

EPRI 电力系统工程丛书



Power System  
Voltage Stability

电力系统

电压稳定

[美] CARSON W. TAYLOR 著  
王伟胜 译



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn

EPRI 电力系统工程丛书

电力科技专著出版资金资助项目



# 电力系统 电压稳定

[美]CARSON W. TAYLOR 著

王伟胜 译

Power System  
Voltage Stability



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是畅销国际电力界的经典之作,是第一部精确阐述电力系统电压稳定性问题解决方案的专著。本书描述了电力系统中输电系统、发电系统和配电/负荷系统的元件特性,同时给出了不同元件的建模方法;此外,以小型等值电力系统和大型实际电力系统为例,本书分别论述了应用计算机进行电压稳定静态和动态仿真的方法,并分析了包含 HVDC 联线电力系统的电压稳定性问题。

本书的独特之处是针对电压问题提出了电力系统规划和运行的导则、应用潮流和动态仿真程序分析电压稳定性的方法,以及描述了世界许多电力系统实际发生的电压失稳事件。

这本权威专著深入透彻地论述了电力系统的电压稳定性问题,可以帮助读者从事电力系统规划和运行工作。

作为从事电力工作人员的必备工具,本书包括了解决电力系统电压稳定性问题所必需的知识 and 能力。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统电压稳定/(美)泰勒(Taylor, C. W.)著;王伟胜译. - 北京:中国电力出版社, 2002

ISBN 7-5083-1160-4

I. 电… II. ①泰…②王… III. 电力系统-系统电压调整 IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 049808 号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2001-1118 号

Power System Voltage Stability

Carson W. Taylor, 1st Edition

ISBN 0-07-063184-0

Copyright© 1994 by the McGraw-Hill, Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and China Electric Power Press.

本书中文简体字翻译版由中国电力出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2002 年 12 月第一版 2002 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13.5 印张 298 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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)

## 中文版序

我和中国的电力工程师们有过多次愉快的交往，曾经到北京访问过中国电力科学研究院。我非常高兴为《电力系统电压稳定》中文版作序。中国正在扩建电力系统，以满足电力负荷的快速增加。我希望此书能对中国电力工程师有所帮助。

我相信王伟胜博士的翻译工作是十分出色的。为了这本书能早日和大家见面，他做了大量的工作。王伟胜博士仔细研究了此书的英文版本，和我进行了多次交流，澄清了有关疑问，并纠正了原书英文版中的一些错误。

我著述《电力系统电压稳定》至今已近十年。随着其他研究成果的发表和电力公司实践经验的积累，电压稳定性研究课题日趋成熟，有关仿真软件也在不断改进。然而，我相信《电力系统电压稳定》仍然是一本非常有价值、易于阅读且实用性强的专著。电压稳定性的基本概念是不随时间改变的。

《电力系统电压稳定》英文版一直很受欢迎。精装版本和亚洲平装版本很快销售一空，再版也是这样。我收到了很多关于此书的赞美之辞，其中对我而言最有意义的莫过于现代电力潮流计算程序之父 William F. Tinney 的来信，他在信中写道：“无论是对电力工程人员还是研究人员而言，此书为开始研究电压稳定问题的所有人员提供了最佳途径。该书内容精练而深刻，论述简洁而全面。在电压稳定性方面此书是独一无二的。”

电力系统电压稳定领域尚有许多有待于解决的问题，如大规模动态分析方法的应用、在线电压安全评价的应用和广域分布式控制的实现等。动态分析比较准确，能给出更多信息。当控制装置的时间特性十分重要时，需要进行动态分析。另外，电力系统短期（暂态）电压稳定性通常是最关心的问题，对此必需进行动态仿真。离线仿真一般在电力系统实际运行状态发生前数天或数个星期进行，在线接近实时的安全评价可以消除离线仿真的不确定性。无论是集中控制还是分布控制系统，利用远方电厂或变电站的数据可以提高电力系统稳定和电压控制能力。

在未来的日子里，中国的电力工程师将在电压稳定技术领域继续作出重要贡献。最后，我再次衷心希望此书对中国电力系统的发展能有所帮助。

Carson W. Taylor  
波特兰，俄勒冈，美国  
2002年1月

## 译者前言

电压稳定性问题早在前苏联学者日丹诺夫所著的《电力系统稳定》(张钟俊译,北京:高等教育出版社,1957)中就有论述。但直到20世纪70和80年代,在世界范围内发生过多起和电压稳定相关的电力系统事故之后,该问题才引起电力工业界和学术界的广泛重视,并且成为电力系统领域的一个研究热点。我国的电力系统也曾发生过电压稳定事故,并为此进行过大量的研究工作。

