

# 电力系统电压稳定 分析与控制方法

刘明波 林舜江 谢敏 著

 科学出版社

# 电力系统电压稳定分析与控制方法

刘明波 林舜江 谢敏 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书共 23 章。第 1~第 4 章介绍静态电压稳定分析的基本方法、静态电压稳定极限点识别和计算的混合算法及含二次电压控制的暂态电压稳定分析方法。第 5~第 18 章介绍非线性最优控制问题的求解方法,电压稳定全过程精确仿真和准稳态仿真方法,非线性最优控制的直接动态优化法和间接动态优化法、模型预测控制方法、分布式模型预测控制方法及多目标强化学习方法应用于求解长期电压稳定控制问题。第 19~第 23 章介绍暂态电压稳定控制方法,包括基于轨迹灵敏度的暂态电压稳定预防控制方法、基于模型预测控制的暂态电压稳定紧急控制方法、多目标混合整数最优控制方法应用于求解暂态电压稳定紧急控制问题及三级电压控制体系下暂态电压稳定仿真及紧急控制方法。本书对所提出的各种算法均从模型建立、算法实现等方面进行了详细推导;在算例分析中,不仅采用了国际通用的标准试验系统作为算例,而且采用了真实省级电网的实际运行数据作为算例。

本书可供各级从事电力系统分析运行与控制的工程技术人员、高等学校和科研院所的研究生和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统电压稳定分析与控制方法/刘明波,林舜江,谢敏著.

—北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-050518-7

I. ①电… II. ①刘… ②林… ③谢… III. ①电力系统稳定—电压稳定—稳定分析②电力系统稳定—电压稳定—稳定控制 IV. ①TM712.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267747 号

责任编辑:陈 静 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:26

字数:540 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 前 言

电压稳定是指在一个给定的初始运行状态下承受扰动后维持系统母线电压的能力，可分为静态电压稳定、短期电压稳定（又称为暂态电压稳定）和长期电压稳定。其研究始于 20 世纪 50 年代初，但直到 20 世纪七八十年代，因多次电压失稳的发生才引起工业界和学术界的广泛重视，并成为电力系统领域的研究热点。进入 21 世纪以来，世界范围内电压失稳和电压崩溃事故产生的影响较以往更为严重，例如，2003 年 8 月 14 日，美加电网发生电压崩溃事故，造成美国东北部和加拿大部分地区长时间大停电；时隔不久，2006 年 11 月 4 日，西欧 8 个国家发生了大面积停电事故，这是欧洲 30 年来最严重的一次停电事故，1000 多万人受到影响。而我国随着“西电东送、南北互供、全国联网”的实施，带来的是前所未有的大规模远距离输电。虽然还没有发生过恶性电压崩溃事故，但电压失稳引起的局部停电事故却时有发生。随着交直流并联输电通道和大规模受端负荷中心电网的逐步形成，受端负荷中心动态无功备用不足和送电通道过于集中，以及电力系统运行在接近电网极限输送能力状态，导致电力系统比以往更加容易受到电压失稳的威胁。

针对电力系统的电压稳定运行要求，如何采取实时、自动以及协调的电压控制措施以有效防止电压崩溃的发生，这既是电力工业提出的现实需求，也是电力科学工作者面临的巨大挑战。在这个需求的指引下，工业界和学术界做了大量的工作，其中最具有代表性的是分层协调电压控制（一般将这种控制方式称为三级电压控制或自动电压控制）。该控制结构在法国、意大利等国家有实际工程应用，在我国部分省级电网也已开始应用。三级电压控制大多采用稳态系统模型，可增加系统电压稳定裕度，可推迟电压崩溃的发生，从而给系统运行调度人员留有充分时间采取进一步的措施。在此背景下，还有如下问题需要研究：①三级电压控制对于提高系统静态电压稳定的作用显著，但原有分析静态电压稳定的方法并不能适用于考虑三级电压控制作用的电力系统模型，有必要对其进行扩展；②三级电压控制有利于提高系统长期电压稳定，但当系统处于紧急状态时，三级电压控制并不能保证阻止电压崩溃的发生，因此有必要以系统动态模型为基础进一步探讨最优协调电压控制问题；③三级电压控制属于慢速控制，难以解决暂态电压稳定控制问题，因此亟须以系统机电暂态模型为基础发展暂态电压稳定的控制方法。

