

■ 国外电力名著译丛

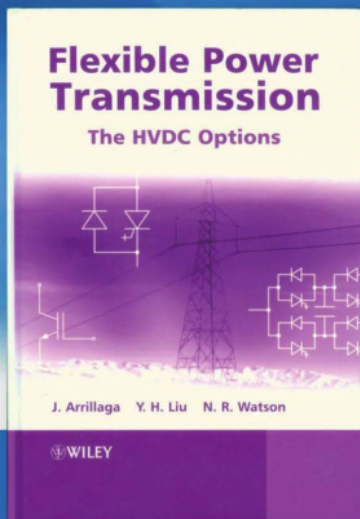
Flexible Power
Transmission

The HVDC Options

灵活电力传输 ——HVDC 的选择

[新西兰] Jos Arrillaga [中国] Y.H. Liu [新西兰] Neville R. Watson 著

林海雪 汤广福 贺之渊 译



WILEY



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



国家电网公司
电力科技著作出版项目

■ 国外电力名著译丛

**Flexible Power
Transmission**

The HVDC Options

灵活电力传输 ——HVDC的选择

[新西兰] Jos Arrillaga [中国] Y.H. Liu [新西兰] Neville R. Watson 著

林海雪 汤广福 贺之渊 译

 WILEY



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要讲述以最新的电力电子技术改造传统的以电网换相换流(LCC)或电流源换流(CSC)为基础的高压直流(HVDC)输电系统,对以电压源换流(VSC)为基础的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术做了较全面地论述。这些技术在智能电网建设、城网增容改造、分布式电源的利用、提高配电网的电能质量以及向偏远地区或通过海底电缆供电等方面,具有广阔的应用前景。

具体内容包括:分别对各种相关的电力电子器件(如GTO、IGBT)特性和换流器技术特点做了介绍,对传统HVDC和VSC-HVDC技术基本原理和性能做了比较论述。对于HVDC中几个关键技术问题分章节做了专门分析,包括各种换流电路拓扑特点、谐波的产生和抑制、PWM技术的应用、各种多电平换流技术、VSC的分层控制、多端供电、AC-DC系统相互作用以及DC联接的故障响应等,并以大量仿真结果和具体工程项目为佐证。

本书可以供电网规划、设计和运行技术人员以及HVDC研发人员参考,也可作为大专院校电气专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

灵活电力传输:HVDC的选择/(新西兰)阿里拉加,刘永和,(新西兰)沃森著;林海雪,汤广福,贺之渊译.—北京:中国电力出版社,2010.11

书名原文:Flexible Power Transmission: The HVDC Options

ISBN 978-7-5123-0538-0

I. ①灵… II. ①阿… ②刘… ③沃… ④林… ⑤汤…⑥贺… III. ①输电—
电力工程 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第215440号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2009-3670号

Flexible Power Transmission: The HVDC Options

ISBN 978-0-470-05688-2

Copyright ©2007 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Electric Power Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

版权所有。John Wiley & Sons Ltd. 所出版英文版的授权翻译。翻译的准确性完全取决于中国电力出版社, John Wiley & Sons Ltd. 不予负责。未经原版权持有人 John Wiley & Sons Ltd. 的书面许可,不得以任何形式复制本书内容。

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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011年1月第一版 2011年1月北京第一次印刷

700毫米×1000毫米 16开本 19.5印张 414千字

印数0001—3000册 定价68.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

译者序

本书原书于 2007 年出版，由国际著名的电力技术专家、新西兰坎特伯雷（Canterbury）大学 Arrillaga 教授为主编著，涉及的基本内容是以最新的电力电子技术改造传统的以电网换相转流（LCC）或电流源换流（CSC）为基础的高压直流（HVDC）输电系统。对以电压源换流（VSC）为基础的柔性直流（VSC-HVDC）技术作了较全面地论述。该技术克服了传统 HVDC 的不足（例如：不能向小容量交流系统及不含旋转电机的负荷供电，产生的谐波大、换流器的功率因数低，占地面积大等），其优良的控制和运行特性使柔性直流技术在较短距离输电中也可和交流输电竞争。除了具备通常直流联网的优点外，此技术可用于智能电网建设、城网增容改造、分布式电源的利用；提高配电网的电能质量以及向偏远地区或通过海底电缆供电等方面，且具有广阔的应用前景。

