

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

交直流电力系统 动态行为分析

徐政 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

交直流电力系统动态行为分析

徐 政 著



机 械 工 业 出 版 社

本书在交直流混合电力系统的框架下阐述了交直流电力系统之间的相互作用特性及其动态行为的分析理论和仿真方法。主要包括直流输电系统及其控制器的数学模型,交流输电系统与直流输电系统的输送能力分析,直流输电系统的动态过电压、频率变换关系及谐波稳定性,交直流电力系统的潮流计算、机电暂态仿真、电磁暂态仿真和次同步振荡分析。本书的一大特点是十分注重已有理论的适用范围分析及其工程应用的可操作性,适合于从事交直流电力系统科研、规划、设计和运行的工程师以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

交直流电力系统动态行为分析/徐政著. —北京:机械工业出版社,2004.5
ISBN 7-111-14294-2

I. 交... II. 徐... III. 电力系统—系统分析 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 028130 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:赵玲丽 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 封面设计:解 辰 责任印制:李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm $\frac{1}{16}$ · 13.5 印张 · 329 千字

0 001—3 000 册

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

序 言

高压直流输电在晶闸管问世以后得到迅速发展,其理论和技术一直处于电力工程学科的前沿。直流输电在技术、经济上的优势和我国国情决定了我国发展直流输电的绝对必要性和广阔前景。浙江大学直流输电研究室从事直流输电方面的研究始于20世纪70年代初,先后参与了上海31kV直流输电试验工程,舟山100kV海底电缆直流输电工程和葛洲坝—南桥 ± 500 kV直流输电工程。结合舟山直流输电工程,浙江大学直流输电研究室建成了我国第一套交直流电力系统物理模拟装置,并成为当时直流输电的实验基地和直流输电的人才培养基地。为舟山直流输电工程研制的、适用于弱交流系统的直流输电数字控制系统填补了国内空白,其中低压限流等9项新技术达到国际水平。

1982年浙江大学直流输电研究室撰写了直流输电领域的国内第一本专著《直流输电》,在国内具有广泛影响。20多年来,直流输电无论在理论上还是在工程实践上都有长足的进步,特别是我国已跨入交直流大电网时代,交直流电力系统之间的相互作用及其动态行为分析已成为电力系统规划、设计和运行的一个重要任务,迫切需要这方面能有更新的著作出版。

近年来,本研究室承担了多个国家级基金研究项目,并参与了多项全国性和大区性电网发展规划的论证研究工作,徐政博士是这些项目的负责人和主要研究者,在交直流电力系统的理论研究和工程实践两方面都有较深的积累,《交直流电力系统动态行为分析》一书是上述项目研究成果和实践经验的总结,同时也反映了这一领域的最新进展。相信本书对促进我国交直流大电网的健康发展,提高我国交直流电力系统分析计算领域的水平,培养我国电力系统方面的人才一定会起到十分积极的作用。

戴熙杰

2004年2月

前 言

自 1882 年开创用直流输电输送电能的历史以来,经过 20 世纪 50~60 年代的汞弧阀时期,直流输电在远距离大容量输电、海底电缆输电和不同频率联网方面显示了其独特的优点;又经过 20 世纪 70~80 年代的晶闸管阀时期,使直流输电得到了大发展,并在大电网互联方面展现了更多优势,传统的纯交流电网已发展成为交直流混合电网;20 世纪 90 年代以来,大功率可关断器件的迅猛发展,促成了新型直流输电的快速发展,使直流输电的应用扩展到了配电网和新能源开发等更为广阔的领域。直流输电技术是基础面广、前沿技术含量高、综合性很强的高新技术,它不仅在 20 世纪 70~80 年代促进了电力电子技术的发展,而且随着电力电子器件的进一步发展、计算机技术的更新换代、输变电新材料的出现、新能源和可再生能源的开发利用,必将在新世纪为电力持续发展发挥更大的作用。

由于我国地域辽阔,能源分布及负荷发展很不平衡,水力资源主要集中在西南数省,煤炭资源主要集中在山西、陕西和内蒙西部,而负荷主要集中在东部沿海地区,因此远距离大容量输电势在必行。另一方面,电网互联是电力工业发展的必然趋势,我国各大区和独立省网的互联已进入实施阶段,利用直流输电作异步联网在技术上、经济上 and 安全性等方面的优势已在世界范围内得到证明。因此直流输电技术必将以其技术上和经济上的独特优势,在远距离大容量输电和全国联网两个方面对我国电力工业的发展起到十分重要的作用。我国已成为世界范围内直流输电应用前景最为广阔的国家。

