

华北电力大学

硕士学位论文

直流配电网中多换流器的电压协同 控制策略研究

Research on Voltage Coordination Control Strategy
of Multi-Converter for DC Distribution Network

刘永庆

2017年3月

国内图书分类号：TM721.1

学校代码：10079

国际图书分类号：621.3

密级：公开

硕士学位论文

直流配电网中多换流器的电压协同 控制策略研究

国家高技术研究发展计划课题（2015AA050101）资助

硕士研究生：刘永庆

导师：李庚银教授

申请学位：工学硕士

学科：电气工程

专业：电力系统及其自动化

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2017年3月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM721.1

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on Voltage Coordination Control Strategy
of Multi-Converter for DC Distribution Network**

Candidate:	Liu Yongqing
Supervisor:	Prof. Li Gengyin
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Power System and Its Automation
School:	School of Electrical & Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2017
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

由于直流配电网系统在效率、可靠性和供电能力等方面优于交流系统，能较好地吸纳分布式能源，具有巨大的市场潜力和经济价值，因此，其得到了越来越多的关注，相关的研究和实践也逐步展开。控制是直流配电系统的关键，需要设计有效且可靠的直流电压控制器，并研究换流站之间的协调控制，以确保其在各种工作条件下的功率平衡和电压稳定。

本文使用的是直流配网的分层控制体系。首先，介绍换流器控制层，对直流配电网的各单元进行了建模及相关分析，主要包括光伏和储能单元的建模和控制以及相关换流器的控制。

本文研究了直流电压偏差和下垂控制，并提出混合控制，验证了其有效性。然后，在多端柔性直流配电系统中，对本文所涉及的几种基本控制方式和混合控制方式进行了仿真和数据分析，得出了相关结论。然后，提出了用于底层控制的多换流器的电压协同控制策略。该控制策略通过控制模式切换的指令值 S 来切换各个换流站的控制方式，从而保证直流配电网在各个工况下的功率平衡和直流电压稳定。其中，各个换流站不需要进行通信，相互之间保持独立，具有了分散自律的特征。

在上层控制层，本文提出了二次调压的基本概念，并进行了运行优化分析。针对系统故障、负荷变化等大功率波动的情况，本文研究了系统的运行需求，设计了相应的控制策略，在暂态情况下达到了较好的控制效果，保证了直流电压的稳定。

关键词：直流配电网；电压源换流器；协同控制策略；下垂控制

Abstract

Distribution system based on DC could be superior to an AC system in terms of efficiency, reliability and distribution capacity, and better absorb the distributed energy. Therefore, the flexible DC distribution system, has a huge market potential and economic value. Therefore, it is paid close attention and its engineering practice and research are in full swing within the whole world. Control is the key of DC distribution system. Effective and reliable DC voltage controllers need to be designed and the coordination control between converter stations should be researched, for ensuring dc voltage stability and power balance under all operation conditions.

In the paper, a three-layer hierarchical coordinated control system of DC distribution network is proposed. First, the paper introduces converter control layer and finishes accurate modeling and analysis of related characteristics of each unit of DC distribution grid, including mathematical modeling and control of PV, energy storage, DC-DC converter, voltage source converter and load converter.

Based on DC voltage margin control and droop control, hybrid control method is proposed, which is validated by simulation. Then, simulation and data analysis for several basic control methods and hybrid control method are made in the multi-terminal flexible DC distribution system, and related conclusion is get. On this basis, the paper proposed multi-Converter voltage coordination control strategy for DC Distribution network. Each power electronic converter coordinates its control method by instruction value to keep the power balance of the DC grid under different operating conditions. Each unit is controlled independently without communicating with each other, which is decentralized and autonomous.

The concept of secondary voltage regulation is put forward in the upper layer control, and analysis of operation optimization is made. One of the concerns is the operation requirement of the system, which will solve the problem of power fluctuation in the condition of fault and load variation. Accordingly, the related control strategy of DC distribution network are studied and designed, which leads to a better control effect and can ensure DC voltage stability.

