这是用李雅普诺夫函数研究电力系统暂态稳定的早期阶段。

自 70 年代开始,用李雅普诺夫法研究直接法稳定分析的文章逐渐增多,初期的研究主要集中于用不同的方法建立运用于电力系统的李雅普诺夫函数(或称 V 函数),和如何求取不稳定平衡点(Unstable Equilibrium Point, 简称 UEP)的方法。开始人们认识到如有 n 个机组,则必有 $2^n - 1$ 个 UEP^[9]。但是要求 $2^n - 1$ 个 UEP 很麻烦,于是 Pavella 等人提出,在故障切除时加速度最大的为 UEP^[10]。又有人提出,距离 SEP (Stable Equilibrium Point, 简称 SEP)最近的 UEP 为临界 UEP(closest UEP)。但是早期的研究没有计入故障地点和转移电导的作用,所以计算的结果偏于保守。

1979 年 Athay 等人^[11]提出的能量函数第一次计入了故障地点和转移电导的作用,使得能量函数法在克服保守性方

面迈出了重要的一步。

1978 年 Kakimoto 等人^[12]首次提出了势能界面法(Potential Energy Boundary Surface, 简称 PEBS 法), 直接利用持续故障轨迹求取临界势能, 从而求得临界切除时间(Critical Clearing Time, 简称 CCT), 省去了求 UEP 的麻烦, 使得速度大大加快。但在当时, 势能界面法是根据一些经验和物理概念导出的, 没有严格的理论证明。

80 年代以来, Michel^[13]等人提出了单机能量法。Fouad 等人^[5,14]在动能修正、能量裕度以及求解相关 UEP(Relevant UEP)等方面作了大量研究工作, 进一步丰富和发展了暂态能量函数法的理论和方法。Padiyar 等人^[16]给出了能够计入详细发电机模型和负荷模型的拓扑能量函数。1988 年 Chiang 和 Zaborsky 等人^[17,18,19]提出了稳定域(Region of Stability)的概念, 对势能界面法进行了理论分析, 并提出了使势能界面法计算准确的条件。1991 年, Chiang 等人在其稳定域理论的基础上, 又推出了 BCU 法^[43](一种将 UEP 法和 PEBS 法结合起来的方法), 使 UEP 法的实用化又前进了一步。

另一种主要的直接法是我国学者南京电力自动化研究院薛禹胜与比利时 Pavella 教授等人提出的扩展等面积法(Extended Equal Area Criteria, 简称 EEAC 法)。此法在 1988 年提出^[20], 以后不断完善化, 最近又提出了动态 EEAC 法(Dynamic EEAC, 简称 DEEAC)^[21], 使得计算精度大大提高。

除此以外, 国外还对模式识别法、神经网络法、灾变理论、混沌理论等在暂态稳定方面的应用进行了研究, 但这些方法目前尚未到实用阶段。另外一种方法是采用并行计算(Parallel Processing)的方法加快计算速度, 这些方法也还在研究中。

我国电力科学界对稳定分析的直接法与快速算法的研究大致始于 80 年代,其中最早发表的一篇是夏道止与 Heydt 等人关于分解—聚合法在线稳定的研究^[22]。随后有电力部电力科学研究院傅书邈等人关于 PEBS 法的研究^[23],清华大学倪以信与美国 Fouad 等人对 UEP 法的直流输电模型与励磁系统模型的研究^[24,25],薛禹胜与比利时 Pavella 等人对 EEAC 法的研究^[20]等。到了 90 年代,直接法与快速算法的研究尤为活跃,如哈尔滨工业大学郭志忠、柳焯等人用高阶 Taylor 级数研究快速暂稳计算问题^[26],上海交通大学刘筌等人关于 PEBS 法复杂模型的研究^[27,28],东北电力学院蔡泽祥和清华大学倪以信等人关于快关汽门、电气制动和切机问题的研究^[29]等,都使得直接法在线稳定分析的研究进一步走向实用化。此外,关于应用人工神经网络、灾变理论和熵网络理论的研究也有不少论文发表。