目前,我国正在实施全国电网互联和西电东送等重大工程,电力系统正在不断发展壮大。与此同时,我国正在实行电力体制改革,逐步建立和完善电力市场。考虑到环境和经济因素的制约,未来的电力系统运行状态会越来越接近极限状态,以满足电力需求的不断增加。因此,电压稳定问题今后仍将是一个具有挑战性的问题。

本书的英文版于1994年出版,是国际上有关电压稳定性的第一本专著。原著作者Carson W. Taylor先生是国际著名电力专家,在电力系统分析和控制领域尤其是对电压稳定性问题具有丰富的理论知识和实践经验。Taylor先生曾主持和参与了国际大电网会议(CIGRÉ)和跨国电气与电子工程师学会(IEEE)等组织的有关电力系统电压稳定性研究工作,并主持了太平洋西北系统和邻近区域的电压稳定性研究工作。该书的特点是理论与实践相结合,强调电压稳定性问题的基本概念和物理本质,注重电压稳定的实用化分析方法和改进措施。本书适合于从事电力系统规划和运行的工程技术人员,同时也可作为高等院校电力系统专业的师生参考。

在本书翻译过程中,译者同Taylor先生进行过多次交流,纠正了原版中的一些错误之处。为了不破坏本书的整体性,译者对这些修改不再一一标注。另外,本书保留了英文版中有关变量和符号的规定。

感谢McGraw-Hill出版公司和Taylor先生同意该书在中国出版发行,特别是Taylor先生在翻译过程中给予了热情支持和帮助,并欣然为本书作序。

胡学浩教授级高工在翻译过程中给予了极大的帮助,并且审校了本书的第4章。博士研究生申洪和赵海翔两位同学阅读了本书的初稿,提出了许多修改意见,在此一并致谢。

夏道止教授对本书的翻译工作给予了关心和指导,并审校了本书的第8章。译者有幸师从夏道止教授,在他的指导下从事电压稳定性分析研究,受益匪浅。这对完成本书的翻译工作有巨大的帮助,在此表示由衷的谢意。

周孝信院士对本书的翻译与出版给予了极大的关心和支持。在周孝信院士、杨以涵教授和何大愚教授级高工的鼎力推荐下，本书得到了中国电力出版社电力科技专著出版基金的资助，在此深表谢意。

限于译者水平，书中难免有错误和不妥之处，请读者批评指正。

译 者

2002年6月于北京

# 原 版 序

近年来，由于新建发电厂和输电线路受到一系列的限制，许多电力公司被迫采取一切可能办法来提高现有网络的功率传输能力。

电压稳定性问题所关心的是：电力系统在正常运行和预想事故条件下所有节点维持可接受的电压水平的能力。如果扰动使系统电压持续下降，且无法控制，则称电力系统进入电压失稳状态。

发电机和输电系统无功支持不足将导致电压失稳或电压崩溃。近几年来，电压失稳已经引起了多次电力系统重大事故。因此需要深入研究电压稳定现象的机理，并提出防止系统发生电压失稳的措施。这对电力公司具有重要的价值。

本书作者 Carson W. Taylor 先生是电力系统电压稳定性领域的一位国际知名专家。他不仅对电压稳定性的基本概念有深入的认识，而且在研究解决电压失稳实际问题的方法上也显示出其卓越的才能。Carson 举办过许多次有关电压稳定性问题的研讨班，并发表了大量的技术论文。

能为这本非常及时的专著作序，笔者甚感荣幸，并相信本书的出版对电力行业的工程师和学生而言都具有重要的价值。

Neal J. Balu 博士  
项目经理  
电力系统规划与运行项目处  
电力系统部

# 原版前言

电力系统的功率传输能力一般是受功角（同步）稳定或者热极限的限制。系统发生的停电事故通常和暂态稳定性相关。令人欣慰的是，由于采用了短路快速切除、先进励磁系统和多种特殊的稳定控制措施，电力系统的暂态稳定性问题已经减少。

