

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R_2021072315351220210723154742311183111899

检测时间:2021-07-23 15:47:42

检测文献: 025

作者: Supervisor;Enterprise

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

检测结果

去除本人文献复制比: 5.8%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 3%

总文字复制比: 5.8%

单篇最大文字复制比: 3.7% (046)

重复字数: [1801]

总段落数: [3]

总字数: [31054]

疑似段落数: [3]

单篇最大重复字数: [1150]

前部重合字数: [424]

疑似段落最大重合字数: [1187]

后部重合字数: [1377]

疑似段落最小重合字数: [159]



指 标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0

公 式: 没有公式

疑似文字的图片: 0

脚注与尾注: 0

10.7% (1187) 10.7% (1187) 025_第1部分 (总11139字)

4.8% (455) 4.8% (455) 025_第2部分 (总9423字)

1.5% (159) 1.5% (159) 025_第3部分 (总10492字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 025_第1部分

总字数: 11139

相似文献列表

去除本人文献复制比: 10.7% (1187)

文字复制比: 10.7% (1187)

疑似剽窃观点: (0)

1	046	9.1% (1018)
	- 《学术论文联合比对库》- 2019-12-23	是否引证: 否
2	超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究 林安妮(导师: 黄永章) - 《华北电力大学(北京)硕士论文》- 2020-04-01	7.8% (871) 是否引证: 是
3	C2019267076 林安妮 超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究 林安妮 - 《学术论文联合比对库》- 2019-12-13	7.6% (844) 是否引证: 否
4	J2019265652 林安妮 超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究 林安妮 - 《学术论文联合比对库》- 2019-12-08	6.6% (731) 是否引证: 否

5	207-2009212073138-王国平	0.9% (99)
	王国平 - 《学术论文联合比对库》- 2014-04-14	是否引证: 否
6	硕士论文	0.5% (51)
	- 《学术论文联合比对库》- 2014-04-24	是否引证: 否

原文内容

专业硕士学位论文
基于 PSCAD 的直流输电系统暂态稳定性分析
Transient Stability Analysis of HVDC Transmission
System Based on PSCAD
2021 年 7 月
国内图书分类号: TM72 学校代码: 10079
国际图书分类号: 621.3 密级: 公开
专业硕士学位论文基于 PSCAD 的直流输电系统暂态稳定性分析
硕士研究生:
导师:
企业导师:
申请学位: 工程硕士
专业领域: 电气工程培养方式: 非全日制
所在学院: 电气与电子工程学院
答辩日期: 2021 年 7 月
授予学位单位: 华北电力大学
Classified Index: TM72
U.D.C: 621.3
Thesis for the Professional Master Degree
Transient Stability Analysis of HVDC Transmission
System Based on PSCAD
Candidate:
Supervisor:
Enterprise mentor:
Academic Degree Applied for: Master of Engineering
Speciality: Electrical Engineering
Cultivation ways: Part-time
School:
School of Electrical and Electronic
Engineering
Date of Defence: July, 2021
Degree-Confering-Institution: North China Electric Power University
华北电力大学硕士学位论文原创性声明
本人郑重声明: 此处所提交的硕士学位论文《超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究》, 是本人在导师指导下, 在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知, 论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。
作者签名: 日期: 年月日
华北电力大学硕士学位论文使用授权书
《超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有, 本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。
本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定, 同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版, 同意学校将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索, 允许论文被查阅和借阅, 学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、可以公布论文的全部或部分内容。
本学位论文属于 (请在以上相应方框内打“√”) :
保密□, 在年解密后适用本授权书
不保密□
作者签名: 日期: 年月日 导师签名: 日期: 年月日
摘要
近年来, 随着“双碳”战略的部署实施, 我国电力系统正处在能源转型的关键时期, 伴随新能源发电占比的不断上升, 电网呈空心化态势, 新能源并网换流器不具备同步机组耐压耐流能力强的优势, 对电力系统的暂态电压稳定能力产生了深刻的影响。另一方面, 由于我国能源与负荷呈逆向分布, 电能的传输损耗很大, 具备大容量、跨区域和远距离输电能力的高压直流输电系统得以蓬勃发展, 为“全国联网”与“西

电东送”战略的成功实施做出重要贡献。然而，当前电力系统呈现“强直弱交”的特征，随着新能源发电量增大，交流系统的电网强度持续下降，对所连接的直流输电系统的暂态电压稳定性造成深远影响。基于此，本文在交直流混联系统“强直弱交”的大背景下，基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件，研究了高压直流输电系统的暂态电压稳定性以及提升稳定性措施。

本文的主要研究内容和创新成果如下：

(1) 基于短路比/有效短路比指标判定交直流输电系统的强度首先介绍了直流输电系统的数学模型和系统结构，以及换流站的结构与控制策略，基于戴维南等值电路思想，推导出了交直流系统短路比指标和有效短路比指标，用于判断交流系统电网强度，并作为判断直流输电系统**稳定性的重要指标**。

(2) 研究了不同无功补偿设备对系统暂态电压稳定性的提升效果针对交直流混联系统存在的动态无功支撑能力不足问题，对比分析了不同无功补偿设备的系统结构及无功补偿机制，并介绍了各设备的优缺点和配置经济性，推导了同步调相机的次暂态和暂态特性下的无功响应方程。

(3) 基于 PSCAD 仿真分析了直流输电系统暂态电压稳定性在 PSCAD 中搭建了 LCC-HVDC 直流输电仿真模型，分别在直流送/受端设置多种类型故障，研究不同故障工况下的直流输电系统的暂态电压稳定特性；研究了在相同交流系统短路故障下，送/受端不同交流系统短路比对于**直流输电系统稳定性的影响；分析直流输电系统换相失败/直流闭锁故障时**，直流线路的功率传输特性，对比了送端加装不同无功补偿设备对于直流系统暂态稳定性的提升作用。

关键词：直流输电系统；暂态电压稳定性；短路比；动态无功补偿

II

Abstract

In recent years, with the deployment and implementation of the "double carbon" strategy, China's power system is in the key period of energy transformation. With the rising proportion of renewable energy generation, the power grid is becoming hollow. Because of the renewable energy grid connected converter lack of the advantage in synchronous generations' strong voltage and current resistance, this feature has a profound impact on the transient voltage stability of power system. Meanwhile, due to the reverse distribution of energy and load in China, the transmission loss of electric energy is very large, and help by the large capacity, cross regional and long-distance transmission capacity, the HVDC system has been developed vigorously, which has made important contributions to the successful implementation of the strategy of "national networking" and "west to east transmission". However, the current power system presents the characteristics of "strong DC and weak AC". With the increase of new energy generation, the power grid strength of AC system continues to decline, which has a profound impact on the transient voltage stability of the connected DC transmission system. Based on this, the paper studies the transient voltage stability and the measures to improve the stability of HVDC transmission system based on PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation software under the background of "strong DC and weak AC" of AC/DC hybrid system.

The main research contents and innovation results of this paper are as follows:

(1) Determine the Strength of AC / DC transmission system based on short circuit ratio / effective short circuit ratio index

Firstly, analysis of the mathematical model and system structure of DC transmission system, as well as the structure and control strategy of converter station are introduced. Based on the idea of Thevenin equivalent circuit, the short circuit ratio index and effective short circuit ratio index of AC / DC system are derived, which are used to judge the power grid strength of AC system and as an important index to judge the stability of DC transmission system.

(2) The effect of different reactive power compensation equipment on the stability of transient voltage of the system is studied

In view of the shortage of dynamic reactive power support capability in AC/DC hybrid system, the system structure and reactive compensation mechanism of different reactive power compensation equipment are analyzed, and the advantages and disadvantages of each equipment and the configuration economy are introduced. The reactive response equations of the sub-transient and the transient characteristics of synchronous condenser are derived.

III

(3) Analysis of the transient voltage stability of DC transmission system based on PSCAD simulation software

The simulation model of LCC HVDC transmission is built in PSCAD simulation software. Various types of faults are set up at DC transmission/receiving terminals respectively, and the transient voltage stability characteristics of DC transmission system under different fault conditions are studied. The influence of short circuit ratio of different AC systems on the stability of DC transmission system is studied under the same short circuit fault. The power transmission characteristics of DC line are

analyzed when the commutation failure and blocking fault occur in DC transmission system. The effect of different reactive power compensation equipment on the transient stability of DC system is compared.

Keywords: HVDC transmission system, Transient voltage stability, Short circuit ratio, Dynamic reactive power compensation

IV

目录

摘要

..... I	
Abstract.....	
..... II	
目录	
..... IV	
第 1 章绪论	
..... 1	
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.1.1 直流输电系统发展现状	1
1.1.2 直流输电系统的电压稳定问题研究	3
1.2 国内外研究现状与存在的问题	5
1.3 论文主要研究内容	7
第 2 章直流输电系统数学模型	8
2.1 引言	8
2.2 直流输电系统建模	8
2.2.1 直流输电系统基本结构	8
2.2.2 整流器数学模型	9
2.2.3 逆变器数学模型	10
2.2.4 直流输电系统数学模型	11
2.2.5 直流输电系统控制策略	12
2.3 短路比指标	13
2.4 本章小结	
15	
第 3 章无功补偿设备对直流暂态稳定提升作用分析	16
3.1 引言	
..... 16	
3.2 基于串联/并联无功补偿电容器	16
3.3 基于电力电子技术的动态无功补偿设备	17
3.3.1 静止无功补偿器	
SVC.....	17
3.3.2 静止同步补偿器 STATCOM	18
3.4 基于同步电机技术的动态无功补偿设备	19
3.5 本章小结	
21	
第 4 章直流输电系统电压稳定性仿真研究	22