近 20 年来,我国直流输电从无到有,经历了一个快速发展阶段。1987 年自行研制建设的舟山直流输电试验工程投入运行,1989 年葛洲坝—南桥 $\pm 500\text{kV}$ 、1200MW 直流输电工程投入运行,2000 年天生桥—广州 $\pm 500\text{kV}$ 、1800MW 直流输电工程投入运行,2003 年三峡—常州 $\pm 500\text{kV}$ 、3000MW 直流输电工程投入运行,2004 年三峡—广东 $\pm 500\text{kV}$ 、3000MW 直流输电工程投入运行,2004 年贵州—广东 $\pm 500\text{kV}$ 、3000MW 直流输电工程也将投入运行。另外,三峡右—上海直流输电工程和贵州—广东二回直流输电工程已进入实施阶段。根据规划,在未来 20 年中,南方电网将会出现 7 条或更多直流输电线路,华东电网也将会出现 7 条或更多直流输电线路,华中电网将会出现近 10 条直流输电线路。显然,我国已跨入交直流混合大电网时代,这在技术上和管理上都对我国的电力工作者提出了挑战。

浙江大学直流输电研究室是国内最早开展直流输电研究的单位之一,曾为培养我国直流输电方面的人才、推动我国直流输电事业的发展,特别是我国第一个直流输电工程——舟山直流输电工程的投运作出过重大贡献,并获得了机电部科技进步特等奖、国家科技进步三等奖和国家自然科学三等奖等多项奖励。近年来,本研究室在继承前辈工作的基础上,在直流输电控制和交直流电力系统分析计算等领域进行了开拓性的研究工作,已在核心期刊和重要国际会议上发表论文百余篇,被 SCI 和 EI 收录论文近 50 篇。先后承担了关于多直流落点与交流系统相互作用研究的 2 个国家自然科学基金项目(编号为 59707005,50277034)和关于直流输电对交流系统紧急功率支援研究的 1 个国家重点基础研究发展规划项目子课题(即国家 973 项目,编号为 G1998020310)。同时本研究室十分注重理论联系实际,积极投身于我国电力工业主战

场,立足从具体工程问题中抽象出科学问题来进行研究,进而反过来指导具体工程。近3年来参加了国家西电东送和全国联网重大技术问题论证研究8项(见 www.hvdc.cn):其中4项是关于中国南方电网交直流输电系统的关键技术问题研究,2项是关于2015年和2030年我国西电东送和全国联网重大决策研究,2项是关于三峡直流输电对华东电网安全稳定影响的研究。上述研究工作取得了多项创造性的研究成果。其中针对交直流混合电力系统的小扰动稳定性问题,提出了基于测试信号的电力系统小扰动稳定性分析计算方法。本方法的特点是统一处理电力系统的低频振荡问题和次同步振荡问题,并可用来设计电力系统稳定器(PSS)和直流输电的调制控制器以及柔性交流输电系统(FACTS)装置的控制器等。本方法的优点是采用时域仿真的方法来实现,克服了高压直流(HVDC)换流器和 FACTS 装置难以建立适用于一定频率范围(如从直流到2倍工频范围内)的数学模型的难题,彻底解决了含 HVDC 和 FACTS 装置的电力系统中的次同步振荡计算问题,同时这种方法又是区别于传统基于特征值计算的电力系统小扰动稳定性分析的另一种方法。本书正是这方面研究成果的总结。

世界范围内已出版的直流输电著作并不多,在国内具有重要影响的直流输电著作大概是三部,分别为1971年由 Kimbark E W 撰写的《Direct Current Transmission》,1975年由 Uhlmann E 撰写的《Power Transmission by Direct Current》和1982年由浙江大学直流输电研究室撰写的《直流输电》。这三本书总结了直流输电技术早期发展直至基本成熟阶段的主要成果,重点阐述直流输电系统本身的特点,如换流理论、直流输电系统的基本结构、组成直流输电系统的基本元件和直流输电系统的基本控制方式等。由于当时交直流电力系统相互作用特性还没有被重视或者说问题还不严重,因此这三本书对交直流电力系统相互作用特性方面的阐述较少。本书是浙江大学直流输电研究室1982年所撰著作《直流输电》的姐妹篇,将主要阐述交直流电力系统相互作用及其动态行为的分析理论和仿真方法,其主要特点是十分注重已有理论的适用范围分析及其工程应用的可操作性;期望它能像第一本书那样,为提高我国直流输电领域的科研、规划、设计、制造和运行水平作出贡献。

在本书完成之际,特别感谢我的妻子封洲燕对我工作一贯的支持、鼓励和帮助;同时感谢我的导师戴熙杰教授多年来的教诲,并为本书作序。本书得以完成,我以往和现在的研究生做了很多工作,书中部分内容直接取材于他们的学位论文,在此特别感谢周长春、邵伟、刘海峰、黄莹、刘国平、杨汾艳、张帆、张桂斌、刘洪涛和程华等同学。本书的出版得到了机械工业出版社出版基金的资助,在此表示感谢。

限于作者的理论水平和实践经验,本书难免存在缺点和错误,恳请读者不吝赐教。作者联系方式:电话:0571-87952074,电子信箱:xufeng@hzcnc.com。