然而，电压（负荷）稳定性目前已成为电力系统规划和运行中主要关心的问题。越来越多的电力公司正面临着电压稳定性的限制。电压失稳和崩溃已经造成多次重大的系统事故（停电），如 1987 年 7 月东京发生的大停电。

在可以预见的未来时间里，电压稳定性问题仍将是一个挑战，并且其重要性会日益增加。其中一个原因是需要更充分地利用现有的输电设备。应用无功补偿可以增加现有输电系统的利用率——从本质上讲这种措施的鲁棒性不及“增加架空线路”。

在过去的 10~15 年里，特别是近 5 年中，电力工程师、电力专家和高等院校的研究人员深入地研究了电压稳定性问题，发表了数百篇技术论文，并举办了多次学术会议、座谈会和研讨会。现在，许多电力公司已经开发了实用的分析方法，在规划和运行阶段防止系统在可信扰动下发生电压失稳。电力系统在电压稳定过程中发生的所有相关现象，包括长期现象，都可以通过时域仿真来验证。

虽然电力专家对电压稳定性已有深入的了解，但目前非常需要一本全面论述电压稳定性并且具有实用价值的专著。本书是有关电压稳定性的第一本专著。

笔者从 1988 年开始举办为期 2~3 天的电压稳定研讨班，《电力系统电压稳定》是这一系列研讨班的产物。作为邦纳维尔电力局（BPA）的专职工程师，笔者从事了太平洋西北系统和邻近区域的电压稳定性研究，这本专著反映了有关情况。同时，这本专著还反映了作者在西部系统协调委员会（WSCC）、北美电力可靠性委员会（NERC）、跨国电气与电子工程师学会（IEEE）、国际大电网会议（CIGRÉ）和美国电力研究院（EPRI）等组织参与电压稳定性研究工作的情况。

虽然目前对电压稳定性已经有相当的了解，但仍存在许多方面的问题，涉及范围从发电机控制到输电线路无功补偿、配电网设计以及负荷特性模拟等等。因此，电力系统中大量元件的物理特性和数学模型非常重要。

《电力系统电压稳定》强调电压稳定性的物理或者工程方面，从概念上理解电压稳定性问题。本书尽可能采用最简单的模型来解释有关概念，并强调计算机分析的实用方法。目的是培养读者对电压稳定性问题的觉察能力，而不是仅仅叙述有关电压稳定性的复杂的数学分析方法。本书的主要对象是从事电力系统规划和运行工作的工程师，同时适合于作为高校学生的选修课程教材。高校研究人员也可以从本书中获取电压稳定性问题研究所必



需的背景知识。

电压稳定性问题是一个非常吸引人的领域，本书各章所列的参考文献可供读者进行深入研究。这些并不是全部的参考文献，但基本上代表了近几年发表的成果，它们均建立在早期研究工作的基础之上。为了与本书的特定读者保持一致，大多数参考文献可读性强，不需要高深的数学知识。

### **本书概要**

本书分为9章和6个附录。第1章重点介绍输电系统的无功传输；第2章阐述电压稳定性的主题，并给出相关定义和基本概念。根据历时长短，电压稳定可以分为暂态和长期现象。

第3~5章描述输电系统、发电系统和配电/负荷系统元件的特性，重点在于元件的数学模型。

第6章和第7章给出了两个示例系统的计算机静态和动态仿真结果，其中一个为小规模的等值系统，另一个为大规模的实际系统。另外，应用常规计算机程序和增强型计算机程序分别研究了暂态和长期电压稳定性问题。

第8章论述了和HVDC联线相关的电压稳定性，其中HVDC逆变器的无功需求非常重要。

第9章为电力系统规划和运行的准则，以及解决系统电压稳定性问题的潜在方法。

附录内容包括应用计算机进行潮流和动态仿真的方法，以及世界上发生的主要电压失稳事件等等。

目前，电压稳定性问题仍是一个新的研究领域，在未来的几年里将出现许多有关电压稳定性的机理解释、计算机仿真软件和在线安全评价软件。事实上，本书在交付出版之前一直在更新内容。因此，将来需要对本书的内容进行修订。笔者恳切希望广大读者对本书内容进行评论，并为修订本书提出宝贵的建议。来信请寄：252 Northwest Seblar Court, Portland, Oregon 97210。

在桌面出版方面，笔者采用了Macintosh IIfx计算机和FrameMaker编辑出版软件。此外，笔者还采用过DeltaGraph和Canvas等其他软件。本书的原稿通过软盘交给McGraw-Hill出版商。