4.1 引言	22
4.2 LCC-HVDC 拓扑结构及工作原理	22
4.2.1 LCC-HVDC 拓扑结构	V
4.2.2 LCC 工作原理及数学模型	23
4.3 LCC-HVDC 仿真模型搭建及参数选取	24
4.4 仿真验证	26
4.4.1 受端系统故障仿真	26
4.4.2 送端系统故障仿真	32
4.5 本章小结	35
第 5 章结论与展望	36
5.1 归纳与结论	36
5.2 不足与展望	36
参考文献	38
攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果	43
第 1 章绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义	
1.1.1 直流输电系统发展现状	
随着社会的不断发展和进步,我国对电力的依赖度逐步增加,我国国民经济的不断发展与电力行业的持续供给息息相关,伴随着整个电力行业对能源利用的效率的不竭增长,每一项目、部门的电气智能化程度也是越来越高。然而,与国家电力需求不断增加相对应的,是因过度依赖不可再生的煤炭能源发电而导致环境污染日益严峻的问题[1]。为此,能源转型成为了“十四五”规划里的重要内容,	
根据习近平主席在 2020 年 9 月联合国大会上的承诺,我国将在 2030 年实现“碳达峰”,2060 年实现“碳中和”,这意味着加快电力能源供给侧深化改革,大力发展清洁可再生的新能源发电技术,这已经逐渐成为当前电力行业发展阶段的第	
一大任务[2-3]。 <u>截至 2018 年底,我国本国地区的清洁能源发电装机总容量已经超过了 7 亿 kW,已经达到了 30%的全球清洁能源装机的总容量,在这其中,风电、光伏装机容量分别为 1.46 亿 kW 和 1.53 亿 kW。对于新建新增的装机,其风电并网装机容量为 2059 万 kW,光伏并网装机容量为 4426 万 kW,较去年而言增加了近 50%的容量。根据《中华人民共和国国家发展和改革委员会及国家能源局于 2017 年 4 月份印发的《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》可知,2030 年我国非化石能源占总的能源消费量比例将达到 20%左右,而到 2050 年非化石能源消费比例将达到全部消费比重的 50%[4]。综上所述,未来电力系统将会是以新能源为主的新型电力系统。</u>	
我国存在能源资源与负荷中心逆向分布的特点[5],在传统电力系统中,我国煤炭资源主要集中在陕西、山西内蒙古西部地区,水电集中在西南部地区,而 <u>负荷主要集中在东南部地区。因此,为保障“西电东送、北电南送”战略的成功实施,</u>	
具有传输容量大、输送距离远、不存在同步性问题、传输消耗小的高压直流(High-Voltage Direct Current, HVDC)输电系统应运而生,并在未来几十年里迅速发展,为推进区域联网到全国联网做出了重要的贡献,表 1-1 中列出了我国已投运的高压直流输电工程[6-7]。	
表 1-1 当前已运行的国内直流输电工程目录	
序号 工程名称 额定功率 额定电压 距离(km) 投运 2	
(MW) (kV) 架空线 电缆时间	
1 镇海—舟山线	50 ±100 42.1 12 1989
2 葛洲坝—南桥线(葛上线)	1200 ±500 1045.7 / 1990
3 天生桥—广州线	1800 ±500 980 / 2001
4 芦潮港—嵊泗线	35.5 ±50 6.5 59.7 2003
5 龙泉—政平线	3000 ±500 890 / 2003
6 江陵—鹅城线	3000 ±500 940 / 2004
7 安顺高坡—塘山(贵广线)	/ ±500 936 / 2004
8 灵宝背靠背工程	360 ±120 90 / 2005
9 蔡家冲—华新线	3000 ±500 1048.6 / 2006

- 10 兴仁—深圳白花洞（贵Ⅱ） 3000 ±500 1193 / 2007
- 11 高岭背靠背工程 1500 ±125 / / 2008
- 12 德宝直流 3000 ±500 574 / 2009
- 13 呼辽直流 3000 ±500 908 / 2010
- 14 云广特高压直流工程 5000 ±800 1438 / 2010
- 15 向家坝—上海 6400 ±800 2034 / 2010
- 16 宁夏宁东—山东 4000 ±660 1333 / 2011
- 17 三沪Ⅱ回 3000 ±500 1106 / 2011
- 18 青藏直流 600 ±400 1038 / 2011
- 19 南汇风电场柔性直流 20 ±30 8.4 / 2011
- 20 黑河背靠背工程 750 ±220 1438 / 2011
- 21 锦屏—苏南 7200 ±800 2100 / 2012
- 22 高岭背靠背 750 ±125 / / 2012
- 23 哈密南—郑州 8000 ±800 2210 / 2014
- 24 溪洛渡左岸—浙江 8000 ±800 1680 / 2014
- 25 宁夏灵州—浙江绍兴 8000 ±800 1722 / 2016
- 26 晋北—南京 8000 ±800 1119 / 2016
- 27 酒泉—湖南 8000 ±800 2383 / 2017
- 28 锡盟—江苏 8000 ±800 1600 / 2017

由于我国新能源资源主要存在于西北、东北和华北地区，大型新能源发电基地通常处于本地负荷并不多的边远地区，其产生新能源电能需要跨省输送至用电量更大的负荷中心，因此大规模新能源发电经高压直流输电线路外送的现象将成为常态[8-9]。由于交直流系统间有着直接的相互影响作用，理想的电力系统应该是

“强直强交”的电力系统，然而，对于直流送端的新能源电网，新能源机组采用电力电子换流器并网，缺乏足够的同步发电机组，受限于换流器本身存在的耐压耐流能力不足的特点，存在惯量支撑能力弱、抑制振荡的阻尼不足、电压支撑能力不足、动态无功补偿能力不足等问题[10-14]；对于直流受端地区，受端系统往往为经济发达或者重工业集中的省份，其负荷特点为集中消耗、用电量大的特点，

而这些负荷聚集点又常存在电力建设较为落后，动态无功补偿设备不足的情况，线路存在重载运行甚至邻近极限运行的状态[15-16]。因此实际电力系统无论对于送端还是受端，都呈现“强直弱交”的特点。弱交流系统对于直流系统的稳定性存 3

在深远影响，为此，在“强直弱交”的电力系统大背景下，研究直流输电系统的暂态稳定性问题，并研究提升直流输电系统的暂态稳定性的有效措施，对今后的直流输电工程建设有着重要的指导意义。

1.1.2 直流输电系统的电压稳定问题研究在过去几十年时间内，世界多地都曾发生过规模较大的电压失稳或崩溃引发事故，由此，电力系统电压稳定性问题开始引起学术界的大量关注，表 1-2 列出了一些公开报道的较为重要的电压失稳事件[17-20]。

表 1-2 部分电压失稳的重要事件日期地点时间范围

- 1965年12月9日日本长期，30min
- 1977年9月22日美国佛罗里达州长期，数分钟
- 1978年12月19日法国长期，26min
- 1982年8月4日比利时长期，4.5min
- 1983年12月27日瑞典长期，55s
- 1985年5月17日美国佛罗里达州暂态，4s
- 1987年1月12日法国长期，6~7min
- 1987年7月23日日本东京长期，20min
- 1987年8月22日美国田纳西暂态，10s
- 2003年8月14日美国东北部和加拿大东部长期
- 2003年9月23日瑞典-丹麦长期
- 2011年2月4日巴西长期
- 2013年8月6日菲律宾长期
- 2012年7月30日印度长期
- 2015年3月31日土耳其长期
- 2016年9月28日南澳大利亚长期

伴随对电力系统电压稳定问题的深入研究，世界各国研究人员已将研究问题细分为电压稳定机理探究、电压稳定的指标判据、电压稳定的仿真与建模、电压稳定的在线检测、电压失稳预警与保护措施、电压调节与无功补偿研究等多方面。

在 1990 年，美国电气与电子工程师学会（IEEE）做出的电压稳定报告中提到：电压稳定的本质是维持系统电压在额定值周围不变，而功率与电压都是可控的，因 4

此当负荷导纳增加时，负荷功率也增加，电力系统依然能保持电压与功率的稳定[21]；

在 2001 年，参照国际大电网会议组织（CIGRE）对电力系统电压稳定的定义和分类方法，我国制定的《电力系统安全稳定导则》（DL755-2001），该规则进一步将整个电力系统中的电压稳定解释为：电力系统在稳态运行时受到或小或大的扰动后，不发生电压失稳或崩溃事故，系统电压能恢复或保持到一定允许范围内的能力[22]；在 2004 年，IEEE 和 CIGRE 联合工作组做出的电力系统稳定性定义与分类报告中[23]，对电压稳定的定义进行了更为完整的阐述，指出电力系统运行在给定初始条件下，受到外界扰动后：1. 根据扰动大小可分为大扰动下的电压稳定(例如系统故障、线路短路、发电缺失)和小扰动下的电压

稳定(例如负荷和电源出力的缓慢波动),大扰动电压稳定关乎负载、电源和线路特性,并受连续和离散的继电保护装置间相互作用的影响,研究时间从几秒到数十分钟不等,小扰动电压稳定主要受到负荷的影响,由于电压变化较为平缓,可以线性化系统潮流方程,从而提取出有价值的灵敏度信息;2. 根据研究时间的跨度范围,可以将电力系统电压稳定分为短期电压稳定和长期电压稳定,短期电压稳定必须考虑快速动作的负荷元件特性,如基于电磁耦合特性的感应发电机、具备快速响应能力的电力电子控制器件或是新能源与直流输电换流器等,研究范围通常在故障发生后几秒内,需要建立系统微分方程进行求解。长期电压稳定的研究时间至少是分钟级的,因而研究时需要考虑动作时间较长的设备负荷特性(例如有载调压变压器、发电机励磁限流器与恒温负荷等),一般通过仿真来得到各元件的动态特性。根据上述的研究和

2019 年国家能源局组织编修的最新版《电力系统安全稳定导则》(征求意见稿),

目前研究中通常将电压稳定按照受到扰动的大小分为静态电压稳定、暂态电压稳定和长期电压稳定[24]。

直流输电系统主要由直流输电线路与送/受两端换流站组成,其中,送端换流站将交流电整流为直流电,受端换流站将直流电逆变为交流电,因而送端换流站也被称为整流站,受端换流站也被称为逆变站。换流站的核心部分是电力电子换流器,由于换流器在进行电能变换时存在触发角 α 和换相角 μ ,整流站和逆变站交流测的电流相位总是落后于电压相位,因此,正常工况下直流输电线路在传输有功的同时,还会吸收大量的无功功率[25-26],通常情况下,整流站和逆变站消耗的无功功率占比达到其传输有功功率 50%-60%[27-28],由于无功补偿问题一般按就近原则来解决,同样也是工程建设的需要,这部分无功功率需求由换流站近端设置的滤波站的电容器来满足,因此,工况运行情况下,交流系统与直流系统之间几乎没有无功功率的交流问题。

直流输电系统与送/受端交流系统都是强耦合的,因而其存在的静态电压稳定

问题和暂态电压稳定问题不仅受自身因素影响,同样也受交流系统电网强度的影响[29-30],在送端为高比例新能源电网的情况下,“强直弱交”的电力系统特性更为突出,当脆弱的交流系统故障时,存在引发直流输电线路发生换向失败甚至直流闭锁的连锁反应情况的可能性,此时交直流系统间的无功交换近似为 0 的平衡状态被打破,交直流系统间剧烈的无功响应会引起严重的电压稳定性问题,交流系统电压失稳又会反作用于直流系统的有功功率传输和直流电压的稳定,引发电力系统的频率稳定问题和功角稳定问题,若故障持续扩大,最终将导致系统的大规模解列和直流输电线路停运,严重威胁电力系统的安全稳定运行[31-33]。