徐 政
2004年3月

目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国电网发展规划中的几个重要理论问题	1
1.1.1 同步电网的最佳规模问题	2
1.1.2 交流和直流在全国联网和西电东送中的作用与定位	3
1.1.3 多直流落点可能造成的问题	5
1.1.4 对电网的划分问题	6
1.2 电力系统仿真工具概述	7
1.3 直流输电技术的新发展	8
1.3.1 传统直流输电的新发展	9
1.3.2 基于电压源换流器的新型高压直流(VSC-HVDC)输电系统	12
参考文献	13
第 2 章 交流输电系统的输送能力分析	15
2.1 引言	15
2.2 交流输电系统的数学模型	15
2.3 限制交流输电系统输送能力的基本因素	17
2.3.1 交流输电系统的功角稳定性问题	18
2.3.2 交流输电系统的电压和无功控制问题	18
2.4 根据功角稳定性条件决定交流线路输送能力	19
2.4.1 并联电抗补偿对输送能力的影响	20
2.4.2 串联电容补偿对输送能力的影响	21
2.5 交流输电线路的输送能力与所消耗无功及线路两端相角差的关系	22
2.5.1 线路两端取不同电压值时输送能力与所消耗无功及线路两端相角差的关系	27
2.5.2 电力系统电压崩溃及其相关现象的机理分析	29
2.6 应用实例	29
参考文献	30
第 3 章 直流输电系统中换流器的稳态数学模型	31
3.1 变量定义及假设条件	31
3.2 换流器的稳态数学模型和等效电路	33
3.3 换流器稳态数学模型的一种近似描述	34

3.4 换流器稳态模型计算示例	34
参考文献	35
第4章 直流输电控制系统的数学模型及其响应特性	36
4.1 直流输电系统的基本控制手段与可控性分析	36
4.2 直流输电控制系统的分层结构	37
4.3 直流输电主控制级控制功能	38
4.3.1 功率调制和快速功率变化控制模块	38
4.3.2 直流电流指令计算模块	38
4.4 直流输电极控制级控制功能	39
4.4.1 直流电流调制	39
4.4.2 低压限流环节(VDCOL)	40
4.4.3 电流偏差控制	42
4.4.4 定电流控制器	42
4.4.5 定关断角控制器	43
4.4.6 定电压控制器	44
4.5 直流输电的阀组控制功能	44
4.6 CIGRE 直流输电标准测试系统控制器的结构、参数和静态特性分析	44
4.6.1 CIGRE 直流输电标准测试系统控制器的结构与参数	44
4.6.2 CIGRE 直流输电标准测试系统控制器的稳态响应特性分析	48
参考文献	50
第5章 交直流电力系统潮流计算方法	52
5.1 交直流电力系统潮流计算中的换流器标么值方程	52
5.2 交直流电力系统潮流计算的数学模型	53
5.3 交直流电力系统潮流计算的 Newton-Raphson 法	54
5.3.1 整流侧定电流控制和逆变侧定电压控制	55
5.3.2 整流侧定电流控制和逆变侧定关断角控制	56
5.4 交直流系统潮流计算的快速解耦算法	57
5.4.1 整流侧定电流控制和逆变侧定电压控制	57
5.4.2 整流侧定电流控制和逆变侧定关断角控制	58
5.5 交直流电力系统潮流计算示例	58
参考文献	60
第6章 直流输电系统的输送能力分析	61
6.1 引言	61
6.2 交直流系统相互作用的数学模型	61
6.3 短路比的定义	62
6.4 模型系统的运行特性分析	62
6.5 输送功率极限与短路比的关系	64

参考文献	66
第 7 章 换流站交流母线的静态电压稳定性分析	67
7.1 模型系统及电压稳定判据	67
7.2 VSI 的计算方法	67
7.3 各种控制方式下的 VSI 计算示例	69
7.3.1 整流侧定电流逆变侧定关断角控制	69
7.3.2 整流侧定电流逆变侧定电压控制	70
7.3.3 VSI 与 SCR 的关系	70
参考文献	71
第 8 章 直流输电换流站的短时过电压分析	72
8.1 引言	72
8.2 影响短时过电压大小的两个主要因素	72
8.3 引起短时过电压的故障和操作	74
8.3.1 保护动作闭锁换流器	74
8.3.2 直流线路故障	74
8.3.3 交流系统故障	74
8.3.4 常规操作	74
8.4 与换流站相连的发电机的自励磁问题	75
8.5 短时过电压的限制措施	75
参考文献	75
第 9 章 交直流电力系统中谐波的产生和变换特性分析	76
9.1 交流电动势畸变时直流侧的谐波特性简化分析	76
9.2 交流电动势畸变时直流侧谐波特性的数字仿真分析	78
9.3 换流器频率变换特性的解析方法——开关函数法	79
9.4 从交流侧到直流侧的频率变换关系	81
9.5 从交流侧到直流侧的频率变换函数的性态分析	82
9.6 从直流侧到交流侧的频率变换关系	82
9.7 交流系统基频不同时直流系统的谐波特性分析	83
9.8 交流系统基频不同时直流系统的谐波特性数字仿真分析	84
9.9 直流输电系统的谐波稳定性问题与分析方法	85
参考文献	87
第 10 章 交直流电力系统电磁暂态与机电暂态数字仿真中的初始化问题	88
10.1 引言	88
10.2 发电机及其控制器的初始化问题	88
10.3 直流输电系统的初始化问题	89
10.4 输电线路的初始化问题	90