近十年来，我们致力于将先进优化方法和控制理论应用于求解电力系统电压稳定分析与控制领域的相关问题，已发表相关学术论文 60 余篇。全书共分 23 章。第 1 章介绍静态电压稳定分析的基本方法，包括静态电压稳定极限点的基本计算方法、

连续潮流和最优潮流方法的比较分析。第2~4章介绍静态电压稳定极限点识别和计算的混合算法及含二次电压控制的电力系统静态电压稳定分析方法。第5章介绍非线性最优控制问题的求解方法,包括直接动态优化法、间接动态优化法、求解混合整数非线性最优控制问题的凸松弛法及模型预测控制法;第6章介绍电压稳定全过程精确仿真和准稳态仿真方法;第7~18章介绍长期电压稳定控制方法,包括非线性最优控制的直接动态优化法和间接动态优化法、模型预测控制方法、分布式模型预测控制方法及多目标强化学习方法应用于求解长期电压稳定控制问题。第19~23章介绍暂态电压稳定控制方法,包括基于轨迹灵敏度的暂态电压稳定预防控制方法、基于模型预测控制的暂态电压稳定紧急控制方法、多目标混合整数最优控制方法应用于求解暂态电压稳定紧急控制问题及三级电压控制体系下暂态电压稳定仿真及紧急控制方法。本书对所提出的各种算法均从模型建立、算法实现等方面进行了详细推导;在算例分析中,不仅采用了国际通用的标准试验系统作为算例,且采用了真实省级电网的实际运行数据作为算例。

本书成果得到国家自然科学基金项目(编号:51277078、50777021和5090702)、广东省自然科学基金项目(编号:9451064101003157)和973计划项目课题(编号:2013CB228205)的资助。在此感谢参与这些科研项目并为本书研究成果做出贡献的研究生们,他们是马冠雄、郭鸿毅、戴仲覆、杨柳青、袁康龙、周荣林、谢浩南、陈灿旭、黎予颖、陈文广、陈荃、李健、曲绍杰、胡泊、郑文杰、刘水平、王爽、高强、黄义隆、郭挺、喻振凡、李婷、欧阳逸风等。在研究过程中,还得到华南理工大学李立涅院士、吴捷教授,广东电网公司电力调度控制中心温柏坚总工程师/教授级高级工程师、杨银国副部长/教授级高级工程师的指导和帮助,在此一并表示感谢。此外,还要感谢本书作者的家人所给予的理解、鼓励和支持。

本书不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作者

2016年9月

# 缩 略 词 表

缩略词	外文全称	中文全称
ACL	Armature Current Limiter	定子电流限制器
AMPL	A Mathematical Programming Language	数学规划语言
AVC	Automatic Voltage Control	自动电压控制
AVR	Automatic Voltage Regulator	自动电压调节器
CMPC	Centralized Model Predictive Control	集中式模型预测控制
CPF	Continuation Power Flow	连续潮流
CR	Convex Relaxation	凸松弛
CSVC	Coordinated Secondary Voltage Control	协调二次电压控制
DAEs	Differential Algebraic Equations	微分-代数方程组
DCMPC	Decentralized Model Predictive Control	分散式模型预测控制
DDO	Direct Dynamic Optimization	直接动态优化
DMPC	Distributed Model Predictive Control	分布式模型预测控制
EMS	Energy Management System	能量管理系统
FPS	Full Process Simulation	全过程仿真
GAMS	General Algebraic Modeling System	通用代数建模系统
GMRES	General Minimum RESidual	广义极小残差
HVDC	High Voltage Direct Current transmission	高压直流输电
IDO	Indirect Dynamic Optimization	间接动态优化
KKT	Karush-Kuhn-Tucker	卡罗需-库恩-图克
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language	知识查询与操作语言
LIB	Limit Induced Bifurcation	极限诱导分岔
MF	Multi-Frontal method	多波前方法
MOCSVC	Multi-Objective Coordinated Secondary Voltage Control	多目标协调二次电压控制
MPC	Model Predictive Control	模型预测控制
NBI	Normal Boundary Intersection method	法线边界交叉法
NLP	Nonlinear Programming	非线性规划
NMPC	Nonlinear Model Predictive Control	非线性模型预测控制
NNC	Normalized Normal Constraint method	规格化法平面约束法
NPDIPM	Nonlinear Primal-Dual Interior Point Method	非线性原-对偶内点法
OCVC	Optimal Coordinated Voltage Control	最优协调电压控制
OLTC	On-Load Tap Changer	有载调压变压器
OPF	Optimal Power Flow	最优潮流
OXL	Over Excitation Limiter	过励磁限制器
PB	Pilot Bus	先导节点
PF	Pareto Frontier	帕累托前沿