综上所述,为有效避免上述情况的发生,在考虑电力系统逐步转型趋势下,

分析直流输电系统的运行特性,探究交流系统电网强度对直流输电系统影响的有效考核指标,寻求有效提升交流系统电网强度和动态无功补偿能力,对于研究提升直流输电系统暂态电压稳定能力有着重要的指导意义。

1.2 国内外研究现状与存在的问题当前针对直流输电系统电压稳定的分析方法,基本都是通过从交流系统的分析方法中通过定义扩展得到的,调研国内外的文献可知,电压稳定问题最初只局限于静态电压稳定领域[33-35],主要研究方向为求解局部地区的静态电压稳定裕度,

然而,伴随近几十年来多起电压失稳引起的大停电事故的发生,研究人员开始将目光从局部电压稳定分析转移到全网大范围区域电压稳定的分析上来,并逐渐重视对于暂态电压稳定问题的研究[36-38]。

静态电压稳定的理论基础是潮流的可行解域理论,静态电压稳定的极限就是电力系统的潮流极限,求解电力系统的静态电压稳定裕度,可以较为直接的反映出当前系统承受负荷及故障扰动下的电压维持能力[39-40]。静态电压稳定的分析方法主要可分为:1. 奇异值分解法[41-44]:奇异值分析法又称为特征值分析法,其原理为从数学角度分析系统潮流方程,当系统处于电压稳定的临界点时,潮流雅可比矩阵接近奇异,因而通过对该矩阵进行模态分析,其奇异程度就能反映出电压系统的工作状态距离临界状态之间的“距离”。奇异值分解法需要线性化潮流方程,

而系统潮流接近极限时,发电机无功越线会使最小特征值发生跳变,因此难以准确确定系统的电压稳定程度,并且该状态下非线性元件的电压和功率特性如何线性化也对计算结果有很大的影响;2. 灵敏度分析法[45-48]:该方法计算简单,物理概念明确,由于需要的数据量较少,容易实现在线分析。通过建立系统控制参数与网络中负荷参数间的灵敏度关系的数学模型,对灵敏度计算结果进行计算排序,

就能据此指导预防控制的设置方法。灵敏度分析法由于忽略的数据量较多(例如负

荷特性、发电机无功约束等),因而计算结果准确性不高,只能作为一种估算方法;

3. 连续潮流法延拓法[49-51]:该方法又称为 P-V 曲线法,通过在变化参数中加入一维的校对方程,可以消除 P-V 曲线拐点处的雅可比矩阵奇异现象。采用多次迭代优化的连续潮流法可以准确测得电压静稳极限,是一种较为可靠的计算方法,但是由于迭代次数多,因而一般适合于离线计算;4. 概率分析法[52-54]:该方法能考虑到新能源场站出力不确定性的影响,通过大数据概率分析随机因素对于系统静态电压稳定的影响效果,该方法的难度在于获取随机统计样本以及对复杂随机特性样本的概率稳定分析;5. 短路比指标法[55-58]:该方法的核心思想是基于电路理论中的戴维南/诺顿等效电路方法,通过将复杂的交流系统等值为一个理想电压源串联一

个数值可调的阻抗回路,进而评估交直流混联系统中交流系统与直流系统间的强弱情况,该方法能较为客观的评价交流系统强度对于直流系统电压稳定问题的影响程度,因而在工程应用和系统评估体系中得到重视。

经过多年来的研究,暂态电压稳定的理论目前主要可分为以下三种方法。1.

直接法[59-62]:直接法又被称为暂态能力函数法,包括势能界面法、扩展等面积法、

动态安全域法等,该方法的指导思想基于系统能量守恒定律,理论基础为非线性动力学当中的李亚普洛夫(Lyapunov)稳定性理论,其原理为通过计算系统故障至故障切除时刻系统产生的暂态能量,然后比较其与系统临界暂态能量之间大小来判定系统能否保持暂态稳定性,具有非线性方程组构造简单,计算速度快的优点,

但由于该模型忽略了负荷动态特性和复杂元件的特性,因而更多应用于电力系统暂态功角稳定方面的应用,而在暂态电压稳定研究中应用较为受限;2. 非线性动力学方法[63-66]:该理论方法包括混沌理论、中心流形理论以及分岔理论,其中以分岔理论研究最多,该方法可以揭示多系统影响参数下电压失稳的机理,不受到系统的规模大小与复杂程度的约束,但存在非线性能量函数构造复杂、电力系统稳定域边界难以确定的问题,因而应用的范围受到了限制;3. 时域仿真法[67-70]:又称为逐步积分法,该方法考虑系统中各负荷动态特性与元件的非线性特性,列出所有暂态过程中的非线性微分方法和代数方程组,并通过数值积分的方法对大规模的方程组一一求解,由于该方法计及了所有复杂模型参数,因而能实现各种工况下系统的暂态电压

稳定性的求解，并且具有计算精度高的优点，可用于复现系统故障，但由于计算量大，时域仿真法不满足在线暂态分析的要求，只能在离线暂态稳定分析中推广应用。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
1. The main research contents and innovation results of this paper are as follows: (1) 2. 亿 kW 和 1.53 亿 kW。对于新建新增的装机，其风电并网装机容量为 2059 万 kW，光伏并网装机容量为		
2. 025_第2部分		总字数：9423
相似文献列表		
去除本人文献复制比：4.8%(455) 文字复制比：4.8%(455) 疑似剽窃观点：(0)		
1	高压直流输电控制系统仿真研究--优秀毕业论文 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 (http://www.docin.com) 》 - 2018	1.8% (165) 是否引证：否
2	朱艳_高压直流输电系统控制策略及故障诊断研究 朱艳 - 《学术论文联合比对库》 - 2015-03-11	1.4% (130) 是否引证：否
3	高压直流输电控制系统仿真研究 马聪(导师：王颖) - 《北京化工大学硕士论文》 - 2011-06-02	1.1% (99) 是否引证：否
4	多馈入交直流系统电压稳定分析 林伟芳(导师：汤涌;卜广全) - 《中国电力科学研究院硕士论文》 - 2008-03-01	0.9% (89) 是否引证：否
5	SIMULINK在电力电子中的应用 朱晓东,高继贤 - 《东北电力学院学报》 - 2005-08-30	0.7% (63) 是否引证：否
6	五相发电机整流系统建模仿真 陈晖;杜钦君;孙超;卢恩庆; - 《微电机》 - 2012-09-28	0.5% (49) 是否引证：否
原文内容		

在提升直流系统电压稳定性方面，主要方法为增强交流系统电网强度或者提升其无功补偿能力。用于提升直流送/受端无功补偿能力的设备包括串联或者并联电容器/电抗器[71]、静止同步补偿器 STATCOM[72] (Static Synchronous Compensator)、

基于晶闸管投切的无源式静止无功补偿器[73-74] (Static Var Compensator, SVC)、同步调相机[75]等，当电网故障下交直流系统发生剧烈无功交换时，这些无功补偿设备能提供一定的无功响应能力，因而能够改善系统的电压调节能力，是提高电力系统暂态电压稳定性的常规手段。

1.3 论文主要研究内容本文围绕直流输电系统的暂态电压稳定性影响因素展开分析，研究直流送/受端交流系统强度对于直流输电系统电压性的影响机理，并根据不同无功补偿设备的补偿机制，分别研究送端和受端采用不同无功补偿设备下的暂态电压稳定性的提升效果，全文共五章，具体内容如下：

第一章介绍了我国正处于能源转型的改革方向，对直流输电技术的发展进行了介绍，并列出了我国在建的直流输电工程投运状态；参阅了大量国内外文献，介绍了电力系统电压稳定性的研究发展历史，并分别对静态电压稳定和暂态电压稳定的主流研究理论进行了介绍；初步介绍了提升交直流混联电力系统电压稳定性的多种无功补偿设备。

第二章研究了整流器和逆变器的基本结构和工作原理，并推导了直流输电系统的数学模型，介绍了直流系统常用控制策略；推导了直流输电系统的短路比计算方法，并据此对交流电网的强弱进行了划分，作为判断交直流混联系统的暂态电压支撑能力的依据。

第三章介绍了不同无功补偿设备的结构和工作原理，并对各个设备的优缺点进行对比，最后从静态无功补偿能力、动态无功补偿速度和响应能力各方面进行了比较总结，分析了适合用于直流送/受端无功补偿和调压的补偿设备，并对调相机的次暂态和暂态无功响应特性进行了公式推导。

第四章在 PSCAD 中搭建了 LCC-HVDC 仿真模型，仿真中对比分析了交流系统不同短路故障情况下的暂态电压稳定能力；仿真对比了不同交流电网强度对直流输电系统稳定性的影响；设置直流输电线路故障，对比分析了送端配置不同无功补偿设备的动态无功补偿能力。

第五章总结了全文的主要研究成果，并对下一步可以继续研究的方向进行了展望。 8

第 2 章直流输电系统数学模型

2.1 引言我国电力能源相对集中于西北地区，电力负荷主要集中于华北、华东等地区。

对于西北等能源地区，风能、太阳能等可再生能源丰富，可再生能源发电容量逐年提升，发电占比稳步上升，当地电能消纳能力基本饱和；对于沿海、华东等主要负荷地区，经济发展促使用电量快速增长，但当地或附近电能供给不足。高压直流输电具备大容量、远距离输电的独特优势，是目前实现全国电网互联的重要解决方案。直流输电系统的送端通常为能源地区，将

本地无法消纳的电能送出；

受端通常为负荷地区，消耗送端送出的电能，以实现电能的供需平衡。由于交直流电网之间存在相互作用，送端与受端联系紧密，故障对互联电网的影响需引起足够重视。交直流系统之间的稳定问题在很大程度上取决于交流系统相对于直流

直流系统输电容量的强弱程度，即短路比。短路比能够说明电网强度对直流系统

的稳定性影响，短路比越大，系统抗干扰能力越强，稳定性越好。

2.2 直流输电系统建模

2.2.1 直流输电系统基本结构直流输电系统主要分为三个部分：送端交流系统、直流输电和受端交流系统。

送端由火电、风电及光伏等汇集组成交流电网，汇集的电能经送端换流站将交流电整流为直流电，直流电经高压直流输电线路远距离输送至受端，受端逆变站将直流电重新转化为交流电，供给由负荷组成的交流电网。本章为简要分析，对送端交流电网进行戴维南等值处理，在整流侧母线处，根据不同类型发电机组汇集后表现的外特性，将其等效为单个发电单元，母线电压等级及等效阻抗分别为 U_R