本书共 11 章，分别对各种相关的电力电子器件（如 GTO、IGBT）特性和换流器技术特点作了介绍，对传统 HVDC 和 VSC-HVDC 技术基本原理和性能作了比较论述。对于 HVDC 中几个关键技术问题分章节作了专门分析，包括各种换流电路拓扑特点、谐波的产生和抑制、PWM 技术的应用、各种多电平换流技术、VSC 的分层控制、多端供电、AC-DC 系统相互作用以及直流联接的故障响应等，并以大量仿真结果和具体工程项目为佐证。

我国电网正在迅速发展，如何保证电网安全、稳定、优质、高效是一个重大课题，灵活交流输电（FACTS）技术的应用、交直流相结合的结构模式是必然的方向。本书内容是目前国内已出版的关于 FACTS 技术和直流输电技术教材或参考书的补充和拓展，对 HVDC 或 VSC-HVDC 技术在我国的发展有重要的指导意义。本书可以供电网规划、设计和运行技术人员以及 HVDC 研发人员参考，也可作为大专院校电气专业教学参考书。

本书 1~5 章由中国电力科学研究院林海雪高级工程师（教授级）翻译，6~11 章在汤广福高级工程师（教授级）和贺之渊高级工程师组织和参与下完成，全书由林海雪统稿。参加翻译工作的还有：赵岩、庞辉、王珊珊、李文津、易荣、罗湘、刘栋、李强、孔明、谢婷等同志。

本书的翻译得到了中国电力科学研究院直流输电工程技术研究所的大力支持，并得到赵贺高级工程师（教授级）、朱家骝高级工程师（教授级）的热情鼓励和推荐，在此深表谢意！

由于本书涉及面较广，内容较新，限于译者水平，不妥或错误之处在所难免，恳

请读者指正。本书翻译过程中尽量忠于原著，图形符号也按原书采用 IEC 标准的习惯。

[注：作者在本书中将柔性高压直流（VSC-HVDC）技术普遍称为“轻型高压直流（HVDC Light）”技术，后者实际上是 ABB 公司对这种技术的注册商标，并非是通用术语]

2010 年 5 月于北京

原 书 序

高压直流（HVDC）换流器的结构和特性实际上已维持了四十年商业运行而未发生变化。限于开关特性，先是汞弧阀而后是可控硅整流器，这种技术需要联接端大量额外的支撑措施来保持稳定运行。

新近，随着电力半导体性能的不断改善，为灵活交流输电系统（FACTS）技术奠定了基础。此技术包含了增强传统电网性能的各种电力电子控制器。FACTS“家族”的单个“成员”是设计用来解决某一专门问题的，例如有功或无功功率潮流的控制，短路电流的限制等。所以 FACTS 是提供输电灵活性的完整“家族”，而不是各种单个控制器。

过去十年来，新的电力半导体也已改善了 HVDC 输电的状况，使用新型器件的更高可控性和开关频率的各种换流器结构方式已经开发出来。

虽然目前 HVDC 市场总体上仍以晶闸管为主，但近来晶体管为基础的技术已获发展，并且广泛应用于世界各地。新的 HVDC 技术能提供单个 FACTS 控制器大多数的增强功能，即允许非常稳定的功率传送，传递或吸收所需的无功功率以维持互联母线处规定的电压，包含快速紧急控制以免巨大的故障电流水平，可以设计用于控制次同步谐振等。此外，直流（DC）联接是连接异步系统和不同频率系统唯一实际的办法。对于一个给定的 HVDC 结构方式，所有这些功能完全可以用控制作用实现。