10.5 负荷的初始化问题	90
参考文献	90
第 11 章 交直流电力系统电磁暂态数字仿真	91
11.1 交直流电力系统电磁暂态数字仿真的实现途径	91
11.2 用于模型离散化的常用数值积分公式及其特点	92
11.3 集中参数元件的离散化伴随模型	93
11.4 集中参数多相输电线路的离散化伴随模型	95
11.5 分布参数单根无损线的 Bergeron 模型	95
11.6 分布参数单根小损耗线路的 Dommel 模型	97
11.7 分布参数多相耦合输电线路的 K.C.Lee 模型	98
11.8 分布参数多相耦合输电线路的扩展 Bergeron 模型	101
11.9 输电线路电磁暂态计算示例	103
11.10 交直流电力系统电磁暂态仿真的拓扑分块并行算法	105
11.10.1 分块交接变量方程的形成	107
11.10.2 系统交接变量方程的形成和求解	108
11.11 CIGRE 直流输电标准测试系统的暂态响应特性计算示例	110
11.11.1 整流侧交流系统故障时的暂态响应特性	110
11.11.2 逆变侧交流系统故障时的暂态响应特性	111
参考文献	113
第 12 章 交直流电力系统机电暂态数字仿真	114
12.1 交直流电力系统机电暂态仿真的基本原理	114
12.2 直流输电系统的响应特性模型	114
12.2.1 直流输电系统响应特性模型示例	116
12.2.2 关于响应特性模型合理性的几点说明	117
12.3 直流输电系统的详细模型	117
12.3.1 导致逆变器换相失败的因素分析	118
12.3.2 直流输电系统动态响应特性的详细模拟示例	122
12.4 交直流电力系统机电暂态仿真程序的局限性	123
12.5 机电暂态仿真中与发电机模拟相关的问题	123
12.5.1 发电机转子运动方程中 D 系数的意义和取值原则	123
12.5.2 关于原动机和调速器的模拟问题	124
12.5.3 关于励磁系统的数学模型和参数整定问题	124
参考文献	127
第 13 章 电力系统机电暂态和电磁暂态混合仿真	128
13.1 问题的提出	128
13.2 混合仿真的原理	128
参考文献	129

第 14 章 电力系统的小信号模型	130
14.1 问题的提出	130
14.2 发电机的小信号模型	131
14.3 电力网络的小信号模型	131
14.4 直流输电系统的小信号模型	131
14.5 负荷的小信号模型	133
第 15 章 交直流电力系统的低频振荡分析	134
15.1 引言	134
15.2 低频振荡的主要分析方法	134
15.3 用特征值分析法分析中国南方电网低频振荡特性示例	135
15.3.1 无 PSS 和直流调制时南方电网的低频振荡特性	135
15.3.2 加 PSS 后南方电网的低频振荡特性	137
15.4 测试信号法的基本原理	139
15.4.1 模态辨识基本概念	139
15.4.2 机械导纳的定义	140
15.4.3 机械导纳特性	140
15.4.4 通过时域仿真计算机导纳	141
15.4.5 单机无穷大母线(OMIB)系统计算示例	142
15.4.6 多机系统计算示例	143
15.5 基于测试信号法的多机系统 PSS 设计	144
15.6 基于测试信号法的直流小信号调制器参数整定	147
15.6.1 基本原理	147
15.6.2 计算示例分析	149
15.6.3 加直流小信号调制后南方电网的低频振荡特性	152
15.7 Prony 分析法	153
15.7.1 Prony 分析法的基本原理	153
15.7.2 计算示例	155
参考文献	155
第 16 章 交直流电力系统的次同步振荡问题分析	157
16.1 电力系统中的次同步振荡问题概述	157
16.2 由直流输电引起的次同步振荡问题的机理分析	157
16.2.1 何种情况下应该考虑由直流输电引起的次同步振荡	158
16.2.2 何种情况下可以不考虑由直流输电引起的次同步振荡	158
16.3 评估直流输电是否会引起 SSO 的一种初步方法——机组作用系数法	158
16.4 电力系统机组间扭振相互作用特性	160
16.4.1 电气耦合对机组轴系扭振特性的影响	160
16.4.2 机组扭振自然频率与机组扭振相互作用的关系	162