续表

缩略词	外文全称	中文全称
PoC	Point of Collapse	崩溃点
PSAT	Power System Analysis Toolbox	电力系统分析工具箱
PSS	Power System Stabilizer	电力系统稳定器
PVC	Primary Voltage Control	一次电压控制
QSSS	Quasi Steady-State (QSS) Simulation	准稳态仿真
RSSQP	Reduced Space Sequential Quadratic Programming	简化空间序贯二次规划
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	数据采集与监视控制
SNB	Saddle Node Bifurcation	鞍结分岔
SQP	Sequential Quadratic Programming method	序贯二次规划方法
SSRRL	State Sensitivity based Reduced Reinforcement Learning	基于状态敏感度的简化强化学习
SVC	Secondary Voltage Control	二次电压控制
TDS	Time Domain Simulation	时域仿真
TVC	Tertiary Voltage Control	三次电压控制
TVSC-OPF	Transient Voltage Security Constrained Optimal Power Flow	暂态电压安全约束最优潮流

# 目 录

前言

缩略词表

第 1 章 静态电压稳定分析的基本方法	1
1.1 静态电压稳定分岔点的特征和判定条件	1
1.1.1 鞍结分岔点的特征和判定条件	2
1.1.2 极限诱导分岔点的特征和判定条件	2
1.2 连续潮流法	3
1.2.1 基本原理	3
1.2.2 修正方程式	5
1.2.3 修正方程式的预解	6
1.2.4 扩展状态变量修正值的计算	8
1.2.5 连续参数的选择	8
1.2.6 静态电压稳定极限点的确定	9
1.3 最优潮流法	10
1.4 崩溃点法	12
1.5 连续潮流法和最优潮流法的比较分析	15
1.5.1 连续潮流模型	15
1.5.2 最优潮流模型	16
1.5.3 两者的等价性条件	16
1.5.4 算例分析	17
1.6 小结	22
参考文献	23
第 2 章 静态电压稳定极限点识别和计算的混合算法	24
2.1 混合算法的基本原理	24
2.1.1 初步确定极限点性质	24
2.1.2 精确识别和计算极限点	26
2.2 混合算法的关键技术	26
2.2.1 对平衡发电机功率限制的处理方法	26



2.2.2	对崩溃点法的改进	28
2.3	算例分析	29
2.3.1	IEEE 30 节点系统	30
2.3.2	IEEE 118 节点系统	33
2.3.3	IEEE 300 节点系统	36
2.3.4	538 节点实际系统	38
2.4	小结	40
	参考文献	40
<b>第 3 章</b>	<b>含二次电压控制的 PV 曲线计算</b>	<b>42</b>
3.1	三级电压控制架构及模型	42
3.2	含二次电压控制的潮流计算	44
3.3	含二次电压控制的连续潮流计算	45
3.3.1	计算模型	45
3.3.2	连续参数的选择	46
3.3.3	控制发电机无功越限的处理	46
3.3.4	控制发电机电压越限的处理	47
3.3.5	节点优化编号和分块矩阵的应用	47
3.4	算例分析	47
3.4.1	新英格兰 39 节点系统	47
3.4.2	某实际省级电网	53
3.5	小结	57
	参考文献	57
<b>第 4 章</b>	<b>含二次电压控制静态电压稳定裕度计算的最优潮流法</b>	<b>58</b>
4.1	控制分区中含单个先导节点的静态电压稳定裕度计算	58
4.1.1	不接入控制发电机无功越限的处理	59
4.1.2	控制发电机无功越限的处理	59
4.1.3	计算模型	60
4.1.4	基于稀疏技术的非线性原-对偶内点法	61
4.1.5	算例分析	63
4.2	控制分区中含多个先导节点的静态电压稳定裕度计算	71
4.2.1	控制发电机无功出力的处理	71
4.2.2	不接入控制发电机无功越限的处理	71
4.2.3	多个先导节点电压的处理	72
4.2.4	计算模型	73