### **致谢**

笔者首先要感谢许多研讨班的参加人员、BPA的同事和工业界的同事。从很大程度上讲，本书是大量文献和实际经验的总结。通过论文、书信和讨论等形式，Walter Lachs先生、Harrison Clark先生、Thierry Van Cutsem博士、Mrinal Pal博士和其他人员提出了许多建设性的意见。在国际学术界，笔者有幸参加了CIGRÉ的两个电压稳定性专题工作组。作为美国电力研究院（EPRI）软件开发项目的一部分，笔者同Prabha Kundur博士和安大略水电局（Ontario Hydro）其他同事的讨论对本书而言也非常重要。

Kundur博士和Mark Lauby先生审阅了本书的原稿，并提出了许多宝贵的建议。当然，

笔者对该书的最终内容负全部责任。

本书得到了美国电力研究院（EPRI）的资助。在此谨向 EPRI 的 Neal Balu 博士、Mark Lauby 先生和 Dominic Maratukulam 先生表示感谢。

虽然本书是在工作之余完成的，但笔者还要感谢 BPA 的工程管理部门，他们促进了电力系统技术的进步，提供了研究电压稳定性领域中有关问题的机会，并使笔者有幸参加了工业界和学术界有关电压稳定性的研究工作。当然，本书内容只是作者的认识与经验，并不一定反映邦纳维尔电力局的观点。

最后，作者还要感谢妻子 Gudrun Taylor 的鼓励和支持，她在计算机上花费了许多时间，耐心地对本书进行了校对。

Carson W. Taylor

波特兰，俄勒冈

1992 年 12 月

# 目 录

中文版序  
译者前言  
原版序  
原版前言

<b>1 电力系统概论</b> .....	1
1.1 电力系统分析与运行简介 .....	1
1.2 基于简单模型的有功传输 .....	2
1.3 基于简单模型的无功传输 .....	4
1.4 无功功率传输的难度 .....	6
1.5 短路容量、短路比与电压调整 .....	9
参考文献 .....	11
<b>2 电压稳定性概念</b> .....	12
2.1 电压稳定、电压崩溃与电压安全 .....	12
2.2 电压失稳的时域与机理 .....	13
2.3 电压稳定性与功角稳定性的关系 .....	17
2.4 饱和电力系统中的电压失稳问题 .....	18
2.5 电压稳定性分析方法介绍： $P-V$ 曲线 .....	19
2.6 电压稳定性分析方法介绍： $V-Q$ 曲线 .....	22
2.7 长期电压稳定图释 .....	24
2.8 小结 .....	27
参考文献 .....	27
<b>3 输电系统无功补偿与控制</b> .....	29
3.1 输电系统特性 .....	29
3.2 串联电容器 .....	34
3.3 并联电容器组与并联电抗器 .....	36
3.4 静止无功系统 .....	38
3.5 串联补偿与并联补偿比较 .....	43
3.6 同步调相机 .....	44

3.7	输电网中的 LTC 变压器 .....	45
	参考文献 .....	46
<b>4</b>	<b>电力系统负荷 .....</b>	<b>48</b>
4.1	次输电和配电网络概述 .....	48
4.2	负荷组成的静态和动态特性 .....	51
4.3	负荷无功补偿 .....	66
4.4	LTC 变压器和配电电压调节器 .....	69
	参考文献 .....	75
<b>5</b>	<b>发电机组特性 .....</b>	<b>78</b>
5.1	发电机无功容量 .....	78
5.2	发电机控制与保护 .....	84
5.3	系统功率冲击响应 .....	87
5.4	发电厂响应特性 .....	91
5.5	自动发电控制 .....	93
	参考文献 .....	97
<b>6</b>	<b>等值系统仿真 .....</b>	<b>100</b>
6.1	等值系统 1: 静态仿真 .....	100
6.2	等值系统 1: 动态仿真 .....	102
6.3	等值系统 2: 静态仿真 .....	105
6.4	等值系统 2: 动态仿真 .....	112
	参考文献 .....	114
<b>7</b>	<b>大型电力系统电压稳定性 .....</b>	<b>115</b>
7.1	系统描述 .....	115
7.2	负荷模型与测试 .....	116
7.3	潮流分析 .....	119
7.4	包含低压减载的系统动态性能 .....	122
7.5	机械投切电容器的自动控制 .....	124
	参考文献 .....	128
<b>8</b>	<b>HVDC 联线电压稳定性 .....</b>	<b>130</b>
8.1	HVDC 基本方程 .....	132
8.2	HVDC 运行 .....	134
8.3	电压崩溃 .....	137
8.4	基于短路比的电压稳定性概念 .....	137
8.5	电力系统动态性能 .....	141
	参考文献 .....	143