Keywords: DC distribution network, voltage source converter, coordination control strategy, droop control

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 柔性直流输电发展现状	2
1.3 柔性直流配电网及其控制技术研究现状	3
1.4 本文的主要工作	5
第 2 章 直流配电网控制体系及换流器控制层.....	6
2.1 直流配电网的分层控制体系	6
2.2 电压源换流器的控制	7
2.3 光伏阵列建模及控制	9
2.4 储能的建模与控制	11
2.4.1 蓄电池建模	11
2.4.2 双向 DC-DC 换流器控制.....	12
2.5 负荷换流器的控制	13
2.6 本章小结	14
第 3 章 多换流器的电压协同控制.....	16
3.1 直流电压和系统有功功率的关系	16
3.2 基本的控制方式	17
3.2.1 直流电压偏差控制	18
3.2.2 直流电压下垂控制	19
3.3 基于偏差和下垂的混合控制	20
3.3.1 站内混合控制	20
3.3.2 站间混合控制	22
3.4 控制策略比较	24
3.4.1 系统仿真条件介绍	24
3.4.2 稳态数据分析	25
3.4.3 暂态数据分析	26
3.5 改进的直流电压混合控制	27

3.6	本章小结	28
第 4 章	底层控制：电压协同控制策略.....	30
4.1	模型概述	30
4.2	控制模式切换的指令及滞环原理	31
4.3	电压协同控制策略	31
4.3.1	基于指令值的控制策略表	31
4.3.2	电压分段控制特性	33
4.4	仿真验证	34
4.4.1	电压升高模式	34
4.4.2	电压降低模式	36
4.4.3	中间线路断线	37
4.5	本章小结	38
第 5 章	上层控制.....	39
5.1	引言	39
5.2	二次调压	39
5.2.1	二次调压基本概念	39
5.2.2	电压优化运行分析	40
5.2.3	计算验证	42
5.3	基于功率基准值的控制策略	43
5.4	基于模式切换的控制策略	45
5.4.1	基于指令值 S 的模式切换	45
5.4.2	中间线路断线的控制策略	47
5.5	本章小结	48
第 6 章	结论与展望.....	49
6.1	全文工作成果及结论	49
6.2	后续工作展望	50
	参考文献	51
	攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	55
	攻读硕士学位期间参加的科研工作	56
	致谢	57

第1章 绪论

1.1 研究背景

伴随着化石能源的枯竭，以风能和光伏为代表的分布式能源和以电动汽车和蓄电池为代表的储能装置发展越来越迅速，也获得了越来越多的关注。同时，更多负荷接入配电网，对现有配电网的控制运行和供电可靠性方面提出了新的挑战。直流配电网的提出背景主要有如下几个方面^[1,2]。

(1) 在电源方面，分布式能源有着清洁和可再生等优点，传统的交流配电网在安全、稳定、最大限度吸纳分布式能源方面，面临越来越多的问题。同时，光伏和风能其所发电量是不稳定的，需要快速精准的控制体系配合发电并网。

(2) 在负荷方面，我国电力系统的负荷的结构越来越复杂。信息产业和高新科技产业的发展，居民电器（变频空调、手机和电脑）的变化，使得负荷侧出现了越来越多的直流负荷或者包含直流变换环节的负荷。这些负荷接入交流配电网需要大量的 AC-DC 电力电子变换器件，极大增加了成本，阻碍了相关负荷的发展。

(3) 在配电网方面，随着城市的发展，用电负荷的快速增长，负荷分布也更为集中，传统的交流配电网面临着供电线路走廊紧张、送电容量和供电半径等方面越来越严峻的挑战。同时，日益减少的可用土地面积和配电网的矛盾也愈发尖锐。

(4) 在技术方面，近些年来，以晶闸管（SCR）和电压源换流器（VSC）为代表的电力电子器件大量出现，并且应用广泛，其相关的控制保护技术日益成熟，出现了应用和示范工程，为直流配电网的应用提出了可能。