和 Z_R ；同时在逆变侧母线处，根据负荷外特性，将各复杂负荷等效为单个交流电网，母线电压等级及等效阻抗分别为 U_I 和 Z_I 。由送端电网、整流站、逆变站、直流线路以及受端电网构成的直流系统的单线图如图 2-1 所示。 9

图 2-1 直流输电系统模型直流输电系统中包含的主要设备包括：

(1) 换流变压器：将交流系统电压变为换流器所需的交流电压；

(2) 换流器：交流变直流的整流器以及直流变交流的逆变器等变流设备；

(3) 直流电抗器：减少直流电压及电流的波动，抑制扰动时直流电流的上升速度；

(4) 直流滤波器组：用于直流侧滤波，通常换流桥为单桥时，滤除 $6n$ 次谐波 ($n=1, 2, \dots$)，如 6, 12 次谐波，双桥时滤除 $12n$ 次谐波，如 12, 24 次谐波；

(5) 交流滤波器组：用于交流侧滤波，通常换流桥为单桥时，滤除 $6n \pm 1$ 次谐波 ($n=1, 2, \dots$)，如 5, 7 次谐波，双桥时滤除 $12n \pm 1$ 次谐波，如 11, 13 次谐波；

(6) 无功补偿设备：用以给换流站提供无功功率，提升电压稳定性。常用的无功补偿设备由静止同步补偿器 (STATCOM)、静止无功补偿器 (SVC) 和调相机等。

此外，直流系统还应包括测量、控制、保护等设备。

2.2.2 整流器数学模型整流器工作原理图如图 2-2 所示。

图 2-2 整流器工作原理图整流器工作基本要求及特点为：

(1) 要形成能够向负载供电的回路，即每时每刻均有两个晶闸管导通，且两个晶闸管不能为同一相 (T_1 和 T_4 , T_3 和 T_6 , T_5 和 T_2)，不能均为上半桥臂 (T_1 , T_3

和 T_5) 或下半桥臂 (T_4 , T_6 和 T_2)； 10

(2) 晶闸管按照 $T_1-T_2-T_3-T_4-T_5-T_6$ 的顺序依次导通，触发信号相位依次相差 60° ，其中同一相的上下两个桥臂之间的触发信号相位相差 180° ；

(3) 整流输出电压 U_d 在一个周期内脉动 6 次，且波形一致。

以 60° 为一个周期， U_d 平均值可表示为 3

$d R$

d

$3 \frac{1}{2} \left(\frac{d}{R} \right) \cos \alpha$

$3 \frac{2}{3} = \cos$

$a \ c \ b \ a \ b$

R

$U \ e \ e \ e \ t \ e \ e \ t$

$E \ X \ I$

(2-1)

式中： α 为触发角，由控制系统输出决定； ω 为角频率； E 为线电压有效值； $X_R = \omega L_R$ ；

I_d 为直流电流，为常数； γ 为换相角，由下式确定

$d \frac{2}{3} (\cos \alpha - \cos \beta) = \frac{2E}{3I_d}$

$X \quad (2-2)$

计及触发角和换相角影响，通常近似认为整流器交流侧的相电流有效值 I_R 与

直流电流关系为 $I_R = \frac{d}{3} I_d$

$6 I_R = I_d \quad (2-3)$

考虑到交流侧与直流侧的有功功率保持平衡，则有 $P_d = P_R$

$3 E I_R \cos \phi_R = U_d I_d \quad (2-4)$

由式 (2-3) 和式 (2-4) 可知

$d R$

R

$\cos \phi_R = \frac{2}{3} \frac{U_d}{E}$

U

$E \quad (2-5)$

式中： ϕ_R 为整流器交流侧功率因素角， ϕ_R 位于第一象限。

根据功率平衡关系可知，整流器稳态工作时向交流系统吸收的功率为

$P_d = P_R = P_{ac}$

$P_d = P_R$

\tan

P P U I

Q P (2-6)

式中：PdR 为整流器直流侧出口处的直流功率。

式(2-1)，式(2-3)~式(2-6)为整流器的平均值模型。整流器正常运行时消耗的无功功率 $Q_R \approx (0.3 \sim 0.5)P_d$ 。

2.2.3 逆变器数学模型逆变器的基本结构与整流器相同，但逆变器触发角通常大于 90° ，功率传输方向为直流侧向交流侧。为与整流器区分，在逆变器中定义 UdI 方向与整流器相反，

触发超前角 $\beta = \pi - \alpha$ ，熄弧角 $\delta = \beta - \gamma$ 。 δ 通常约为 $17^\circ \sim 21^\circ$ ，过小会导致熄弧时间不足，11

易引起换相失败故障；过大会增加逆变器的无功功率损耗。

将 $\alpha = \pi - \beta$ ， $\delta = \beta - \gamma$ 代入式(2-1)~式(2-6)可得，逆变器的平均值模型为

dI d

d

I

I d

dI

I

I dI dI d

I dI I

$3^2 3 = \cos$

$2(\cos \cos(\)^2 6$

$\cos^3 2$

\tan

I

U E X I

EI

X

I I

U

E

P P U I

Q P (2-7)

式中：E 为逆变器交流侧线电压有效值； $XI = \omega LI$ ； ϕI 为逆变器交流侧功率因素角，

ϕI 位于第二象限；PI 和 QI 分别为逆变器由直流侧向交流侧传输的有功功率和吸收的无功功率；Pd I 为逆变器直流侧出口处的直流功率。

2.2.4 直流输电系统数学模型基于图 2-1 所示的直流系统结构，忽略直流线路上分布电容的影响时，整流器直流侧电压和逆变器直流侧电压关系为

d d d R d I

R I U U (2-8)

式中：Rd 为直流线路电阻。

基于整流器和逆变器数学模型，直流输电系统的数学模型可以表示为 12

dR R R d

dI I d

dR

R

R

dI

I

I

dR dR d

dI dI d

R dR R

I dI I

R R d

I I d

$3^2 3 = \cos$

$3^2 3 = \cos$

$\cos^3 2$

$\cos^3 2$

\tan

$\tan 6 6$

I

U U X I

$$\begin{aligned}
&U \quad U \quad X \quad I \\
&U \\
&U \\
&U \\
&U \\
&P \quad U \quad I \\
&P \quad U \quad I \\
&Q \quad P \\
&Q \quad P \\
&I \quad n \quad I \\
&I \quad n \quad I
\end{aligned}$$

(2-9)

式中：UR 和 UI 分别为整流侧和逆变侧换流母线的线电压；n R 和 n I 分别为整流器和逆变器的交流侧变压器变比；XR 和 XI 分别为整流侧和逆变侧的变压器内电抗。

结合式 (2-8) 和式 (2-9)，直流系统方程中共有 11 个方程和 17 个变量，分别为 UdR, UdI, Id, α, δ, UR, UI, IR, II, φR, φI, PR, QR, PI, QI, n R 和 n I。此外，求解方程还需要 6 个初始条件。若已知送端和受端换流母线电压 UR 和 UI，变压器变比 n R 和 n I，以及整流器和逆变器的触发控制方程，即 α 和 δ，则可通过方程求解其他变量。

2.2.5 直流输电系统控制策略整流器和逆变器中的晶闸管开断受触发电路控制，即换流器的触发控制负责直流输电系统中交流一直流一交流转换过程，并要求直流系统能够传输稳定的功率以及维持电压稳定，因此触发控制是换流器控制核心。控制系统主要由定电压控制、定电流控制、电流限制控制、整流侧最小触发角控制、逆变侧最大触发角控制及裕度控制组成。

(1) 定电压控制：主要维持直流电压的稳定。在发生扰动或故障时，直流电压会产生低电压或过电压，整流侧采用定电压控制用以减小此影响，逆变侧采用定电压控制保证直流电压稳定在正常范围。

(2) 定电流控制：通过控制整流器的触发角信号，使实际运行的直流电流在 13

给定电流值的允许偏差内。在发生扰动或故障时，定电流控制能够限制暂态电流的上升，保护晶闸管及其他设备的运行安全。

(3) 电流限制控制：在控制系统中设置最小电流限制控制，避免直流系统非正常运行时，直流电流过低导致功率传输中断；设置最大电流限制控制，当直流输电系统处于过负荷、降压运行等特殊工况时，能够保证系统的安全性。

(4) 整流侧最小触发角控制：整流器触发角过小时，可能会导致晶闸管两端电压低于导通值，从而影响正常导通顺序，不利于换流过程的稳定。整流侧的交流系统发生故障时，减小触发角能够降低故障对系统的影响，但在清除故障且电压恢复后，触发角过小可能会引起过电流。因此，最小触发角应设置在合适范围内。

(5) 逆变侧最大触发角控制：限制逆变器最大触发角，防止直流系统非正常运行时，触发角过大导致熄弧角太小，从而引起换相失败故障。

(6) 定熄弧角控制：用于控制逆变器的触发控制，避免晶闸管的误开通导致的换相失败。定熄弧角 δ 一般控制在 17°~21°，最小值一般不低于 15°。

(7) 裕度控制：正常运行时，两个换流站分别通过各自的控制共同维持直流电压和直流电压的稳定。整流侧电流整定值和电压整定值分别比逆变侧大一个电流裕度和一个电压裕度，以避免整流侧和逆变侧的定电流控制和定电压控制同时作用。实际系统中，电流裕度为额定值的 10%，电压裕度为直流线路的压降。

2.3 短路比指标如图 2-1 所示，以送端交直流系统为例，送端经戴维南等值后，换流母线处的电压为 UR，戴维南等值阻抗为 ZR。送端短路比定义为 2

$$\begin{aligned}
&R \\
&d \quad R \quad d \\
&ac \\
&1SCRS \quad U \\
&P \quad Z \quad P \quad (2-10)
\end{aligned}$$

式中：Sac 为交流系统短路容量；Pd 为直流输电的容量。

在单馈入直流系统中，其整流侧换流母线处通常配置电容、滤波器等无功补偿装置，以补偿整流站的无功功率。考虑无功补偿的影响后，定义有效短路比为 2

$$\begin{aligned}
&R^2 \\
&R \quad R \\
&d \quad R \\
&a \\
&d \\
&c \quad c \\
&1ESCRS \quad UU \quad B \\
&P \\
&Q \\
&Z \quad P \quad (2-11)
\end{aligned}$$

式中：BR 为无功补偿电容等效值。

以换流母线的额定电压作为电压基准值，以直流输电额定功率作为功率基准值，式 (2-10) 和式 (2-11) 简化为 14

$$\begin{aligned}
&R \\
&SCR1
\end{aligned}$$

$Z \quad (2-12)$

R R

R

$ESCR = SCR1B \quad B$

$Z \quad (2-13)$

图 2-1 所示的送端交流系统中，戴维南等值阻抗 $Z_R = R_R + j X_R$ 。计及高压网络中电抗一般远大于电阻，则有 $|Z_R| \approx X_R$ 。送端向直流线路传输的有功功率为