<b>9 电力系统规划与运行导则</b> .....	145
9.1 可靠性准则 .....	145
9.2 解决方案：发电系统 .....	149
9.3 解决方案：输电系统 .....	151
9.4 解决方案：配电与负荷系统 .....	154
9.5 电力系统运行 .....	156
9.6 总结：电压稳定性挑战 .....	159
参考文献 .....	159
<b>附录 A 标么制说明</b> .....	162
<b>附录 B 电压稳定性和潮流计算问题</b> .....	164
B.1 节点导纳矩阵 .....	164
B.2 牛顿—拉夫逊方法 .....	165
B.3 基于潮流模型的模态分析 .....	169
B.4 快速解耦方法 .....	171
B.5 电压稳定性的潮流分析法 .....	172
B.6 电压稳定性静态指标和研究领域 .....	172
参考文献 .....	174
<b>附录 C 潮流仿真方法</b> .....	176
参考文献 .....	179
<b>附录 D 长期电压稳定性的动态分析方法</b> .....	180
参考文献 .....	182
<b>附录 E 等值系统 2 数据</b> .....	184
参考文献 .....	186
<b>附录 F 电压失稳事件</b> .....	187
参考文献 .....	193
<b>索引</b> .....	196

# 电力系统概论

电力系统电压稳定性涉及到发电、输电和配电系统，与电力系统稳态和动态特性的其他方面有密切联系。电压控制、无功补偿与管理、功角（同步）稳定、继电保护和控制中心操作等都将影响到系统的电压稳定性。在下章介绍电压稳定性之前，本章首先回顾一下电力系统的基本特性，这些知识对从事电力系统规划和运行的工程师非常重要。

## 1.1 电力系统分析与运行简介

电力系统安全性是本书讨论的重点，目的是力争避免大型输电系统发生故障和停电事故。在紧急状态下，电力系统的经济运行处于次要地位，但在正常条件下经济运行仍是一个重要方面。因此，在系统设计和运行中需要权衡和兼顾经济性和安全性。

### ● 扰动

大型互联电力系统可能遭受许多扰动，这些扰动将危及系统的安全。近年来，发电和输电系统的负荷水平不断增加，使得扰动可能引起的后果也日益加重。对三相电力系统而言，扰动可以分为三相对称和不对称扰动。其中不对称扰动通常由短路故障引起，只影响一相或两相。最常见的故障方式为接地故障。对称故障由输电线路开断、发电机开断或负荷变化引起。无论电力系统发生何种扰动，都将引起发电机间的机电振荡。

### ● 计算机仿真程序

用于研究电力系统稳态和动态性能的大型计算机仿真程序包括短路程序、潮流程序、小干扰稳定（特征值分析）程序、暂态稳定程序和长期动态程序等。

潮流程序是进行电力系统分析、规划和运行的基本工具。此外，潮流计算方法还用于最优潮流、动态仿真、在线安全评价和状态估计等软件。在潮流计算中，发电机和输电线路处于对称状态，且只考虑稳态基频正弦分量，负荷则集中在大功率供电变电站的母线。通过潮流计算，可以得出系统每个母线电压的幅值和相角，以及各条线路传输的有功和无功功率。附录 B 叙述了潮流计算问题。

暂态稳定时域仿真程序用于确定转子角度的同步稳定性，包括第一摆稳定和随后的暂态阻尼特性，同时还可以分析感应电动机和各种控制装置的动态行为，采用的计算方法为数值积分方法。特征值及其相关的方法用于判别线性化系统的机电稳定性，通常研究电力系统对低频振荡的阻尼特性和控制措施的效果。本书姊妹篇——P. Kundur 博士所著的

《电力系统稳定与控制》对这些内容进行了深入论述。

长期动态程序分析电力系统较慢的动态特性，有关内容将在随后章节及附录 D 中讨论。

### ● 控制措施

电力系统中的各种控制措施包括就地和集中控制对电压稳定性十分重要。就地控制措施，特别是在发电厂的各类控制，通常为自动方式，并且具有较快的响应速度。同时，直接和间接负荷控制对电压稳定性也非常关键。