因此，现代 HVDC 互联是潜在的最为灵活的电力传输系统。但 HVDC 巨大的传输灵活性要付出很高的代价，这取决于效率降低或结构复杂性增加的程度。因此，当研究一个新的接线方式时，决定特定应用所需的灵活性程度是很重要的（即考虑额定功率、输电距离、所需的辅助功能等）。

本书用于对已经采用和正在考虑的 HVDC 方案进行严格评估，因此补充了描述 FACTS 技术的新标题^①，以帮助电力工程师对未来输电系统规划、设计和运行的正确决策。本书也可以作为大学电力传输高级课程的参考书。

本书前 5 章描述目前换流器技术的原理和部件。第 6 和第 7 章讨论自换相换流各种方案，第 8、9、10 和 11 章则讨论各种换流器结构方式在 HVDC 输电中的应用。

作者十分感谢使本书有可能完成的资料主要来源处，特别是允许从国际大电网会议（CIGRE）B4 研究委员会和 ABB 工业文件中复制资料。

从个人来说，应感谢 Greta Arrillaga 的协助（他在半个世纪之前就录入了 Adamson

^① 作者曾在 1998 年著有《高压直流输电》一书（见第 1 章参考文献 9）。——译者

和 Hingorani 所著的 HVDC 为题的第一本书), 并感谢来自 Canterbury 大学的 Alan Wood 和 Nick Murray, Electranix 的 Dennis Woodford 和 ABB 的 Gunnar Asplund 的意见和建议。

作者也感谢 Canterbury 大学和内蒙古大学为其著作提供的方便。

J.Arrillaga

Y.H.Liu

N.R.Watson



目 录

译者序

原书序

第 1 章 绪论	1
1.1 常规的电力网	1
1.1.1 电力传输原理	1
1.1.2 有源系统之间的功率传输	2
1.1.3 对用户负荷的功率传输	3
1.2 趋向更灵活的电网	4
1.2.1 电力电子控制	4
1.2.2 静止电力换流器	4
1.3 高压直流输电	6
1.3.1 基于晶闸管的 CSC 输电	7
1.3.2 基于绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的 VSC 直流输电	8
1.3.3 多端 HVDC	9
1.3.4 用于 HVDC 的灵活性概念	10
1.4 AC 和 DC 输电线功率传送能力对比	10
1.5 分布式发电的影响	13
1.6 放松电力管制的影响	13
1.6.1 输电网作为活跃的电力市场成员	13
1.6.2 系统互联的比较	14
1.7 讨论	14
参考文献	15
第 2 章 半导体电力器件	17
2.1 引言	17
2.2 半导体原理	17
2.3 电力半导体元件	18
2.3.1 pn 整流管	18
2.3.2 晶体管	20
2.3.3 金属氧化物半导体场效应晶体管	20
2.4 电力开关的动态应力	21

2.4.1	电压变化率 (dv/dt)	21
2.4.2	电流变化率 (di/dt)	22
2.4.3	串联链中均压问题	22
2.5	其他开关问题	22
2.5.1	开关频率	22
2.5.2	开关损耗	22
2.5.3	软开关	23
2.5.4	阻尼器的使用	23
2.6	晶闸管型电力开关	24
2.6.1	晶闸管	24
2.6.2	门极关断晶闸管 (GTO)	27
2.6.3	集成门极换相晶闸管 (IGCT)	29
2.6.4	MOS 关断晶闸管 (MTO)	31
2.6.5	MOS 栅控晶闸管 (MCT)	32
2.6.6	发射极关断晶闸管 (ETO)	33
2.7	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	34
2.7.1	IGBT (串联) 链	36
2.7.2	静态和动态均压	36
2.8	二极管	37
2.9	预测评估	39
2.9.1	参数定额和应用	39
2.9.2	相对损耗	41
	参考文献	41
第 3 章	电网换相 HVDC 换流	43
3.1	引言	43
3.2	三相 AC-DC 换流	43
3.2.1	CSC 基本工作原理	44
3.2.2	延迟触发的影响	45
3.3	换相过程	47
3.3.1	换相电路的分析	47
3.4	整流运行	49
3.5	逆变运行	51
3.6	功率因数和无功功率	53
3.7	特征谐波	55
3.7.1	直流侧谐波	55
3.7.2	交流侧谐波	56