R R

R

R

$\sin E \quad U_P$

$X \quad (2-14)$

式中： θ 为 E_R 和 U_R 的相位差。

由式 (2-14) 可知送端功角特性曲线如图 2-3 所示。

图 2-3 送端功角特性曲线由图 2-3 可知，在曲线左半平面，即 $0 < \theta < 90^\circ$ ，有功功率与相位差变化成正比，系统处于稳定状态。例如系统初始运行点位于 a，负荷增大时，电流随之升高、

最终传输功率增加，送端交流电网能够提供给负荷需要的功率使得系统运行点由 a

过渡至 b，维持系统稳定。在曲线右半平面，即 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ，有功功率与相位差变化成反比，系统处于不稳定状态。例如系统初始运行点位于 c，负荷增大引起电流、功率增加，但送端交流电网输出功率反而进一步降低，使系统运行点由 c 过渡至 d，无法满足需要的功率平衡，最终可能造成意外甩负荷或电压崩溃等问题。

设 $E_R = U_R$ ，并计及 $|Z_R| \approx X_R$ ， $P_R \approx P_d$ ，将式 (2-10) 代入式 (2-11) 可得

$1SCR$

$\sin \quad (2-15)$

根据前文分析可知， $\theta = 90^\circ$ 时，直流输电系统处于极限运行状态。由式 (2-15) 15

计算得到，系统稳定的短路比临界值约为 1。进一步由式 (2-13) 可以得到临界有效短路比。短路比和有效短路比在一定程度上反映了交直流输电系统的稳定性，

因此可作为判断直流输电系统稳定性的重要指标。短路比或者有效短路比越大，

交流系统相对直流输电的强度越高，即发生扰动或故障时，直流输电对交流系统的影响越小，系统稳定性越好。在短路比或有效短路比不足的系统中，系统发生甩负荷故障或直流传输的功率中断时，换流站吸收的无功功率与之减少，而并联电容器或滤波器等无功补偿装置若不能及时切除，系统中存在的额外无功功率将会引起系统过电压，损坏设备。此外，短路比或有效短路比不足还易引起电压不稳定、谐波谐振、电压闪变和换相失败等问题。

实际系统应用中，根据短路比或有效短路比大小可以划分简要系统强度：

$SCR < 2$ 或 $ESCR < 1.5$ 为极弱系统； $2 < SCR < 3$ 或 $1.5 < ESCR < 2.5$ 为弱系统； $SCR > 3$

或 $ESCR > 2.5$ 为强系统。受端短路比的定义与应用与送端短路比类似。

2.4 本章小结本章主要介绍了直流输电系统的工作原理和进行短路比定义的推导，得到的主要结论如下：

1. 直流输电系统的结构，主要包括送端交流电网、整流站、逆变站和受端交流电网等。基于整流器和逆变器的基本结构和工作原理，推导了直流输电系统的数学模型，介绍了直流系统常用控制策略。

2. 分析了短路比指标与交直流电网稳定性之间的关系，结果表明直流输电系统的稳定性与短路比正相关，短路比低于临界值时，系统处于不稳定状态；短路比越大，直流输电对交流电网的影响越小，系统抗干扰能力越强，稳定性越好。 16

第 3 章无功补偿设备对直流暂态稳定提升作用分析

3.1 引言在直流工程大规模建设和新能源发电占比不断上升的情况下，电力系统“强直弱交”的特性愈发突出，而直流输电线路的电压稳定性与送/受两端的交流电网电压稳定性有着强耦合的联系，弱交流电网存在电压失稳隐患，会严重威胁与之相连的直流电网的安全运行能力，因此，无论提高混联交流系统的电网强度或者其电压调节能力，二者都能有效提高直流系统的暂态电压稳定性。

电力系统的电压稳定水平与系统中的无功功率储备水平有着密切联系，要保持电网具有足够的电压支撑能力，就要求直流送/受端交流电网中具有充足的无功电源，在大规模新能源机组接入电网的背景下，系统中具有优良的动态无功补偿能力的常规机组开机量逐步减少，这是造成当前电力系统电压调节能力不断下降的重要因素，因此，在交流电网中配置一定数量的无功补偿设备，既能有效增大送/受端交流电网的短路比，又能增强系统的无功调节能力，可以极大提升交直流混联系统的暂态电压稳定性。

电力系统中常见的无功补偿设备可以大致分为最简单常见的串联/并联补偿电容器、基于电力电子开关技术的静止无功补偿设备和基于同步电机原理的旋转无功补偿设备三类。作为电力系统中的重要组成元件，无功补偿设备的作用还包括：1. 保证系统中所有装置的端电压运行在可接受的限定值内，保证其运行的安全可靠；2. 保证最大程度传输有功功率；3. 确保线路损耗最小。

本章将对应无功补偿设备三种类别，分三部分进行相应的控制结构和补偿原理进行叙述。

3.2 基于串联/并联无功补偿电容器电容器在一定电位差下可以储存电荷，当电网中存在无功缺额时，电容通过释放这部分电荷释放用以补偿无功。电容串联补偿的主要作用是抵消输电线路中的电感参数，降低线路电抗以降低网损、提升线路的有功功率传输能力，因而串联无功补偿主要用于调节线路有功潮流。串联补偿也不能随意改变补偿度，因为其与电路上的电感存在 LC 振荡效应，若在扰动下激发次同步振荡，与线路连接的发电机产生暂态扭矩放大效应，引起次同步谐振，可能导致电机轴系扭坏。

并联补偿一般是调节母线电压的常用方法，按补偿对象可分为负荷补偿和系 17

统补偿两种，并联电容器一般又称为移相电容器，得益于电容器装设方便、易于调试和安装费用低、补偿效果立竿见影

，因此常作为各变电站母线的配套用静态无功补偿设备，例如整流站和逆变站就地补偿的并联滤波器。具有投切能力的并联电容器如图 3-1 所示。

图 3-1 可投切并联电容器接入系统示意图并联电容器提供的无功功率与补偿节点的电压 U 幅值平方成正比，即：
$$\frac{C}{C} = \frac{UQ}{X} \quad (3-1)$$

由式（3-1）可知，并联电容提供的无功功率受当前节点电压影响非常大，当系统处于低电压状态时，表现为无功功率缺失状态，而由于节点电压降低，并联电容提供的无功功率反而少于正常运行时提供的无功，结果将导致电网电压进一步降低；而当系统处于过电压状态，例如直流换相失败或者闭锁时，送端电网会一段时间处于过电压状态，表现为无功功率过剩状态，此时由于节点电压过高，并联电容提供的无功功率会多余正常运行时提供的无功，结果将导致电网电压进一步升高，这种无功反调的效果不利于系统暂态电压稳定性，因而并联电容无功补偿的方法一般作为正常运行工况下系统的静态无功补偿手段。

3.3 基于电力电子技术的动态无功补偿设备

3.3.1 静止无功补偿器 SVC

SVC 不含旋转元件，由晶闸管、电容器和电抗器组成，其控制原理框图如图 3-2 所示。

图 3-2 SVC 的控制系统原理框图SVC 属于无源元件，目前市面上应用较多的 SVC 主要分为磁阀式可控电抗器型 SVC(以下简称 MCR 型 SVC)、相控电抗器型 SVC(以下简称 TCR 型 SVC)，二者核心元件都是晶闸管控制的电抗器。由于 SVC 是基于电力电子技术的控制元件，

具备响应迅速的优势，因而从动作速度上讲具备快速动态无功响应能力，而 SVC

含可控的电感和电容元件，能够吸收或是释放无功功率，可以通过投切电容和调节电抗实现在允许范围内平滑连续的无功调节。SVC 的核心元件为晶闸管，属于半控器件，在响应过程中存在滞后的缺点，因此动态调节速度受限，并且在运作过程中还会产生较多的谐波，因此常需要配置滤波器改善波形质量，但也增加了额外投资。除此以外，当 SVC 释放无功到一定程度以后，其工作原理与并联电容无功补偿没有实质性差别，因此其也存在无功调节受节点电压影响较大的缺点。

表3-1对 MCR 型SVC 与 TCR 型 SVC 的技术特点和经济性进行了多方面比较：

表 3-1 不同 SVC 技术比较表比较项目 MCR 型 SVC TCR 型 SVC

投资较小较大可靠性免维护维护量大谐波水平比 TCR 小约 50% 含较多 5 次、7 次谐波有功损耗约为 0.3%-0.4% 约为 0.5%-0.8%

响应时长约 200ms 20ms-40ms

3.3.2 静止同步补偿器 STATCOM

伴随着电力电子技术的不断发展，诸如 GTO、IGBT 等大功率全控型电力电子器件逐步问世，基于电压源换流器型的无功补偿设备 STATCOM 就是采用这些全

控器件的无功补偿设备，其控制原理图如图 3-3 所示。

图 3-3 STATCOM 的控制系统原理框图STATCOM 与 SVC 类似，主要由大功率可关断电力电子器件、电抗器和电容器构成，但是由于核心器件的全控特性，STATCOM 相当于一个可控的动态无功电源，调节灵活，响应迅速，可以跟随负荷无功电流变化自动控制自身无功电流输出，实现自动式的、低延时的无功响应，因而具备比 SVC 更好的动态无功补偿能力，并且 STATCOM 的变流器采用数字控制技术，产生的装置电流不会受到配

电网电压变化的影响，具有无功补偿可靠性高的特点。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 直流系统之间的稳定问题在很大程度上取决于交流系统相对于直流直流系统输电容量的强弱程度，即短路比。
2. 发生扰动或故障时，定电流控制能够限制暂态电流的上升，保护晶闸管及其他设备的运行安全。
3. 换流站吸收的无功功率与之减少，而并联电容器或滤波器等无功补偿装置若不能及时切除，
4. 提高混联交流系统的电网强度或者其电压调节能力，二者都能有效提高直流系统的暂态电压稳定性。电力系统的电压稳定水平与系统

3. 025_第3部分	总字数：10492
相似文献列表	
去除本人文献复制比：1.5%(159)	文字复制比：1.5%(159)
疑似剽窃观点：(0)	
1 046	1.3% (132)
- 《学术论文联合比对库》- 2019-12-23	是否引证：否
2 J2019265652_林安妮_超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究	1.1% (117)
林安妮 - 《学术论文联合比对库》- 2019-12-08	是否引证：否

$$\begin{aligned} & A \quad d \quad d \quad d \\ & , \quad d \quad d \\ & q \quad , \\ & d' \\ & d0 \\ & d \quad 1+ \\ & K \quad X \quad X \quad XU \\ & X \quad XE \\ & XT \quad s \\ & X \quad () \quad (3-8) \end{aligned}$$