16.4.3 适用于 SSO 研究的系统简化基本原则	162
16.5 复转矩系数法的适用范围分析	164
16.5.1 复转矩系数法	164
16.5.2 复转矩系数法的基本前提	164
16.5.3 复转矩系数法不适用于多机系统的原因	165
16.5.4 复转矩系数法的应用及判断次同步振荡稳定性的准则	165
16.6 复转矩系数法的时域仿真实现——测试信号法	166
16.6.1 应用测试信号法研究 IEEE SSR 第一标准测试系统示例	167
16.6.2 应用测试信号法研究次同步频率范围电气阻尼系数的灵敏度	172
16.6.3 测试信号法计算结果与特征值分析结果的比较	174
16.7 关于几种 SSO 分析方法的评述	175
16.8 HVDC 对发电机次同步振荡阻尼特性的影响	176
16.8.1 与整流站相连的发电机组的 SSO 阻尼特性	176
16.8.2 与逆变站相连的发电机组的 SSO 阻尼特性	179
16.9 多直流落点系统中的发电机 SSO 阻尼特性分析	180
16.9.1 综合机组作用系数的概念	180
16.9.2 综合机组作用系数有效性的测试信号法验证	181
16.9.3 综合机组作用系数对多直流落点系统的应用	184
16.10 串联补偿与直流输电共存时发电机的次同步振荡阻尼特性分析	184
16.10.1 待研究的交直流系统模型	184
16.10.2 与整流站相连的发电机组阻尼特性	184
16.10.3 与逆变站相连的发电机组的阻尼特性	186
16.11 由直流输电引起的次同步振荡的抑制措施	187
16.12 新型直流输电对发电机组次同步振荡阻尼特性的影响	189
16.13 TCSC 对发电机组次同步振荡阻尼特性的影响	189
16.13.1 待研系统模型	189
16.13.2 仿真结果及其分析	192
16.14 SVC 对发电机组次同步振荡阻尼特性的影响	196
16.14.1 测试系统及 SVC 的时域仿真模型	196
16.14.2 仿真结果及其分析	196
参考文献	200

附录 CIGRE 直流输电第一标准测试系统的结构与参数	202
-----------------------------------	-----

第1章 绪 论

1.1 我国电网发展规划中的几个重要理论问题

我国电网正处于高速发展时期，目前已进入从大区性电网向全国性互联电网过渡的阶段。由于我国能源资源分布的不平衡，水力资源的 2/3 集中在西南地区，煤炭资源的 60% 集中在“三西”（山西、陕西、内蒙西部）地区，而负荷中心主要集中在东部沿海地区，其电力消耗超过全国的 1/2 以上。因此西电东送是我国电网发展的一个重要组成部分。按照能源流向的基本格局，今后我国电网将主要分为三大块^[1]，即北部电网、中部电网和南部电网，分别对应西电东送的三大通道，即北通道、中通道和南通道，如图 1-1 所示，其中输电和联网的方式是目前规划的方式，将根据今后电网发展的实际情况做必要的调整。到 2030 年，西电东送的规划规模如图 1-2 所示^[1]。

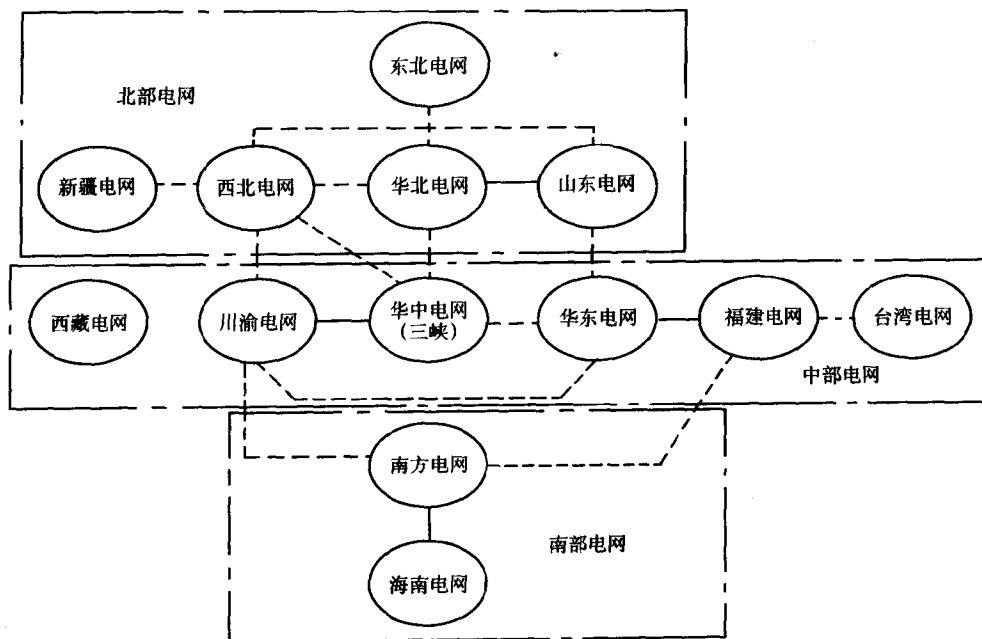


图 1-1 规划的我国电网基本格局

—— 交流 --- 直流

我国电力工程界积几十年规划、设计、运行和科研的实践经验，总结出来的《电力系统安全稳定导则》和《电力系统技术导则》十分注重电网的结构问题，特别强调电网结构是电力系统安全稳定运行的基础。