总之,国内外研究直接法稳定分析不外朝两个方向发展,一个是改进现有的模型,寻求更准确、更快速和更实用化的方法;另一个是寻找新的求解在线稳定的理论和方法。

由于篇幅关系,本书将重点介绍三种国内外报导最多,而较有在线应用前景的方法,即 RUEP 法、PEBS 法和 EEAC 法。

1.3 本书的主要内容

本书共分 6 章。第 1 章为概述,主要对直接法稳定研究的发展概况作一简单综述,并说明本书为何集中介绍 RUEP

法、PEBS 法与 EEAC 法。第 2 章为直接法的理论基础,根据运动学原理,引出稳定性的基本概念,指出直接法分析动态系统稳定性的特点是从能量的观点来判断稳定性,而不是通过计算系统运动的轨迹来判断系统是否稳定。然后介绍了暂态能量函数的定义及计算,临界能量的确定,并与等面积准则作比较,说明二者的一致性。然后从理论上给出了李雅普诺夫稳定性定义,说明了满足李雅普诺夫函数的条件,同时指出将直接法用于多机电力系统时怎样构造暂态能量函数和确定临界能量。此章为初学读者所必读。第 3~5 章分别介绍 UEP 法、PEBS 法和 EEAC 法及其应用,每章中介绍了每种方法的基本原理、数学模型、计算方法及应用,并附有若干算例,读者可根据需要分别阅读每一章。第 6 章为小结及展望。

2. 直接法的理论基础

2.1 引言

李雅普诺夫直接法(简称直接法)是从一个古典的力学概念发展而来的。该概念指出:“对于一个自由的(无外力作用的)动态系统,若系统的总能量 $V[V(X)>0, X$ 为系统状态向量]随时间的变化率恒为负,则系统总能量不断减少直至最终达到一个最小值,即平衡状态,则此系统是稳定的。”李雅普诺夫据此发展了一个严密的数学工具即李雅普诺夫直接法来判别动态系统的稳定性。由于该方法不是从时域的系统运动轨迹去看稳定问题,而是从系统能量及其转化的角度去看稳定问题,因此可快速进行系统稳定性分析。该方法在近二三十年得到了迅速的发展。

可以用一个简单的运动学例子来说明直接法的原理。图 2.1 所示的滚球系统在无扰动时球位于稳定平衡点(Stable Equilibrium Point, 简称 SEP), 受扰后, 设小球在扰动结束时位于高度 h 处(以 SEP 为参考点), 并具有速度 v , 则质量为 m 的小球总能量 V 由动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 及势能 mgh (g 为重力加速度)的和组成, 即有

$$V = \frac{1}{2}mv^2 + mgh > 0$$

若小球壁有摩擦力,则受扰动后系统总能量在摩擦力作用下逐步减少。设小球所在容器的壁高为 H ,也以 SEP 为参考点,则当小球位于壁沿上且速度为零时,亦即处于不稳定平衡状态时,相应的势能为 mgH ,称此位置为不

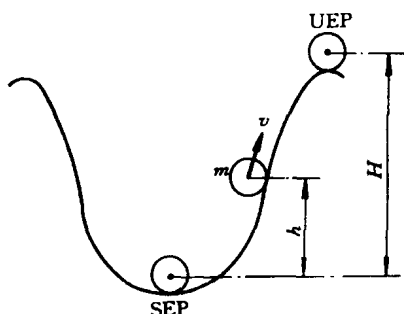


图 2.1 滚球系统

稳定平衡点 (Unstable Equilibrium Point, 简称 UEP), 相应的势能称为系统的临界能量 V_{cr} , 从而

$$V_{cr} = mgH$$

根据运动学原理, 我们知道若忽略容器壁的摩擦, 若在扰动结束时小球的总能量 V 大于临界能量 V_{cr} , 小球将最终滚出容器而失去稳定性; 反之, 若扰动结束时 $V < V_{cr}$, 则小球在摩擦力作用下能量逐步减少, 最终静止于 SEP。显然在 $V = V_{cr}$ 时系统为临界状态。通常可根据 $(V_{cr} - V)$ 的值判别稳定裕度。

显然对于一个实际的动态系统, 需要解决的两个关键问题是: ①对于该实际动态系统应该如何构造或定义一个合理的李雅普诺夫函数, 当其为能量型函数时, 又称之为暂态能量函数, 如上例中的 $V = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$, 它的大小应能正确地反映系统失去稳定的严重性; ②如果确定和系统临界稳定相对应的李雅普诺夫函数临界值或暂态能量函数临界值, 即临界能量, 以便可根据扰动结束时的李雅普诺夫函数值 (即上例中