3.8	多脉波换流	58
3.8.1	变压器移相	58
3.8.2	直流纹波重注入	60
3.9	非特征谐波和间谐波	64
3.9.1	非理想交流电源	65
3.9.2	直流电流调制	68
3.9.3	控制系统的不完善	69
3.9.4	不对称开通	69
3.9.5	低次谐波的放大	69
3.10	用滤波器降低谐波	70
3.10.1	交流侧滤波器	70
3.10.2	直流侧滤波器	72
3.11	跨越 LCC 频率交叉调制	72
3.12	总结	73
	参考文献	74
第 4 章	自换相换流	76
4.1	引言	76
4.2	电压源换流	76
4.2.1	VSC 运行原理	76
4.2.2	换流器的组件	80
4.2.3	三相 VSC	82
4.3	LCC 和 VSC 的比较	89
4.4	电流源换流	90
4.4.1	CSC 波形的分析	91
4.5	自换相的重注概念	92
4.5.1	VSC 中的应用	92
4.5.2	CSC 中的应用	96
4.6	讨论	98
	参考文献	99
第 5 章	脉冲宽度调制	100
5.1	引言	100
5.2	PWM 工作原理	100
5.3	特定谐波消除	101
5.4	(基于载波的) 正弦 PWM	103
5.5	基于载波的 PWM 实施	105

5.5.1	自然采样的 PWM	105
5.5.2	规则采样	107
5.6	多桥换流器的调制	108
5.7	总结	110
	参考文献	110
第 6 章	多电平换流	112
6.1	引言	112
6.2	二极管箝位	113
6.2.1	三电平中性点箝位 VSC	113
6.2.2	五电平二极管箝位 VSC	116
6.2.3	二极管箝位结构的一般特点	119
6.3	飞跨电容器拓扑	124
6.3.1	三电平飞跨电容器	124
6.3.2	多电平飞跨电容器	124
6.4	级联 H 桥拓扑	127
6.5	混合 PWM 多电平换流	129
6.6	多电平换流器的相关优点	131
6.6.1	用于 HVDC 中不同拓扑结构的成本比较	132
	参考文献	133
第 7 章	多电平直流重注	134
7.1	引言	134
7.2	多电平重注换流器中的软开关	134
7.3	箝位控制 MLVR	135
7.3.1	开通配合	138
7.3.2	电压波形分析	138
7.3.3	输出电流分析	141
7.3.4	电容器均压	143
7.3.5	动态性能	148
7.4	变压器耦合 MLVR	151
7.5	级联 H 桥 MLVR	155
7.5.1	基本结构和波形	155
7.5.2	重注桥的开关方式	157
7.5.3	级联 H-桥链的设计	160
7.5.4	电容器的均压	161