4.2.5 算例分析 .....	74
4.3 小结 .....	77
参考文献 .....	78
<b>第 5 章 非线性最优控制问题的求解方法 .....</b>	<b>79</b>
5.1 求解非线性最优控制问题的直接动态优化法 .....	79
5.2 求解非线性最优控制问题的间接动态优化法 .....	82
5.3 求解混合整数非线性最优控制问题的凸松弛法 .....	84
5.4 模型预测控制法 .....	87
5.5 小结 .....	89
参考文献 .....	90
<b>第 6 章 电压稳定全过程精确仿真和准稳态仿真 .....</b>	<b>91</b>
6.1 电压稳定全过程精确仿真 .....	91
6.1.1 多时标全过程系统模型 .....	91
6.1.2 同步发电机组模型 .....	94
6.1.3 综合负荷的指数恢复模型 .....	96
6.1.4 有载调压变压器模型 .....	98
6.1.5 网络模型 .....	100
6.2 长期电压稳定准稳态仿真 .....	100
6.2.1 时标分解与准稳态仿真 .....	100
6.2.2 准稳态近似数学模型 .....	101
6.2.3 准稳态仿真的求解过程 .....	102
6.2.4 准稳态仿真的局限性及其对策 .....	103
6.3 小结 .....	104
参考文献 .....	104
<b>第 7 章 长期电压稳定控制的直接动态优化方法 .....</b>	<b>106</b>
7.1 OCVC 模型 .....	106
7.2 基于直接动态优化的离散非线性规划模型 .....	107
7.3 结合二次罚函数的离散控制变量处理方法 .....	111
7.4 算法总体步骤 .....	113
7.4.1 初始点的选择 .....	114
7.4.2 罚函数的引入机制 .....	114
7.4.3 收敛精度 .....	115
7.5 算例分析 .....	115

7.6	小结	118
	参考文献	118
<b>第 8 章</b>	<b>长期电压稳定控制的多波前快速求解方法</b>	<b>119</b>
8.1	修正方程的数据结构	119
8.2	多波前分解法的原理	123
8.2.1	消去树结构	123
8.2.2	波前矩阵和更新矩阵	124
8.2.3	波前矩阵与更新矩阵举例	125
8.2.4	波前矩阵的组装	126
8.3	修正方程的迭代求解方法	127
8.3.1	预处理共轭梯度法	127
8.3.2	广义极小残差法	128
8.3.3	不完全 LU 分解预处理器	130
8.4	算例分析	131
8.5	小结	137
	参考文献	137
<b>第 9 章</b>	<b>长期电压稳定控制的线搜索滤波器内点法</b>	<b>139</b>
9.1	线搜索滤波器内点法的基本原理	139
9.2	算法实现步骤	143
9.3	算例分析	144
9.4	小结	149
	参考文献	149
<b>第 10 章</b>	<b>保留二次电压控制器的长期电压稳定控制切换直接算法</b>	<b>151</b>
10.1	含二次电压控制器的 OCVC 模型	151
10.2	切换直接算法	154
10.2.1	壁垒问题及其修正方程	154
10.2.2	利用切换技术求解壁垒问题	155
10.3	算法总体步骤	155
10.4	算例分析	156
10.4.1	新英格兰 10 机 39 节点系统	157
10.4.2	IEEE 50 机 145 节点系统	160
10.5	小结	161
	参考文献	162

第 11 章 长期电压稳定控制的间接动态优化方法	163
11.1 OCVC 模型及其变形	163
11.2 间接 Radau 排列算法	165
11.2.1 一阶最优性条件	165
11.2.2 Radau 排列算法	167
11.3 算法实现	167
11.4 算例分析	168
11.4.1 测试系统的相关设置	168
11.4.2 计算结果与分析	169
11.5 小结	172
参考文献	172
第 12 章 基于轨迹灵敏度的长期电压稳定模型预测控制方法	173
12.1 轨迹灵敏度的计算	173
12.1.1 连续点的轨迹灵敏度计算	174
12.1.2 跃变时刻的轨迹灵敏度计算	175
12.1.3 轨迹灵敏度的求解	180
12.2 基于准稳态假设的滚动优化模型	186
12.3 算法实现步骤	187
12.4 算例分析	187
12.4.1 新英格兰 10 机 39 节点系统	188
12.4.2 IEEE 50 机 145 节点系统	190
12.5 小结	193
参考文献	193
第 13 章 基于修正轨迹灵敏度的长期电压稳定模型预测控制方法	194
13.1 参考轨迹的引入	194
13.2 轨迹灵敏度的修正	196
13.3 控制元件的动态选取	197
13.4 算法的实现	197
13.5 算例分析	199
13.6 小结	201
参考文献	201
第 14 章 长期电压稳定的非线性模型预测控制方法	203
14.1 滚动优化的非线性规划模型	203