式中 s 为拉普拉斯算子。

则联立式 (3-8) 与式 (3-6) 可得：

$$\begin{aligned} & A \quad , \\ & d \quad d \\ & d \quad , \\ & dd' \\ & d0 \\ & d \quad 11 = 1+ \\ & KU \\ & UX \quad XI \\ & XXT \quad s \\ & X \quad () \quad (3-9) \end{aligned}$$

同步调相机在暂态和次暂态下的优秀无功补偿能力，可以大大提高所配置地区的动态无功补偿能力。

3.5 本章小结本章详细介绍了交流电网中常见的无功补偿装置的结构特点和无功补偿原理，

并对各自存在的缺点进行了总结。比较结果表明：

(1) 采用串/并联电容进行无功补偿方法最为简单，但由于不能发出感性无功，且无功补偿能力受到节点电压的强限制作用，因而其补偿能力局限性很大，适合用于静态电压稳定方面的无功补偿。

(2) 采用基于电力电子器件的 SVC 和 STATCOM 具有良好的动态无功补偿能力，并且可以调节发出感性/容性无功，无功调节范围很广，但补偿效果仍然受到节点电压的影响。

(3) 采用基于同步电机元件的无功补偿设备，例如同步调相机，其无功响应可分为两个阶段，分别是基于电磁耦合现象响应的次暂态阶段和基于励磁调节作用的暂态阶段；次暂态特性下的调相机无功响应具有无延时的效果，而暂态特性下强励作用的调相机能为电网提供大量的无功功率，具有优良的无功补偿效果。 22

第 4 章 直流输电系统电压稳定性仿真研究

4.1 引言本章针对前述理论分析，建立了 LCC-HVDC 的直流输电仿真模型，用于分

析直流输电系统电压稳定性。首先分析了 LCC 拓扑结构及工作原理，然后在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了相应的仿真模型，分别仿真验证了不同故障情况、不同短路比条件以及不同无功补偿装置对直流系统电压稳定性的影响情况。

本文选用 PSCAD 作为仿真平台的目的在于：该软件为目前电力系统电磁暂态仿真分析的主流软件，可实现系统的动态建模，模拟电力系统暂态运行情况。该软

件中含有 IEEE、CIGRE 等多个标准系统，增加了仿真分析的准确性。此外，

PSCAD 软件中包含有完整的系统模型库与可视化界面，因此只需简单直观的鼠标操作便可构建复杂的系统。

4.2 LCC-HVDC 拓扑结构及工作原理

4.2.1 LCC-HVDC 拓扑结构 LCC 为传统直流输电中常采用的换流器类型，其特点是采用半控型器件晶闸管作为换流器件，从而实现换流站电能形式在交流与直流之间的变换。其造价低、控制方式简单的特点使得在输电系统中大规模使用。常规的直流输电系统采用双极 12 脉动整流器，即在原来的 6 脉动输入端再增加一组 6 脉动换流器，构成 12 脉动桥。对应的拓扑结构如图 4-1 所示。

图 4-1 LCC 型换流站拓扑结构如图 4-1 所示，换流站的输入为送端交流系统。而换流站内部由无功补偿装置、换流变压器、LCC 整流器以及平波电抗器组成。各设备作用介绍如下：

(1) 无功补偿装置：换流站中存在大量半控型电力电子装置，需要脉冲触 23

发信号实现导通。当触发角增加时，其电压与电流的相位差会增加，导致功率因数降低，无功需求增加。另一方面，换流站地区电网结构薄弱，电压控制困难，

若出现电网故障，易造成直流闭锁，有功缺额增大，进一步加剧电网故障。因此需要在换流站中增设无功补偿装置。而无功补偿装置一般由电容器、静止无功发生器、调相机等补偿单元组成。

(2) 换流变压器：换流变压器为换流站中最重要的部分之一。12 脉动桥中采用 2 个接线方式不同的换流变压器，一个采用 Y-Y 型接线，另一个采用 Y- Δ

型接线。其目的在于得到两个相位差为 30° 的 6 脉动电路，从而实现叠加。换流变压器的一次侧与送端交流母线连接，二次侧与 LCC 换流器交流侧连接，可实现输送电能、电压变换、抑制故障以及保护电路的作用。

(3) LCC 整流器：LCC 整流电路的核心器件为晶闸管，由于本质为半控型器件，因此导通需要触发信号，关断需要外部电路。常用的电路拓扑结构有 6

脉动桥和 12 脉动桥，其中 6 脉动桥采用 6 个晶闸管构成三相桥式电路结构。每个晶闸管由各自的触发信号独立控制，依次实现各个晶闸管的导通与关断，从而完成电压整流过程。而 12 脉动桥则是在 6 脉动电路的基础上再叠加一个 6 脉动电路，此种拓扑结构可以消除低次谐波分量，只剩下高次谐波进入直流端，而高次谐波分量可经平波电抗器及滤波电容滤除

，因此直流输电系统 LCC 整流器多采用 12 脉动电路结构。

(4) 平波电抗器：由于换流站采用多脉动整流电路，因此输出波形中含有大量谐波分量。采用平波电抗器可以抑制电路波纹，消除谐波分量。此外平波电抗器还具有限流及电气隔离的作用，可在一定程度上保护电路。

4.2.2 LCC 工作原理及数学模型图 4-2 12 脉动桥电路结构如图 4-2 所示，12 脉动电路由两个 6 脉动桥串联组成，通过 12 个不同的触发信号实现晶闸管的依次导通，依靠相间短路使晶闸管承受反向电压实现关断换 24

相。其中换流桥 I 中 11、13、15 阴极相互连接，称为共阴极组；14、16、12 阳极相互连接，称为共阳极组。相应的，换流桥 II 中 21、23、25 为共阴极组；24、

26、22 为共阳极组。由于两个换流变压器的接线方式不同，导致上、下两个换流桥对应的脉冲信号相差 30°，因此相邻两个晶闸管的导通角依次相差 30°，即在一个周期内会产生 12 次脉动。晶闸管导通的顺序依次为 11-21-22-21-13-23-14-24-15-25-16-26。根据上述工作原理，12 脉动 LCC 整流器的直流侧输出电压平均值可表示为：

$$U_{d1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \cos \gamma \quad (4-1)$$

式中， U_2 为换流侧空载线电压有效值； α 为晶闸管触发控制角； X_L 为换相电抗； I_d 直流侧电流。

换相角 γ 可表示为：

$$\cos \gamma = \cos \alpha - \frac{X_L I_d}{U_2} \quad (4-2)$$

换流器输出的有功功率可表示为：

$$P_d = U_{dc} I_d \quad (4-3)$$

式中， U_{dc} 为换流器直流侧电压。

4.3 LCC-HVDC 仿真模型搭建及参数选取

根据 LCC-HVDC 拓扑结构以及工作原理，本文在 PSCAD 中搭建了 LCC-HVDC 的仿真模型。该模型参考 CIGRE 实例，可用于分析传统高压直流输电系统的控制稳定性与故障响应特性。该模型为单极 HVDC 系统，设定该仿真结构中直流侧电压为 500kV，额定传输容量为 800MW。其中输电线路采用集中参数表示，线路电容采用集中电容并位于输电线路中央，构成 T 型等值电路，

该线路模拟了电感较小而电容较大的运行情况。其主电路模型如图 4-3 所示。

图 4-3 LCC-HVDC 仿真模型主电路仿真电路中，两侧电源均采用单机无穷大电源模拟。其中送端系统额定电压 25

设置为 330kV，阻抗结构设置为 R-R-L 型结构。根据阻抗数据计算可知，送端系统基波阻抗为 $47.655 \angle 84.25^\circ \Omega$ ，由此可知送端系统短路比 SCR 为 2.8，为一较强系统；而受端系统额定电压设置为 230kV，阻抗结构设置为 R-L-L 型结构。因此受端系统基波阻抗为 $21.2 \angle 75^\circ \Omega$ ，由此可知受端系统短路比 SCR 也为 3.1，因

此受端系统也为一较强系统。

LCC-HVDC 整流站与逆变站电路均采用双桥串联结构，构成 12 脉动环流桥。

由于输电系统直流侧额定电压为 500kV，因此整流站二次侧额定电压 V_{dr} 也设定为 500kV。根据换流器电压变换关系可得：

$$V_{dr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{r2} \cos \alpha \quad (4-4)$$

式中，直流侧电压 $V_{dr}=500\text{kV}$ ， α 为 0° ，换相电抗 X_C 为 0.18pu， X_R 为 0.01pu，由此计算可得换流器交流侧电压 V_{r2} 为 213.85kV，即为变压器二次侧电压额定值。

而变压器二次侧额定电流为：

$$I_{r2} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{r2}} \quad (4-5)$$

式中， I_{dr} 为换流器直流侧额定电流，由于输电系统额定容量为 800MW，额定电压为 500kV，因此可计算得到 I_{dr} 为 1600A，进而确定变压器二次侧额定电流为

1306A。因此整流侧变压器额定容量为：

$$S_r = \sqrt{3} I_{r2} V_{r2} \quad (4-6)$$

而逆变站换流器交流侧额定电压一般为整流站交流侧额定电压的 0.95-0.98

倍，本文选取 0.98，即 $V_{i2}=209.6\text{kV}$ ，由此可确定逆变侧变压器额定容量为：

$$S_i = \sqrt{3} I_{i2} V_{i2} \quad (4-7)$$

综上，LCC-HVDC 高压直流输电系统参数如表 4-1 所示。

表 4-1 LCC-HVDC 高压直流输电系统主电路参数名称 参数数值 单位 输电系统 输电系统额定容量 800 MW

额定电压（直流）

500 kV

额定电流（直流）

1600 A

送端系统额定电压 330 kV

基波阻抗 $47.655 \angle 84.25^\circ$

Ω 变压器容量 483.74 MVA

变压器变比 330/213.85 26

受端系统额定电压 230 kV

基波阻抗 $21.2 \angle 75^\circ$ Ω 变压器容量 472.77 MVA

变压器变比 209.6/230

4.4 仿真验证

4.4.1 受端系统故障仿真

a) 不同故障类型为验证上述仿真模型的有效性以及受端系统暂态稳定性，本文对比了不同故障类型下，受端系统电压稳定性。主要考虑单相接地短路、两相短路、三相短路三种典型故障工况。

单相接地短路：在仿真中设置受端系统交流侧母线在 3s 时发生 A 相短路接地故障，持续时间为 0.05s。故障及恢复期间，各电气量波形如图 4-4~4-7 所示。