7.5.5	STATCOM 的应用	164
7.6	MLVR 方案主要性能总结	169
7.7	多电平电流重注 (MLCR)	169
7.7.1	结构和运行原理	169
7.7.2	自换相晶闸管换流	171
7.7.3	EMTDC 验证	174
7.8	MLCR-CSC 和 MLVR-VSC 的比较	179
	参考文献	179
第 8 章	电网换相的 CSC 输电	181
8.1	引言	181
8.2	电网换相直流输电换流器	181
8.3	HVDC 换流站的扰动	187
8.4	HVDC 联接的结构	188
8.5	直流系统结构	192
8.6	直流系统的控制和运行	194
8.6.1	基本原理	194
8.6.2	分级控制	196
8.6.3	整体控制的配合	196
8.6.4	极控	198
8.6.5	换流器单元控制	204
8.7	交-直流系统的相互作用	206
8.7.1	电压相互作用	207
8.7.2	动态电压调整	207
8.7.3	交流系统的动态稳定	208
8.7.4	直流互联系统的阻尼控制	209
8.7.5	阻尼次同步谐振	209
8.7.6	有功功率和无功功率的协调	210
8.7.7	交流系统的暂态稳定	210
8.8	交-直-交系统的频率相互作用	210
8.8.1	直联接中的谐波交叉调制	210
8.8.2	互补和混合谐振	213
8.9	直联接对外部扰动的响应	214
8.9.1	对交流系统故障的响应	214
8.9.2	对直流线路故障的响应	217
8.10	LCC 输电的可靠性	218
8.11	小结	219

参考文献	220
第 9 章 基于电网换相 HVDC 输电技术的发展	222
9.1 概述	222
9.2 电容换相换流	222
9.2.1 CCC 运行原理	224
9.2.2 性能仿真	224
9.3 连续调谐的交流滤波器	226
9.4 直流侧有源滤波器	226
9.5 STATCOM 辅助直流输电	227
9.6 用于高压直流输电的交流线路改造	231
9.6.1 三极直流输电	232
9.7 600kV 以上高压直流输电	233
9.8 结论	234
参考文献	234
第 10 章 基于电压源换流的直流输电	236
10.1 引言	236
10.2 电力传输特性	236
10.2.1 电流关系	238
10.3 VSC 联接的结构	240
10.3.1 VSC-HVDC 电缆技术	241
10.4 VSC 直流系统控制	242
10.4.1 一般原理	242
10.4.2 分层控制	244
10.4.3 直流联接控制协调	245
10.4.4 VSC 输电的控制容量	246
10.4.5 VSC 控制对电网恢复的作用	247
10.5 轻型高压直流输电技术	248
10.5.1 两电平 PWM 工程	249
10.5.2 三电平 PWM 工程	252
10.5.3 轻型 HVDC 的性能	255
10.6 其他 VSC 输电项目	260
10.7 多端直流配电系统的发展潜力	262
10.8 讨论	264
参考文献	265

第 11 章 多电平 VSC 和 CSC 输电	267
11.1 引言	267
11.2 多电平 VSC 输电	268
11.2.1 潮流的考虑	268
11.2.2 直流联接的控制特性	270
11.2.3 测试系统和仿真结果	272
11.2.4 无功功率独立控制	277
11.3 多电平 CSC 输电	280
11.3.1 动态模型	280
11.3.2 控制系统结构	281
11.3.3 正常运行工况下的仿真性能	282
11.3.4 扰动之后的仿真性能	285
11.3.5 多电平电流源换流器输电的无功控制	285
11.4 总结	292
参考文献	293
术语表	294

第 1 章

绪 论

1.1 常规的电力网

常规电力系统中，所有发电机的工作频率必须相同并保持严格同步。每台发电机由励磁电流控制其机端电压的幅值；通过发电机转子的机械转矩，控制机端电压的相角。相对于系统电压，发电机机端电压通常设计得较低。因此发出的电能要经过多次电压变换：由低压变为高压（为了有效地电力输送），又从高压变为中压和低压（为了经济和安全的配电）。整个电力系统中的升压、降压均由电力变压器实现。

在一个完整的电网中，主干输电网是完全互联的，所有的电站均接入到这个主干网中。目前大部分电网都是按照这一组织模式建设运行的，但是它已经越来越无法满足构建高效电力系统的要求。