在电气工程发展的早期，直流配电曾经被提出来过，但因其电压等级太低，输送容量太小而被淘汰，取而代之的是交流输配电方式^[3,4]。

20 世纪末，随着相关技术的发展，直流配电网的优势逐渐被重视起来。西方国家已经开始相关的研究和应用。其中在军事和汽车领域已经出现了直流配电技术^[5]，并开始向更广阔的领域发展^[6]。

直流配电网相比较交流配电网在诸多方面和领域有着优势，具有较好的发展前景^[6]。主要体现在如下几个方面^[7-9]。：

(1) 线路只有两条，建设成本低。同时由于线路较少，电阻损耗更小。由于线路流过直流电，没有集肤效应的影响，导线横截面积利用率较高；同时输送同样多的电能时，直流电压幅值较低，对导线的要求也较低。这些，都降低了系统的建造

成本。

(2) 直流配电网利于分布式能源直接接入。分布式能源可靠性、灵活性好,效率高且绿色清洁,关注度日益变高^[10]。借助电力电子器件,可以使分布式能源实现最大功率控制,通过一定的策略实现分布式能源的精准快速控制,最大限度吸纳其所发电量,解决其分布式、间歇式和不稳定性等问题。

(3) 直流配电网直接向直流负荷供电,极大减少了原本交流配电网需要的 AC-DC 变换环节,节约了成本。

(4) 由于系统中流过直流电,不存在功角稳定性问题,具有快速可控的特点。同时系统不存在无功功率,整体的控制和调度更简单容易,可以达到更好的控制效果,系统的供电可靠性也较高。

直流配电网由日本东京工业大学在 2004 年提出,并制造了一台的直流配电系统样机^[11],大阪大学在此基础上,提出了一种双极的直流电网结构^[12]。罗马尼亚的布加勒斯特理工大学在 2007 年提出了一种带有交替供电电源的直流配电系统结构^[13],该系统不仅能吸纳分布式能源,还能利用生物质发电提供的能量。2010 年,美国弗吉尼亚理工大学提出了“Sustainable Building and Nanogrids(SBN)”计划^[14],这是一种基于未来智能住宅的直流配电系统。

中国最近几年开始直流配电网相关研究。2012 年,中国深圳供电局成立城市电网先进技术研究中心,计划未来几年内建立柔性直流配电研究室。

中国的城市配电网改造可以采用交流负荷用交流配电,直流负荷用直流配电的分区模式。同时,由于我国负荷容量的快速增长且负荷分布日益密集,直流配电网可以大大减小线路占地面积,同时增大系统供电容量,降低城镇化带来的供电压力,促进国民经济发展。通过蓄电池和电动汽车等储能设备,也可以实现交流和直流负荷之间的互补,储能设备也可以参与电力调度和削峰填谷,缓解现有交流电网的压力。虽然直流配电网的研究和实践还处于起步阶段,成果较少,但由于直流配电网巨大的经济和技术优势,大力推进直流配电网的研究和示范工程很有意义。

1.2 柔性直流输电发展现状

20 世纪 90 年代以后,以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)由于具有电流自关断能力、可向无源网络供电等优势而受到人们的重视并得到快速发展^[15, 16]。该技术被命名为柔性直流输电(High Voltage Direct Current Flexible, HVDC-Flexible),以区别于采用晶闸管的传统直流输电技术^[15, 16]。

目前适用于高电压、大容量输变电的主要是绝缘栅双极晶体管（IGBT）。IGBT 是一种具备自关断能力的金属氧化物半导体元件，其商品化模块的最大额定电流已达 3.6kA，最高阻断电压为 6.5kV。IGBT 的特点是开关频率高、开关损耗小、驱动电路简单、驱动损耗小，目前在工程中应用最为广泛，其缺点是容量较小。

1997 年，世界上第一个采用 IGBT 模块的柔性直流输电工业性试验在瑞典中部投运，随后柔性工程逐渐增多^[15]，电压等级和系统容量均出现了提高^[17]，详细情况见表 1-1。