图 4-4 受端交流侧母线电压有效值图 4-5 直流侧母线电流图 4-4、图 4-5 分别为受端交流侧母线电压、电流波形图。当受端交流系统发生单相接地短路故障后，交流侧电压将瞬时降低，最低点电压有效值为 0.6pu

左右，并出现短时振荡现象，如图 4-4 中红色虚线框内所示。交流侧母线电压的跌落将导致直流侧电压也瞬间跌落，而由于直流线路输送有功功率 P 在故障瞬 27

间并未降低，因此直流侧电流分量将瞬间增大，大约为稳态时的 2.5 倍，如图 4-5

中红线所示。而直流侧电流的突增会触发低压限流环节动作，降低直流电流指令，

抑制直流电流的进一步升高，如图 4-5 中黑色线所示。因此直流侧电流在一个周期的突增后会跟随指令电流，降低幅值。

图 4-6 逆变侧关断角 γ 图 4-7 受端系统功率波形图 4-6 为逆变侧换流器关断角 γ 波形。关断角 γ 、触发角 α 、换相角 μ 的关系如公式 (4-8) 所示。 ++ (4-8)

如图 4-6 所示，在故障持续的 0.05s 以及恢复后的 0.05s 内，关断角 γ 均出现

0° 的情况，说明逆变站发生了多次连续换相失败，导致受端出现短时间有功功率

缺额状态，如图 4-7 受端系统有功功率波形所示。由于逆变侧换流站存在负电压系数，即当直流侧母线电压跌落后，换流站将向电网吸收无功功率，从而会导致电压的进一步跌落。因此在没有无功补偿装置的情况下，受端系统暂态电压稳定性较低。

两相短路：仿真中设置受端系统交流侧母线在 5s 时发生 A-B 两相短路故障，

持续时间为 0.05s。故障及恢复期间，各电气量波形如图 4-8~4-11 所示。 28

图 4-8 受端交流侧母线电压有效值图 4-9 直流侧母线电流图 4-8 与图 4-9 分别为受端交流侧母线电压有效值及直流侧母线电流波形。

由于发生相间短路，故障期间 A、B 两相电压均降低，因此交流侧电压跌落程度加剧，导致直流侧电压跌落也加剧。由于相间短路瞬间直流功率 P 并未突变，因此直流侧电流突增，但相比与单相接地故障，电流突增程度更高，大约为稳态时的 2.6 倍。

图 4-10 逆变侧关断角 γ 29

图 4-11 受端系统功率波形图 4-10 为逆变侧关断角 γ 波形，由于相间短路故障程度比单相接地短路故障更深，因此关断角突变程度更高。图 4-11 为受端系统传输功率波形，其中无功功率波形相对于单相短路时变化幅度更小，其原因在于直流系统换流站吸收的无功与电压呈正比，电压的大幅度降低导致吸收的无功也相应降低。

三相接地短路：仿真中设置受端系统交流侧母线在 5s 时发生三相短路故障，

持续时间为 0.05s。故障及恢复期间，各电气量波形如图 4-12~4-15 所示。

图 4-12 受端交流侧母线电压有效值图 4-13 直流侧母线电流 30

图 4-14 逆变侧关断角 γ 图 4-15 受端系统功率波形图 4-12 受端交流侧母线电压可知，三相短路的故障程度最深，故障瞬间交流侧电压跌落至 0.05pu 左右，相应的直流侧电流突增至 2.6 倍。图 4-15 为受端功率波形，由于电压跌落程度更深，因此换流站吸收的无功功率也相应减少，

系统稳定运行情况更为恶劣，大约在 5.4s 左右才恢复至稳定状态。

综合三种不同的电网故障类型，三相短路时的故障程度更为剧烈。其逆变站交流侧母线电压跌落程度更深，直流侧电流突增程度更高，有功恢复时间更长，

因此三相短路时的电压稳定性最差。

b) 不同电网强度由前述章节的理论分析可知，短路比是衡量一个系统静态电压稳定性的指标。

不同短路比 (SCR) 下，受端系统的暂态稳定性情况也不同。因此本文分别对比了受端电网强度在 SCR=3、2.5、2 三种条件下，直流侧电流波形以及有功功率、

无功功率的变化情况。 31

图 4-16 不同 SCR 下直流侧电流波形图 4-17 不同 SCR 下直流侧功率图 4-16 与图 4-17 分别为不同 SCR 下直流侧电流与功率波形。在不同电网强

度下，受端系统的暂态稳定性也有所不同。当电网强度 SCR=3 时，受端系统为

一个较强系统，此时交流侧母线发生短路故障，直流侧电流变化幅值相对较小，

直流侧输送功率恢复较快。而在电网强度 SCR=2 时，受端系统较弱，故障时直流侧电流峰值高达稳态时的 2.7 倍，且直

流侧功率的恢复时间较慢，暂态稳定性
相对较差。

c) 不同无功补偿装置根据前述理论分析，不同无功补偿装置对直流输电系统的稳定支撑能力不同。

本文通过仿真对比了 SVC、STATCOM、同步调相机三种典型的无功补偿装置在不同故障情况下对系统暂态稳定性的影响。主要考虑两种典型故障工况：

1) 直流换相失败。受端交流母线在 8s 时发生三相短路，并持续 0.1s，故障期间系统发生直流换相失败。

2) 直流双极闭锁。直流系统在 8s 时发生双极闭锁故障，持续 3s 后，切除两端交流滤波器。 32

图 4-18 直流换相失败下的送端交流母线电压图 4-19 直流闭锁下送端交流母线电压图 4-18 为直流换相失败下的送端交流母线电压。直流系统发生换相失败时，

交流侧母线电压有效值先降低后升高。在未加无功补偿装置的情况下，暂态过电压为 1.2pu。在配置 SVC 情况下，暂态电压峰值降低为 1.17pu，其次为 STATCOM，

次之为同步调相机。因此，同步调相机作为有源装置，抑制能力最强，且动作时间较快，能够使得电压快速恢复。

图 4-19 为直流闭锁下的送端交流母线电压。当直流发生闭锁故障时，送端交流母线电压迅速升高。在并联同步调相机运行情况下，暂态电压峰值较低，仅为

1.05pu，其次为 STATCOM，次之为 SVC。在故障切除后，同步调相机能将电压恢复至故障前的稳定水平，而后二种无功补偿装置的电压水平仍高于故障前电压。

因此在两种典型故障工况下，同步调相机更有利于提高系统暂态稳定性。

4.4.2 送端系统故障仿真

a) 不同故障类型同 4.3.1 节仿真所示，本节对比了不同故障类型下，送端系统的电压稳定性。 33

图 4-20 送端交流侧母线电压有效值图 4-21 送端直流输送有功功率图 4-22 换流站吸收无功功率 34

图 4-23 逆变侧关断角 γ 图 4-20 为送端交流侧母线电压有效值，当送端系统发生三相短路时，电压跌落程度最高，为 0.05pu。图 4-21 为送端直流输送有功功率，对比三种不同故障类型，三相短路时有功缺额程度最高，但稳态恢复时间基本接近。图 4-22 为换流站吸收无功功率，由于三相短路电压跌落程度最高，因此换流站需要吸收的无功功率也增多。图 4-23 为三种故障工况下的逆变侧关断角 γ 波形，其中单相短路时发生了 0.05s 换向失败，两相短路发生了两次持续 0.05s 的换向失败，三相短路也发生了 0.05s 换向失败，且失败时间比前两者更晚。再与 4.3.1 节受端故障对比分析可知，送端系统的电压稳定性明显低于受端系统，故障持续时间更长，

恢复时间更久。

b) 不同电网强度图 4-24 送端交流侧母线电压有效值 35

图 4-25 送端直流输送有功功率图 4-24、4-25 分别为不同电网强度下交流侧电压与功率波形。在不同电网强度下，送端系统的暂态稳定性也有所不同。在发生单相接地短路故障后，当电网强度 SCR=3 时，送端系统为一个较强系统，此时交流侧母线电压变化幅值为

0.72pu，且直流侧输送功率在 5.15s 时恢复稳定。而当电网强度 SCR=2 时，系统属于弱电网条件，故障时交流侧母线电压降低为 0.67pu，直流侧功率的恢复时间较慢，大约至 5.5s 时才恢复稳定，且故障后功率发生了二次跌落。因此在弱电网条件下直流输电系统暂态稳定性相对较差。

4.5 本章小结本章在 PSCAD 中建立了 LCC-HVDC 的直流输电仿真模型，分析了不同故障类型、不同电网强度以及不同无功补偿装置对系统电压稳定性的影响，得出如下结论：

(1) 在三种典型故障工况下，三相短路故障程度最深，稳态恢复时间更长，对应的暂态电压稳定性更差。

(2) 电网强度对系统稳定的影响较大，当系统处于弱电网条件下时，故障引起的直流侧电流突增程度更高，交流侧母线电压降落幅度更高，有功传输功率稳定恢复时间更长，且易发生二次跌落，系统电压稳定性较差

(3) 不同无功补偿装置对输电系统电压稳定性的影响情况也不同，对比调相机、SVC、STATCOM 三种典型的无功补偿装置可知，调相机的无功补偿能力更强，暂态过电压抑制能力更好。 36

第 5 章结论与展望

5.1 归纳与结论研究了直流输电系统的暂态电压稳定性及提升方面，对于直流输电工程的运行规划与建设、设定直流输电暂态稳定性指标体系以及指导送/受端交流电网的无功补偿设备的配置方法具有重要的指导意义。随着送端电网新能源占比不断提升和受端系统无功支撑能力的不断下滑，电网“强直弱交”的特征愈发明显，直流输电线路暂态电压稳定问题日益突出，在此大背景下，研究了直流输电系统数学模型，并采用 PSCAD 软件搭建仿真模型进行多种故障工况下的稳定性分析，

主要工作和取得的成果如下：

1. 研究了整流器和逆变器的基本结构和工作原理，并推导了直流输电系统的数学模型，介绍了直流系统常用控制策略；研究了交流电网强度对于直流输电系统电压稳定性的提升作用，分析了短路比指标与交直流电网稳定性之间的关系，并根据短路比或有效短路比大小可以划分交流系统强度，可以用于判断交直流混联系统的暂态稳定性强弱。

2. 研究了各个无功补偿设备的工作原理和控制结构，并从理论上分析了不同无功补偿设备的工作适用场合，得出 SVC、STATCOM 和调相机都适用于提升交直流混联系统的动态无功补偿能力的结论；推导了调相机的次暂态和暂态工况下的无功响应方程，得出了调相机具备优良的电压调节能力的结论。