14.2	算法的实现	204
14.3	算例分析	205
14.3.1	算例一	206
14.3.2	算例二	208
14.4	小结	210
	参考文献	210
<b>第 15 章</b>	<b>长期电压稳定非线性模型预测控制的可行性恢复算法</b>	<b>211</b>
15.1	可行性恢复算法的基本原理	211
15.1.1	初期线搜索阶段	214
15.1.2	可行性恢复阶段的基本过程	216
15.1.3	基于 Dogleg 方向的计算步骤	218
15.2	KKT 残差的降低	219
15.3	算法的实现	220
15.4	算例分析	221
15.5	小结	225
	参考文献	225
<b>第 16 章</b>	<b>长期电压稳定模型预测控制的非线性规划灵敏度算法</b>	<b>227</b>
16.1	基于精确模型的滚动优化模型	228
16.2	非线性规划灵敏度算法的基本原理	230
16.3	算法的实现	232
16.4	算例分析	233
16.5	小结	236
	参考文献	237
<b>第 17 章</b>	<b>长期电压稳定分布式模型预测控制方法</b>	<b>238</b>
17.1	集中式滚动优化模型的分解	239
17.1.1	目标函数分解	239
17.1.2	电压预测模型分解	240
17.2	分布式模型预测滚动优化模型和求解方法	241
17.3	基于多代理技术的实现方法	243
17.3.1	多代理系统	243
17.3.2	开发工具	247
17.3.3	系统架构	248
17.4	算例分析	253

17.4.1	新英格兰 10 机 39 节点系统	253
17.4.2	IEEE 50 机 145 节点系统	257
17.5	小结	263
	参考文献	263
第 18 章	长期电压稳定多目标协调二次电压控制方法	264
18.1	多目标协调二次电压控制模型	265
18.1.1	电网分区及主导节点选择	265
18.1.2	多目标优化建模	265
18.1.3	轨迹灵敏度求取	267
18.2	简化强化学习方法的基本原理	268
18.2.1	基本思想	268
18.2.2	基本算法	269
18.3	多目标协调二次电压控制问题的求解	274
18.3.1	帕累托最优解的定义	274
18.3.2	求解思路和难点	275
18.3.3	控制变量的离散化	276
18.3.4	初始点定位与状态空间自主压缩	277
18.3.5	基于状态敏感度的全局搜索	278
18.3.6	简化强化学习的主循环	281
18.4	最优解的在线选取方法	287
18.4.1	实时权重系数的确定	287
18.4.2	具体选取方法	288
18.5	算例分析	288
18.5.1	帕累托前沿的对比分析	289
18.5.2	实时权重的控制效果分析	294
18.5.3	计算时间与收敛性分析	296
18.6	小结	297
	参考文献	298
第 19 章	基于轨迹灵敏度的暂态电压稳定预防控制方法	300
19.1	暂态电压稳定分析的数学模型	300
19.2	轨迹灵敏度分析	301
19.3	预防控制优化模型	302
19.3.1	暂态电压稳定约束描述	302
19.3.2	暂态电压稳定约束最优潮流模型	303

19.4	求解方法	305
19.4.1	系统轨迹对预防控制变量灵敏度的计算	305
19.4.2	暂态电压稳定约束的线性化	305
19.4.3	内点法求解非线性规划模型	307
19.5	算例分析	309
19.6	小结	314
	参考文献	314
<b>第 20 章</b>	<b>暂态电压稳定模型预测控制方法</b>	<b>316</b>
20.1	暂态电压稳定紧急控制的滚动优化模型	316
20.1.1	滚动优化模型	316
20.1.2	滚动优化模型的离散化	317
20.2	简化空间序贯二次规划求解算法	318
20.2.1	基本原理	318
20.2.2	关键技术	321
20.2.3	计算流程	323
20.3	算例分析	324
20.3.1	IEEE 3 机 9 节点系统	324
20.3.2	新英格兰 10 机 39 节点系统	326
20.3.3	计算效率分析	328
20.4	小结	330
	参考文献	330
<b>第 21 章</b>	<b>暂态电压稳定多目标混合整数最优控制方法</b>	<b>332</b>
21.1	多目标混合整数最优控制模型	332
21.2	基于规格化法平面约束法的求解方法	333
21.3	混合整数最优控制问题的求解	335
21.3.1	混合整数最优控制问题的凸松弛模型	335
21.3.2	凸化模型的等值简化	336
21.3.3	连续最优控制问题的求解	337
21.3.4	罚函数的引入	338
21.4	算例分析	339
21.4.1	IEEE 3 机 9 节点系统	339
21.4.2	新英格兰 10 机 39 节点系统	344
21.5	小结	349
	参考文献	349