表 1-1 柔性直流工程建设现状

完工时间	名称	额定功率 (MW)	直流电压 (kV)	建设目的
2015	NordBalt	700	±300	电网互联
2015	Dolwin2	900	±320	风电场并网
2014	Sylwin1	864	±320	风电场并网
2014	Skagerrak	700	500	电网互联
2014	舟山多端柔直	1000	±200	电网互联
2013	南澳柔性多端	200	±160	风电场并网
2013	INELFE	2*1000	±320	电网互联
2011	南汇柔直工程	18	±30	风电场并网
2011	文昌油田柔直输电	3.6	±10	海供电上
2010	TransBayCable	400	±200	电网互联
2006	Estlink	350	±150	电网互联
1999	Gotland	50±30	±80	风电场并网
1997	Heallsjon	3	±10	工业试验

1.3 柔性直流配电网及其控制技术研究现状

直流配电网使用电压源换流器，也称之为柔性直流配电网，其典型结构如图 1-1 所示，主要由储能、分布式能源、负荷和联网换流器组成。图中， P_{WT} 、 P_{PV} 、 P_B 、 P_G 、 P_{AC_L} 、 P_{DC_L} 分别表示风机功率、光伏功率、蓄电池功率、联网换流器功率、交流负荷功率和直流负荷功率。

图 1-2 中，辐射形，环形和两端供电型为直流配电网的主要拓扑结构^[9]。辐射形拓扑是单端供电模式，系统一端换流站处线路故障，其功率传输将会终止，最顶层的换流器瘫痪可能会导致系统崩溃。环形拓扑利用直流线路将各换流站呈环形连

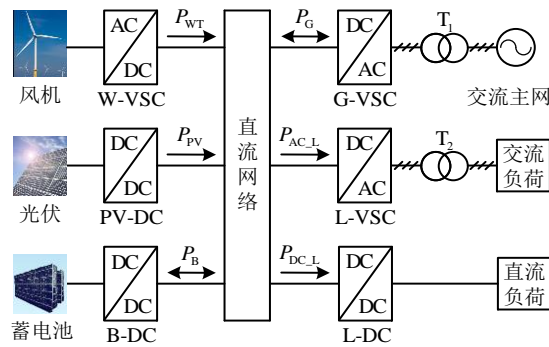


图 1-1 柔性直流配电网结构示意图

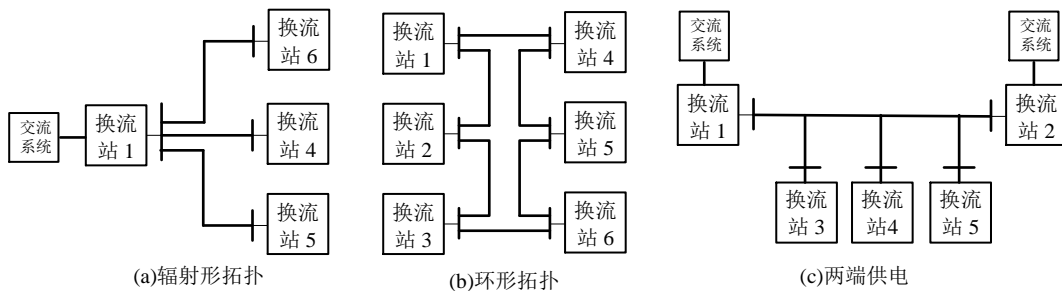


图 1-2 直流配电网的拓扑结构

接，当某处发生故障时，潮流可通过其它路径传输，从而提高了配电网供电的可靠性。两端配电网的结构也较为符合直流配电网的特征，当一端的交流系统出现故障时，直流系统可以由另一端的换流站供电，但该结构的控制和保护也相对困难。