围绕我国电网的发展规划，针对互联电网的结构问题，存在如下几个重要的理论问题迫切需要研究：

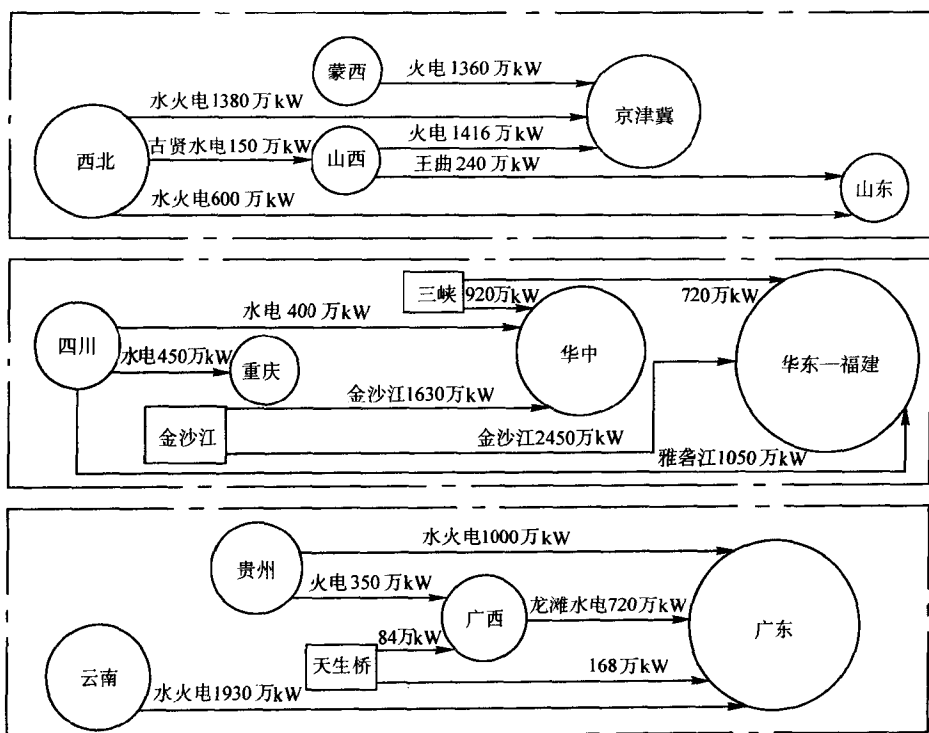


图 1-2 2030 年全国电网西电东送三大通道内电力流示意图

- (1) 同步电网的最佳规模问题；
- (2) 交流和直流在全国联网和西电东送中的作用与定位；
- (3) 多回大功率直流输电落点在小范围受端区域内可能存在的问题；
- (4) 对电网的划分问题。

1.1.1 同步电网的最佳规模问题

按照原西门子公司电力系统规划部主任 Povh 先生的观点^[2]，交流同步联网的效益随着同步电网的扩大而逐渐消失，当交流同步电网达到一定规模以后，再采用交流联网方式与别的电网互联将不再会有效益，如图 1-3 所示。主要原因如下：

(1) 在管理上，运行一个同步电网必须要有一个相适应的组织机构，当同步电网扩大时，必须对原有的运行部门做调整；

(2) 在技术上，大的交流同步电网容易出现诸如潮流问题和区域间振荡问题等技术难题，需要采用诸如柔性交流输电技术 (FACTS) 等额外的措施才能解决；

(3) 在经济上，维持一个大电网的同步运行需要较大的投资，同时，当系统发生故障时，远方电厂的支持实际上是非常有限的。

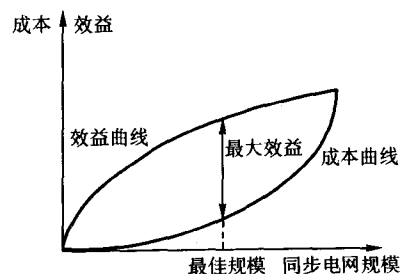


图 1-3 同步电网的效益与成本曲线

世界上已有的同步电网规模有超过 3 亿 kW 的，如美国中东部地区的同步电网、欧洲同步电网 (UCPTE) 等。显然，确定同步电网的最佳规模与很多因素相关，其中一个重要因素

是同步电网中功率平衡的方式，也就是潮流流动的模式。欧洲同步电网的一个重要特点是各区域内部功率基本平衡，区域之间功率交换不大。我国的全国联网与西电东送是紧密结合的，受端系统的区外来电比例相当高，这是与欧洲同步电网完全不同的。因此研究我国的同步电网最佳规模，除了借鉴国外的经验，还应更注重我国电网的实际情况。图 1-4^[2]示出了印度采用直流联网将国家电网分隔成四个同步电网的例子；图 1-5^[3]示出了美国中东部电网与西部电网（WSCC）、南部电网（TEXAS 电网）和与加拿大 QUEBEC 电网采用直流隔开、限制同步电网规模的联网方式。这些做法都是值得借鉴和研究的。