第 22 章 考虑快投电容器的暂态电压稳定控制方法 .....	350
22.1 快投电容器组的控制模型 .....	350
22.1.1 投入控制模型 .....	351
22.1.2 切除控制模型 .....	351
22.2 快投电容器组控制定值动态优化模型 .....	352
22.3 混合整数动态优化问题的求解 .....	353
22.3.1 混合整数动态优化问题的凸松弛模型 .....	353
22.3.2 基于多重打靶法生成非线性规划模型 .....	354
22.3.3 简化空间序贯二次规划求解算法 .....	356
22.4 算法中的几个关键点 .....	357
22.4.1 目标函数权重的协调 .....	357
22.4.2 导数计算 .....	357
22.4.3 基于故障解耦和时段解耦的动态优化算法两层并行计算构架 .....	358
22.5 算例分析 .....	360
22.5.1 新英格兰 10 机 39 节点系统 .....	360
22.5.2 某实际省级电网 .....	364
22.5.3 两层并行算法的加速效果 .....	369
22.6 小结 .....	370
参考文献 .....	371
第 23 章 三级电压控制体系下暂态电压稳定仿真及控制 .....	372
23.1 二次电压紧急控制模型 .....	372
23.2 含二次电压紧急控制的暂态电压稳定仿真 .....	373
23.2.1 二次电压紧急控制与时域仿真的数据交互 .....	373
23.2.2 仿真步骤 .....	374
23.2.3 算例分析 .....	375
23.3 暂态电压安全切负荷控制协调优化模型 .....	379
23.3.1 协调优化模型 .....	379
23.3.2 仿真分析 .....	381
23.4 小结 .....	382
参考文献 .....	383
附录 A 新英格兰 10 机 39 节点系统原始参数 .....	384
附录 B IEEE 50 机 145 节点系统原始参数 .....	388



# 第 1 章 静态电压稳定分析的基本方法

对于一个运行中的电力系统，随着负荷接入的增加，供电系统传输到负荷的功率（也是负荷从供电系统吸收的功率）也随之增加，而负荷节点电压却随之缓慢下降；而当负荷接入增加到一定量时，供电系统传输到负荷的功率到达最大值，此时对应的状态就是系统的静态电压稳定极限点；而此后负荷接入的增加反而会导致供电系统传输到负荷的功率减少，且随着负荷节点电压的急剧下降，发生电压崩溃。

静态电压稳定极限点的计算常采用如下的扩展潮流方程：

$$f(x) + \lambda \cdot b = 0 \quad (1-1)$$

式中， $b$  为系统中各节点的负荷增长方式； $\lambda$  为负荷增长参数， $\lambda=0$  时该式为常规潮流方程， $\lambda$  所能达到的最大值  $\lambda_{\max}$  的状态即对应于系统的静态电压稳定极限点，如图 1-1 所示； $x$  为系统的状态变量，即是待求的节点电压幅值和相角。

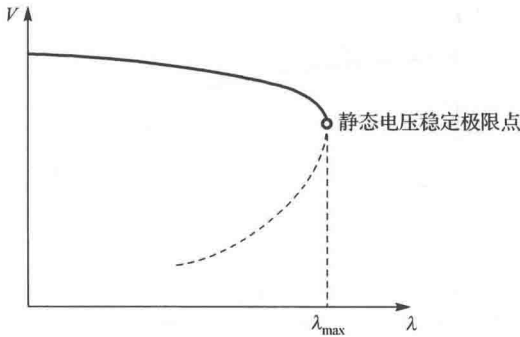


图 1-1 静态电压稳定极限点示意图

在电压稳定分析与控制中，静态电压稳定极限点的计算具有十分重要的意义。给定一个基态的电力系统，并给定一个系统中发电机有功出力和负荷功率的增长方向，就可以计算出系统在此方向上的静态电压稳定极限点。只有得到较为精确的电压稳定极限点，才能知道较为精确的电压稳定裕度；也只有得到这个电压稳定极限点，而且知道了它的分岔类型，才能计算出较为精确的灵敏度信息，并在此基础上得到最佳的提高电压稳定裕度的控制方案。

## 1.1 静态电压稳定分岔点的特征和判定条件

在静态电压稳定性分析中，主要有两种类型的电压稳定极限点：鞍结分岔