直流配电网容量一般为 MW 级别。主要应用领域为风电场并网，城市供电，工业园区供电等等。直流配电网内各个端的换流站均具有良好的可控性，同时其整体控制也面临着诸多问题：1) 分布式能源需要实现最大能量跟踪并最大限度吸纳其所发电量；2) 各个换流站针对系统整体直流电压水平和运行状况做出及时调整；3) 系统内各个单元：分布式能源、储能和联网换流器之间的协调配合；4) 系统在恶劣情况下的整体稳定策略。

已有部分文献针对直流配电网和直流微网的控制体系和相关策略进行了研究。文献[18]介绍了智能配电网的控制结构；文献[19]将直流电网的运行分为三种不同的模式，在此基础上提出了一种分层协调控制策略，但其适用性还有待深入研究；文献[20]和[21]将直流电网中各个换流站端口看作一个代理，通过上层控制的统一协调，保证系统整体的稳定性；文献[22]将新能源直流电网的控制架构分为三层，并对各层的进行了分析讨论；文献[23]研究基于混合储能的控制方式，提出了分为五层的直流电网整体的协调控制策略，使得不同储能之间互补，达到了良好的控制效果；文献[24]考虑了介绍了直流电网的三种运行模式及其切换方式，以应对不同的复杂

情况；文献[25]研究了一种直流和交流网中的三级控制策略。

文献[26]提出一种针对直流纳电网的控制方法，各换流器分段参与直流总线电压的控制，控制效果较好，但该方法忽略了蓄电池满荷电状态等极限情况。文献[27-29]根据直流电压的变化来协调各端换流器的工作状态，但在同种工况下仅有一个换流器按下垂特性参与直流电压的调节。文献[30]研究光伏直流电网，提出一种基于直流母线电压的电能管理策略，但仅仅讨论了电网功率过剩的状态，对于功率不足的情况则有待研究。

总体来看，目前已有文献在控制架构方面的研究均借鉴传统电网的3层调控架构，直流配电网的稳定运行控制已有一定的研究基础，但当前的文献多研究直流微网，对直流配电网研究得较少。本文以包含光伏、储能、交流电网、交流负荷的多端柔性直流配电网为例来研究其协同控制策略。

1.4 本文的主要工作

借助电力电子变换器件，直流配电网较好地解决了分布式能源并网和直流负荷变化带来的挑战。控制是直流配电网运行的重要一环，本文主要研究直流配电网的多换流器间的电压协同控制策略。主要研究内容为：

(1) 提出直流配电网的分层控制体系：换流器控制层、底层控制和上层控制。各个控制层有着不同的控制目标，协调机制和响应时间。在换流器控制层研究了直流配电网各个单元：电压源换流器、光伏单元、储能、DC-DC换流器和负荷换流器的建模及控制。在此基础上组成了多端柔性直流配电网系统结构，并在相关软件上完成了系统建模。

(2) 解释了直流配电网中直流电压和有功功率的紧密关系，并在介绍直流电压偏差控制和下垂控制的基础上，提出了基于偏差和下垂控制的混合控制：分为站间混合控制和站内混合控制。在此基础上，对基本控制方式和混合控制方式的仿真结果进行数据分析，得出了各自控制的特点和适用范围。

(3) 底层控制中，建立了多端柔性直流配电网系统模型，提出了适用于多端柔性直流配电网的电压协同控制策略。引入了滞环控制和控制模式切换的指令值 S ，形成了整体的控制策略表和电压分段控制特性。

(4) 上层控制主要分为三个部分：集中控制、电压优化和故障控制。其中，研究了二次调压的基本概念和优化过程，针对系统各种恶劣的运行工况，提出了基于功率基准值和模式切换的控制策略。