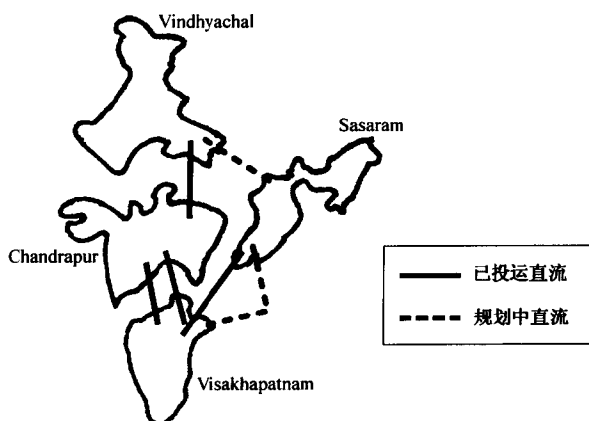


图 1-4 采用直流联网的印度国家电网

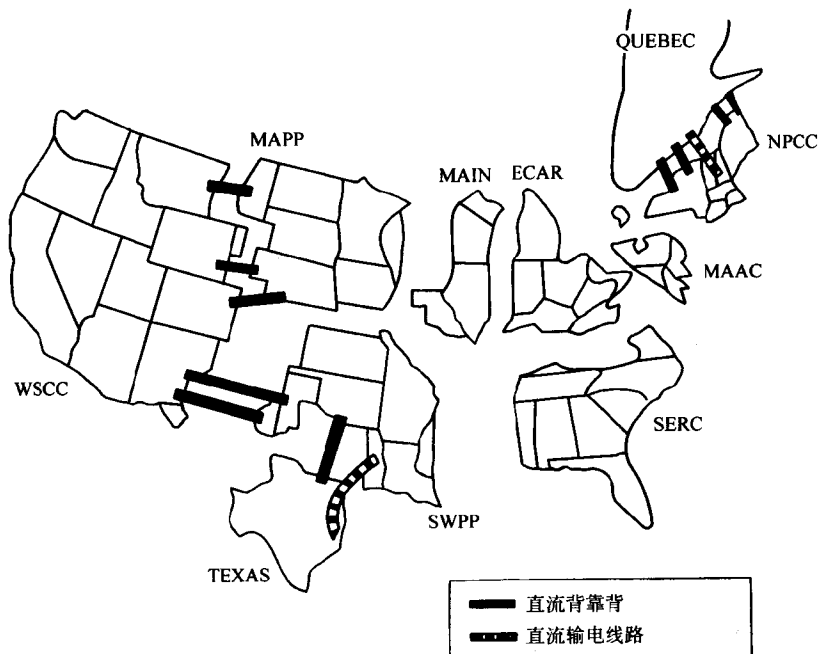


图 1-5 美国中东部电网与周边电网采用直流互联

1.1.2 交流和直流在全国联网和西电东送中的作用与定位

由图 1-2 可见，到 2030 年，超过 1000km 的西电东送容量中北通道为 1980 万 kW、中通

道为 5130 万 kW、南通道为 2930 万 kW，三大通道的总输送容量约 1 亿 kW。

如采用交流方式实施西电东送，当输电距离超过 1000km 时，交流线路的输送能力已大大低于其自然功率水平，需要采用较高的串联补偿度才可能充分发挥其输送能力（见第 2 章的分析）。可选的交流输电电压等级基本上为如下三种：

- 1) 采用电压等级为 500kV 的超高压 (Extra-high Voltage, EHV)；
- 2) 采用电压等级为 750kV 左右的超高压；
- 3) 采用电压等级为 1000kV 左右的特高压 (Ultra-high Voltage, UHV)。

作为最简化的估算，如采用 500kV 电压等级实施西电东送，即使采用了较高的串联补偿度，使其输送能力达到其自然功率水平，按每回线路输送 100 万 kW 计算，输送 1 亿 kW 容量需要 100 回交流 500kV 线路；750kV 电压等级的自然功率水平大约为 500kV 的 2 倍。因此，如采用 750kV 电压等级实施西电东送，则需要 50 回交流 750kV 线路；1000kV 电压等级的自然功率水平大约为 500kV 的 4 倍，因此，如采用 1000kV 电压等级实施西电东送，则需要 25 回交流 1000kV 线路。

从输电的效率来看，在交流输电方式中，采用特高压输电可能会比较合理。对于电压等级超过 1000kV 的特高压输电研究，20 世纪 80 年代中期以前，在国际上曾经非常热门，前苏联曾投运过特高压输电试验工程。但自此之后，这方面的研究就处于沉寂，商业化运行的实际工程更是一个也没有。目前，随着全球对环境保护的日益重视，在发达国家已很难看到交流特高压输电技术有复苏的迹象。

我国有没有必要重新研究、开发特高压输电技术，是值得考虑的。当然，考虑的因素除了西电东送的 1 亿 kW 容量之外，将来各个大区电网本身的发展是否也需要特高压等级也是一个重要因素。