每个电力公司或者电力系统的控制区域都设有控制或调度中心，其向发电厂和变电站发布较慢的自动和手动控制命令。最基本的集中自动控制为自动发电控制（AGC），而集中电压控制一般需要“人为参与”（“man-in-the-loop”）。除了电话通信方式之外，在同步互联的多个系统中很少采用集中控制。

### ● 大规模系统

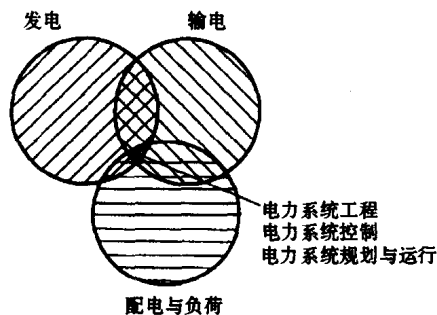


图 1-1 电力系统工程领域

（对热电联产和独立发电者而言，只需要了解系统工程中的发电和配电部分）

电力系统是世界上最大的人造动态系统，电力网络通常含有数千个节点，系统的动态特性需用上千个一阶非线性微分方程来描述。对任何时刻而言，电力系统的发电功率必须和负荷功率相匹配。电力系统中的发电机通过高负荷水平的输电线路相连，不同的发电机可能相距数千公里，但是它们必须保持同步运行。对于每天的负荷变化和可能发生的扰动而言，所有发电机必须保持同步运行。

电力系统由发电、输电和配电/负荷系统组成，这三个子系统必须作为一个整体而一起运行。了解每个子系统非常重要，同样还需了解它们之间的关联特性。图 1-1 中的相交部分即为电力系统工程。

电压稳定性虽然只是电力系统工程的一个方面，但它非常具有吸引力！

## 1.2 基于简单模型的有功传输

本节和下节将回顾电力传输的基本概念。为便于理解，将采用简单模型。在掌握基本概念之后，我们可以建立适合计算机仿真的任何复杂模型。

输电线路传输的有功和无功功率取决于送端和受端电压的幅值和相角。图 1-2 表示采用的模型，线路两端用同步电机表示，送端和受端之间有一个等值电抗。假设线路两端大容量系统的电压调节能力很强，即送端和受端的电压恒定。

受端的功率表达式如下

$$\begin{aligned}
 S_r &= P_r + jQ_r = E_r I^* \\
 &= E_r \left[ \frac{E_s \cos \delta + jE_s \sin \delta - E_r}{jX} \right]^* \\
 &= \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta + j \left[ \frac{E_s E_r \cos \delta - E_r^2}{X} \right] \\
 P_r &= \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \tag{1-1}
 \end{aligned}$$

$$Q_r = \frac{E_s E_r \cos \delta - E_r^2}{X} \tag{1-2}$$

同理，送端的功率表达式为

$$P_s = \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \tag{1-3}$$

$$Q_s = \frac{E_s^2 - E_s E_r \cos \delta}{X} \tag{1-4}$$

由于采用无损线路模型，所以这里  $P_s$  和  $P_r$  相等，且线路最大传输功率对应的功角  $\delta$  等于  $90^\circ$ 。图 1-3 所示曲线对应于式 (1-1) 或式 (1-3)，称之为功角曲线。最大传输功率对应的功角  $\delta$  等于  $90^\circ$ ，表示理想情况。如果考虑线路损耗或受端并联有电阻性负荷，则最大传输功率对应的功角  $\delta$  会改变。下章将讨论受端为阻抗负荷时的情况。