主干网的扩建一般受制于开关装置的短路电流开断能力。一旦主干网的短路电流水平超过开关装置的短路电流开断能力，则需要建设更高电压等级的输电系统以满足电力传输的需要。而先前的输电系统则分成几个分离的（次级）系统。每个次级输电系统本身又向许多配电馈线（一般为辐射式的）供电。因此，传统电网可以分成三个独立的部分，即发电、输电和配电，这三部分需要在同步状态下运行，缺乏灵活性。

1.1.1 电力传输原理

变压器、发电机和输电线主要是电感性的，而大多数负荷也有电感部分。当加在电感上的电压发生变化时，电感中的电流也将发生变化，但是电流的变化滞后于电压的变化。这使得电压和电流波形之间产生了的相角位移，同时也影响了电力传输的效率。

电力系统某一元件的瞬时功率（ p ）由其端子上的电压（ v ）和电流（ i ）瞬时值的乘积计算而得（ $p=vi$ ）。在一个周期内瞬时功率的积分除以周期时间即得到平均值或有功功率，即

$$(1/T) \int_t^{t+T} p dt$$

如果电压和电流均以相同频率的正弦变化，根据均方根（rms，或有效值）电压

(V) 和电流 (I) 量, 有功功率可表示为

$$P=VI\cos\phi \quad (1.1)$$

式中, ϕ 为基波频率波形的电压和电流之间相角。

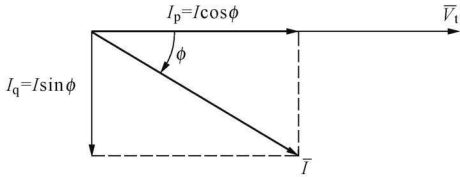


图 1.1 同相和正交的电流分量

由于 rms 值总是正的, 乘积 VI (称为伏安或视在功率) 不能反映有功功率的方向, 因此决定电路元件是否发出或者吸收功率是 $\cos\phi$ (功率因数) 的符号。

图 1.1 中, 采用电压作为相角的参考, 把电流分解为同相 (I_p) 分量和正交 (I_q) 分量, 则 V 和 I_p 的乘积显然就是有功功率, 而 V 和正交分量 I_q 的乘积, 即

$$Q=VI\sin\phi \quad (1.2)$$

称为无功功率。

无功功率是建立磁场和静场所需的; 无功功率暂时被存储, 然后被释放 (即, 在一个周期内由正区间和负区间组成)。实际上, 无功功率所代表的这部分能量在元件和电路其余部分之间相互交换 (平均每周期交换一次)。虽然无功功率在一个周期内的平均值为零, 但由于它在交流系统中的电感和电容之间不断交换, 因此依然代表实际存在的交换能量。

当公式 (1.2) 中相角差 ϕ 在 $0\sim\pi$ 之间时, $\sin\phi$ 为正数, 这时可以说该电路元件是消耗无功功率 Q 的; 同样, 当 ϕ 在 $\pi\sim 2\pi$ 之间, $\sin\phi$ 为负数, 此时该元件为发出无功功率 Q 。

电压电流相角差、无功功率 Q 通常采用如下约定: 当 Q 为正, 电流相角滞后于电压相角; 当 Q 为负, 电流相角领先于电压相角。

将式 (1.1) 和式 (1.2) 中 P 和 Q 的表达式平方后相加得

$$(VI\cos\phi)^2 + (VI\sin\phi)^2 = (VI)^2 \quad (1.3)$$

其中

$$VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$

式 (1.3) 和式 (1.4) 可以表示为四象限复数图形, 如图 1.2 所示, 横纵坐标轴标分别为 $\pm P$ 和 $\pm jQ$ 。

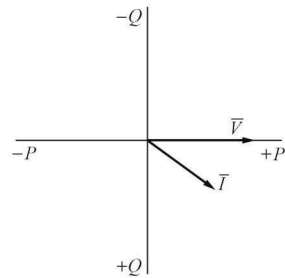


图 1.2 以电压为参考的四象限图形

1.1.2 有源系统之间的功率传输

图 1.3 表示纯电感线路连接两个理想电压源 V_1 和 V_2 (V_1 和 V_2 可以是发电机, 也可以是交流系统的节点)。图 1.4 中, δ 角 (称为功率角) 表示节点 1 电压领先节点 2 电压的角度, ϕ 角 (称为功率因数角) 为节点 2 电流滞后其电压的角度。以端点 2 电压作为相位参考, 由该图可以得到下列表达式:

$$I_2 X \cos\phi = V_1 \sin\delta \quad (1.5)$$



$$I_2 X \sin \phi = V_1 \cos \delta - V_2 \quad (1.6)$$

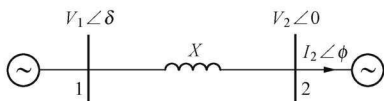


图 1.3 两个同步系统之间的互联

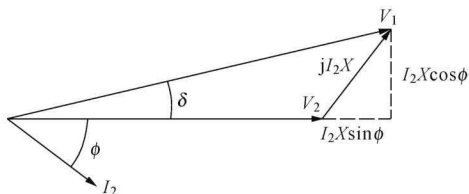


图 1.4 图 1.3 互联的相量图

根据式 (1.5) 和式 (1.6) 可知, 线路上传送的有功功率和无功率分别为

$$P = V_2 I_2 \cos \phi = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (1.7)$$

$$Q = V_2 I_2 \sin \phi = \frac{V_2 (V_1 \cos \delta - V_2)}{X} \quad (1.8) \textcircled{1}$$

因此, 要控制 P 和 (或) Q 的传送, 必须改变式 (1.7) 和式 (1.8) 中 V_1 、 V_2 、 δ 和 X 四个变量中一个或一个以上的值。如前所述, 电压相位和幅值可以分别由原动机的调速器和发电机励磁器控制。但是, 从功率传输角度看, 发电机调速控制的调节速度慢而且效率低: 调速控制将会影响交流系统的稳态运行点, 因为在大扰动之后为了保持输电稳定性, 在式 (1.7) 中功率角 δ 必须保持较小范围内; 此外, 由调速控制额外产生的无功功率需求 [式 (1.8)] 可能会使发电和输电系统发生过载。

1.1.3 对用户负荷的功率传输

用户负荷连接到辐射式馈线上, 一般处在电力配电网的末端。低功率因数负荷对负荷电压以及线路的功率传输能力都有不利的影 响。如图 1.5 所示, 图中假定馈线和其后面的主系统用一个电压源 (V_s) 和系统总电抗 (X_s) 串联表示。当功率因数降低时 (即 ϕ 角增大), 为了维持有功功率, 就需要增加负荷电流, 即 $I'_L > I_L$; 电流的增大在系统电抗中引起更大的压降, 反过来降低了负荷电压 (V_L)。

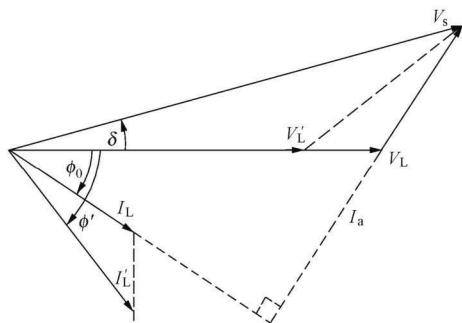


图 1.5 负荷功率因数对负荷端电压的影响

因此, 为了维持所需的功率水平, 电源电压必须提高, 或者就地提供某些电压支持的措施。例如可以在负荷节电处并联电容, 这就在负荷电流上加一个正交分量, 从而减小馈线中总电流, 这称为功率因数补偿。采用无源元件进行就地补偿虽然有效, 但这种方法既不快速也不连续, 而且增加了与系统阻抗发生低次谐波谐振的可能性。

① 原文分子第一项中 $\cos \delta$ 误为 $\sin \delta$ 。——译者