如采用交流方式实现各大区电网之间的互联，必然存在以下一些问题：

(1) 短路电流水平超限问题：在未来 10 ~ 20 年内，我国几个大区同步电网的容量都将超过 1 亿 kW，500kV 电网的短路电流水平将超过 50kA，甚至超过 63kA，解决同步电网中短路电流水平超限问题将是电网运行的一个十分关键的问题。如采用 500kV 电压等级实现交流同步联网，将进一步加剧业已存在的短路电流水平超限问题。

(2) 采用交流同步联网，极有可能发生联络线功率低频振荡问题：根据国内外大电网运行的经验，当两个大容量电网交流互联以后，发生低频振荡的可能性很大，而且在这种情况下，一旦发生低频振荡，解决起来就比较困难，并不是所有机组配置电力系统稳定器 (PSS) 就能解决问题。

(3) 采用交流同步联网，有可能使一个系统中的故障传递到另一个系统，引起连锁反应，最后造成国外已出现过的大面积停电事故。

综合上述分析，可以认为交流输电技术在西电东送和全国联网中的作用有限，直流输电将在西电东送和全国联网中起主导作用。这是由于直流输电具有如下的技术特点，可以很好地满足西电东送和全国联网的要求。

(1) 直流输电技术特别适合于大功率、远距离输电，对于输电距离超过 1000km，输送容量达 1 亿 kW 的西电东送工程，采用直流输电是最经济合理的方案。根据国外资料提供的数据，目前直流输电的等价距离在 600 ~ 900km 之间。粗略地说，当输电距离超过等价距离后，采用直流输电比采用交流输电经济。

(2) 直流联网后, 不会对被连交流系统的短路电流水平产生影响。

(3) 采用直流联网, 就从网络结构上彻底根除了产生低频振荡的可能。

(4) 采用直流联网, 可以在网络结构上隔断交流故障的传递, 避免发生连锁反应, 是在网络结构上预防发生大面积停电事故的有效措施。

但是, 这里必须指出, 根据直流输电系统所连接的两端交流系统是否属于同一个同步电网, 直流输电系统所能发挥的技术优势是完全不同的。所有直流输电系统都可以被明确划分为两类: 第一类, 直流输电系统嵌入在一个同步交流系统中, 如图 1-6 所示, 比如中国南方电网就属于这样的系统; 第二类, 直流输电系统作为两个同步交流系统之间的联络线, 如图 1-7 所示, 具体实例是华中与华东联网。

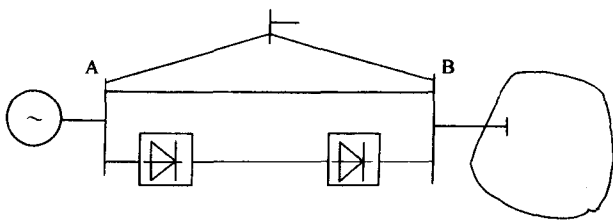


图 1-6 直流输电系统嵌入在一个同步交流系统中

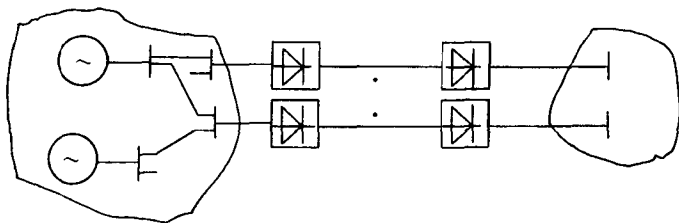


图 1-7 直流输电系统在两个同步交流系统之间作异步连接

当直流输电系统嵌入在一个同步交流系统中时, 直流输电的固有优势已大部分丧失, 如限制短路电流水平、根除低频振荡、隔断交流故障传递等优势已基本不复存在, 只仅仅利用了直流输电在大功率远距离输电方面的优势。

当直流输电系统作为两个交流系统之间的联络线时, 两个交流系统是非同步的, 可以独立运行, 这无论在运行上还是在管理上都非常方便。同时, 直流输电系统的固有优势可以充分发挥, 如限制短路电流水平、从网络结构上根除低频振荡发生的可能性以及在网络结构上隔断交流故障的传递等。另外, 当一个交流系统发生故障时, 还可以利用直流输电系统的快速可控性, 对该交流系统进行紧急功率支援, 以提高其暂态稳定性。

1.1.3 多直流落点可能造成的问题

由上一节的分析可知, 若超过 1000km 的西电东送采用直流输电方式, 假定每回直流输电线路采用 $\pm 600\text{kV}$ 、350 万 kW 容量, 则 1 亿 kW 的输送容量将需要 29 回直流输电线路。这些直流输电线路将落点在受端电网的负荷中心, 有些落点之间距离将相当靠近 (如华东电网的上海附近以及南方电网的珠江三角洲地区)。对于如此众多的大容量直流输电线路落点于同一交流系统, 而且距离非常接近, 到底会出现什么样的问题, 目前国际上并没有足够的经验。

就电网结构来看, 首先关注的问题是直流输送容量与受端交流系统本身容量之间应具备