3. 在 PSCAD 中建立了 LCC-HVDC 的直流输电仿真模型，仿真比较了多种故障工况下的直流系统暂态电压稳定能力，得出在三相短路故障下送/受端电网均为故障情况最为严重的结论；仿真对比了交流系统不同短路比情况下的暂态稳定能力，结果表明当交流电网强度越弱时，故障引起的直流侧电流突增程度更高，

交流侧母线电压降落幅度更高，有功传输功率稳定恢复时间更长，且易发生二次跌落，故障系统的暂态电压稳定性越差；研究了三种动态无功补偿装置对暂态电压稳定性的调节效果调相机的结果表明调相机无功补偿能力更强，暂态过电压抑制能

力更好。

5.2 不足与展望本文虽然取得了一些研究成果,但是仍有许多需要深入研究的工作:

1. 研究中只涉及单条高压直流输电系统送/受端交流系统强度的短路比指标,

对于直流多馈入/送出输电系统,以及目前较为热门的柔性直流输电系统的短路比评价指标还需要进行研究和推导。 37

2. 各无功补偿设备在提升电网无功补偿能力的同时,也改变电网的潮流分步和拓扑结构,本文研究时忽略了送/受端交流系统配置无功补偿设备时的短路比提升作用,同时直流母线可能存在的短路电流超标的问题,这些问题在进一步研究时都需要进行详细考虑。

3. 考虑提升直流输电系统暂态电压稳定性时,分析方法只停留在设备层面,

接下来研究时还需要考虑协调控制的作用。 38

参考文献

- [1] Dudley B. BP statistical review of world energy[J]. BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug, 2019, 6: 2019.
- [2] 王海洋, 荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. 中国电力, 2021, 54(06): 86-94.
- [3] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(06): 1843-1856.
- [4] Murdock H E, Gibb D, André T, et al. Renewables 2019 Global Status Report[J]. 2019.
- [5] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(09): 124-129.
- [6] 孙昕, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45.
- [7] 韩先才, 孙昕, 陈海波, 等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386+4719.
- [8] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(05): 1460-1475.
- [9] 张振宇, 王文倬, 王智伟, 等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 174-180.
- [10] Milano F, D'Amfiorio F, Hug G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems[C]//2018 Power Systems Computation Conference(PSCC). Ireland: IEEE, 2018: 1-25.
- [11] Spahic E, Varma D, Beck G, et al. Impact of reduced system inertia on stable power system operation and an overview of possible solutions[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [12] Z. Xie, X. Zhang, X. Zhang, et al. Improved ride through control of DFIG during grid voltage swell[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics[J], 2015, 62(06): 3584 - 3594.
- [13] Gu Y, Huang Y, Wu Q, et al. Isolation and protection of the motor-generator pair system for fault ride-through of renewable energy generation systems[J]. IEEE Access, 2020, PP(99):1-1.
- [14] 郑海涛, 郑昕, 吴兴全, 等. 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 149-154. 39
- [15] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50-55.
- [16] 汤奕, 朱亮亮, 陈斌, 等. 特高压直流分层接入受端系统电压稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(09): 35-41.
- [17] Danish M S S. Voltage Stability in Electric Power System: A Practical Introduction[M]. Logos Verlag Berlin GmbH, 2015.
- [18] Muir A, Lopatto J. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[J]. 2004.
- [19] Ohno T, Imai S. The 1987 tokyo blackout[C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2006: 314-318.
- [20] Haes Alhelou H, Hamedani-Golshan M E, Njenda T C, et al. A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges[J]. Energies, 2019, 12(4): 682.
- [21] IEEE Committee Report: Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience. IEEE/PES 93TH0358-2-PWR, 1990.
- [22] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL 755-2001 电力系统安全稳定导则. 北京: 中国电力出版社, 2001: 1.
- [23] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [24] 电力系统安全稳定导则. GB38755—2019. 2019.
- [25] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1994.
- [26] 林安妮, 黄永章, 林伟芳, 等. 不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(04): 116-122.

- [27]李普明, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电交流滤波器参数的计算[J]. 中国电机工程学报, 2008(16): 115-121.
- [28]周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低多馈入直流换相失败风险的动态无功补偿配置方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3258-3265.
- [29]张一荻, 苏悦平, 管霖. 同步和异步联网系统直流受端电网电压支撑能力评估[J]. 电网技术, 2012, 36(01): 90-95.
- [30]撤奥洋, 张滨, 孙忠良, 等. 受端行为对直流输电系统的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 35-41.
- [31]程艳, 张健, 管夷, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(04): 241-245.
- [32]FRANKE M, BHADRA N, BHADRA N, et al. Direct current contamination of kilohertz frequency alternating current waveforms[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2014, 232.
- [33]毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(09): 2745-2756.
- [34]张艳萍. 受端系统小扰动电压稳定问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学博士论文, 2008.
- [35]刘益青, 陈超英, 梁磊, 等. 电力系统电压稳定性的动态分析方法综述[J]. 电力系统自动化学报, 2003, 15(1): 105-108.
- [36]Bhargava B. Synchronized phasor measurement system project at Southern California Edison Co[C]//Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE. IEEE, 1999, 1: 16-22.
- [37]T. J. Overbye, M. A. Pai and P. W. Sauer. Some Aspects of the Energy Function Approach to Angle and Voltage Stability Analysis in Power Systems. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control, 1992: 2941-2946.
- [38]汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008(12): 30-34.
- [39]李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999(04): 27-31.
- [40]Ajjarapu V. Computational techniques for voltage stability assessment and control[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [41]Venikov VA, Stroeve VA, Idelchick VI, et al. Estimation of electrical power system steady-state stability in load flow calculations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(3): 1034-1041.
- [42]冯治鸿, 刘取, 倪以信, 等. 多机电力系统电压静态稳定性分析——奇异值分解法[J]. 中国电机工程学报, 1992(03): 12-21.
- [43]李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003(04): 5-8+24.
- [44]王林川, 于奉振, 孙继莆, 等. 基于奇异值分解和内点法的交直流电力系统电压稳定裕度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 89-92.
- [45]Shuaihu Li, Yi Tan, Canbing Li, et al. A fast sensitivity-based preventive control selection method for online voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4189-4196.
- [46]姜涛, 李筱婧, 李国庆, 等. 基于广域量测信息的负荷裕度灵敏度计算新方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 102-113.
- [47]Wang Yunfei, Pordanjani I, Li Weixing, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(6): 2154-2163.
- [48]崔馨慧, 负志皓, 刘道伟, 等. 大电网静态电压稳定在线防控灵敏度分析新方法[J]. 电网技术, 2020, 44(01): 245-254.
- [49]申森, 安俊俊, 苗栋, 等. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析与研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(18): 22-26+56.
- [50]周建方, 何禹清, 何红斌, 等. 基于线路电压稳定指标的连续潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(08): 140-144+150.
- [51]LI S H, CHIANG H D. Nonlinear predictors and hybrid corrector for fast continuation power flow[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 2(3): 341-354.
- [52]陈刚, 包严, 赵晋泉, 等. 考虑负荷增长随机性的大电网电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 37-44.
- [53]谢应昭, 卢继平. 基于多项式正态变换和最大熵估计的含风电系统电压稳定概率分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 66-73.
- [54]Taylor C W. Power system voltage stability[M]. McGraw-Hill, 1994. Franken B., Andersson G. Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 235-242.
- [55]Krishayya P. C. S., Adapa R., Holm M., et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities. Part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. Paris, France: CIGRE, 1997.

[56]徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[57]林伟芳, 易俊, 汤涌, 等. 分层直流短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6627-6635+6775.

[58]刘昇, 徐政. 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(01): 133-144.

[59]常辉, 刘文颖, 行舟, 等. 电力系统暂态稳定计算的在线应用[J]. 电网技术, 2007(13): 54-58+74.

[60]Ishigame A, Taniguchi T. Transient stability analysis for power system using Lyapunov function with load characteristics[C]//IEEE Power Engineering Society 2003 General Meeting. New Jersey: IEEE Press, 2003: 13-17.

[61]汪小明, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于能量函数法的电网暂态稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(08): 114-118. 42

[62]万秋兰, 单渊达. 对应用暂态能量函数法分析电力系统暂态稳定性的评价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 57-59.

[63]杨黎晖, 马西奎. 基于分岔理论的含双馈风电机组的电力系统电压稳定性分析[J]. 电工技术学报. 2012(09): 1-8.

[64]含风电电力系统电压稳定问题的分岔[J]. 电力系统及其自动化学报. 2008(05): 117-123.

[65]Yoshihiko Kataoka, Yukio Shinoda. Voltage stability limit of electric power system with generator reactive power constraints considered[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2005, 20(2):951-962.

[66]Ye Ruisong. A new approach for the computation of Hopf bifurcation points[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(11): 1300-1307.

[67]黄伟, 熊伟鹏, 李志鹏, 等. 分布式电源对配电网暂态电压特性影响分析[J]. 现代电力. 2017(02): 1-7.

[68]卢锦玲, 石少通, 徐超, 等. 含大型风电场系统暂态电压稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版). 2014(01): 45-52.

[69]胡扬宇, 吕天光, 褚双伟, 等. 基于准稳态仿真的电压稳定轨迹灵敏度分析方法[J]. 电网技术, 2012, 36(06): 157-162.

[70]郑超, 李惠玲, 张鑫, 等. 特高压直流分层馈入系统大扰动层间耦合特性及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(09): 2670-2681.

[71]秦国栋, 龚仁喜, 周希松, 等. 模糊控制器在并联电容无功补偿中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(03): 3-5+9.

[72]姬煜轲, 李春华, 赵晓斌, 等. 一种改进的 STATCOM 暂态无功控制策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(05): 50-57.

[73]孙昕炜, 史华勃, 倪江, 等. 弱联系电网中 SVC 引起的次同步振荡分析及其抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 171-178.

[74]张超, 卢新良, 孙心洲. 应用 SVC 提高双馈感应发电机并网的风电场暂态电压稳定性[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 153-159.

[75]李志强, 种芝艺, 黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6877-6885+7101. 43

攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 同步调相机。因此，同步调相机作为有源装置，抑制能力最强，且动作时间较快，能够使得电压快速恢复。
2. 调相机无功补偿能力更强，暂态过电压抑制能力更好。
5.2 不足与展望本文虽然取得了一些研究成果，但是仍有许多需要深入研究的工作：
1. 研究

说明：1. 总文字复制比：被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比：去除作者本人文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例


4. 单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比


5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的


6. 红色文字表示文字复制部分；绿色文字表示引用部分；棕灰色文字表示作者本人文献部分

7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 amlc@cnki.net

 <http://check.cnki.net/>

 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>

研究生学位论文 (TMLC)