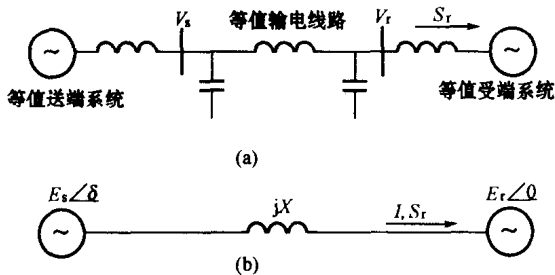


图 1-2 计算有功和无功功率传输的简单模型  
(a) 系统原等值电路；(b) 戴维南等值电路

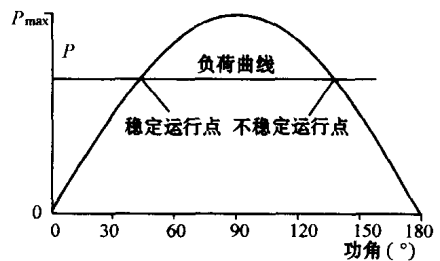


图 1-3 简单模型的功角曲线

图 1-3 中负荷曲线表示送端发电机机械（涡轮机）功率恒定，机械功率和电磁功率曲线有两个交点，其中左边交点对应的功角小于  $90^\circ$ ，为系统稳定运行点，右边交点为不稳定运行点。为了说明此结论，假设受端系统相当大，可看作电压相角和转速不变的无穷大母线。如果送端发电机的机械功率有微小增加（通过增大汽门或水门开度），发电机转速将增加，从而功角将增大。对图 1-3 中右边的运行点而言，功角增大将进一步降低电磁功率，结果使得发电机转速继续增加，功角随之增大；而对左边的运行点而言，功角增大后提高了电磁功率，最终与增加后的机械功率相匹配。

在一般传输功率水平下，功角不超过  $30^\circ$ 。当功角  $\delta$  用弧度表示时有  $\sin \delta \cong \delta$ ，因此可将式 (1-1) 和式 (1-3) 线性化（例如， $30^\circ$  约等于  $0.5236\text{rad}$ ，而  $\sin 30^\circ = 0.5$ ；注意，



功角较小时，图 1-3 中的电磁功率和功角近似呈线性关系)，改写为

$$P \cong P_{\max} \delta$$

由上式可知：有功功率传输主要取决于功角大小。

为了保证电力系统静态功角（同步）稳定，输电线路两端的相对角度通常保持在小于  $44^\circ$  的范围内<sup>[1]</sup>。

### 1.3 基于简单模型的无功传输

本节重点讨论输电线路的无功功率传输特性。由功角曲线可知，当线路输送的有功功率水平较高时，对应的功角较大，此时送端和受端需要大量的无功功率。假设系统送端和受端发电机的电势相等，即  $E_s = E_r$ ，图 1-4 给出对应于功角曲线的无功功率变化特性，这里  $Q_s = -Q_r$ 。

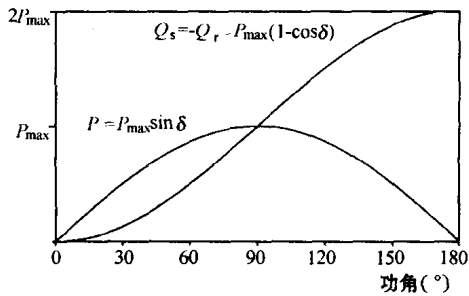


图 1-4 简单模型的功角曲线以及  $E_s = E_r$  时的无功功率

静态稳定极限运行点对应的功角等于  $90^\circ$ ，此时送端和受端所需要的无功功率等于  $P_{\max}$ （参照图 1-2，系统所需的部分无功功率由输电线路对地电容提供）。

通常，人们只关心电压幅值的变化。但在电压紧急或崩溃状况下，当受端或负荷端发生电压跌落时，实际输电线路、等值输电线路或变压器的无功功率传输能力将十分重要。参照图 1-2，现在仅考虑通过输电线路的无功功率，用  $V_s \angle \theta$  和  $V_r \angle 0$  分别代表线路送端和受端的电压， $X$  代表输电线路电抗，则式 (1-2) 和式 (1-4) 可改写为

$$Q_r = \frac{V_s V_r \cos \theta - V_r^2}{X} \quad (1-5)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2 - V_s V_r \cos \theta}{X} \quad (1-6)$$

当线路两端的相角差较小时有  $\cos \theta \cong 1$ ，所以有下列近似表达式

$$Q_r = \frac{V_r (V_s - V_r)}{X} \quad (1-7)$$

$$Q_s = \frac{V_s (V_s - V_r)}{X} \quad (1-8)$$

由式 (1-7) 和式 (1-8) 可知：无功功率传输大小主要取决于电压的幅值，传输方向为由电压高的一端流向电压低的一端。进而有：

- (1)  $P$  和  $\delta$  耦合较强；
- (2)  $Q$  和  $V$  耦合较强。

某些电力系统计算方法利用了这些物理特性，如快速解耦潮流算法（参见附录 B）。