第2章 直流配电网控制体系及换流器控制层

2.1 直流配电网的分层控制体系

根据控制目标、协调机制和时间尺度的不同，将直流配电网的控制体系划分为换流器控制层、底层控制层、上层控制层 3 个层次。该分层控制体系如图 2-1 所示。

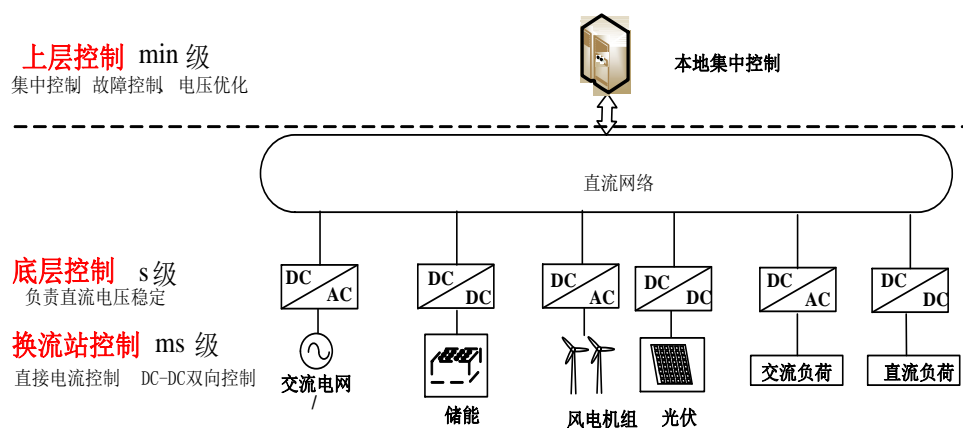


图 2-1 分层控制体系示意图

各层次的功能定义分述如下。

（1）换流器控制层

其中包括了阀级控制器，各个换流站（包括 VSC 和 DC-DC 变换器）各自均有一定的控制方式，包含了其调制方式和基本控制方式。其中电压源换流器主要采用基于 $d-q$ 轴的解耦控制方式。其为双闭环的解耦控制器，外环主要控制功率（包括直流电压、有功功率、无功功率和交流电压的相关控制量），并生成相应的电流给内环，内环用于控制电流。同时通过坐标变换及解耦补偿技术，实现了有功功率量（包括直流电压）和无功功率量的单独控制，通过改变相应的功率和电压基准值就能到达相应的控制目标，使得各个换流站有了自治性的特点，成为了一个局部自律的元件去参与整体的电压协同控制。同时，也可以接受上层和底层控制的相应指令，来改变自身的控制参数。

直流配电网的各个换流站按照主要控制方式可分为控制功率站和控制电压站。其中，控制功率站主要采用有功功率和无功功率控制，控制电压站主要采用定直流电压控制/直流电压下垂控制和无功功率控制。同一换流站也可以同时配备多种控制方式，通过一定的控制策略来协同切换。

（2）底层控制

底层控制主要将各个分散自律的换流站形成一个整体。其主要通过公共的直流母线电压来协调多个换流站，每个换流站通过检测直流电压的变化情况来获取系统整体的运行状况。

底层控制主要将直流配电网的各个单元有机结合起来，使用整体的电压协同控制策略来保证系统的各个基本工况下都能保持直流电压的稳定。

各个换流站控制方式的基本配合策略为直流电压的下垂控制和偏差控制。二者均不需要通讯参与，利用各个换流站功率和直流电压的关系来相互配合，共同承担系统功率缺额和过剩，合理分配功率变化量，使有功功率在各个换流站之间合理分布，从而保持直流电压平稳。

(3) 上层控制

大部分情况下，采用换流器层控制和底层控制就可以应对直流配电网的大部分运行工况。但是，当系统出现故障、断线和换流站退出运行等较为恶劣的工况时，就需要上层控制的参与，使系统的各项运行指标在合理的范围内，防止系统崩溃等极端情况的出现。

上层控制主要分为三个部分：集中控制、电压优化和故障控制。集中控制类似于交流输电系统的调度系统，监视系统的运行数据，负责系统整体的可靠性和经济性，通过一定的模型，计算系统的各项指标，调节系统潮流分布，使系统时刻保持最优的运行状态。电压优化就是二次调压，建立系统网损最低、电压偏差量最小的目标函数，并建立系统潮流方程和约束方式，通过一定数值算法求解最优解，生成对应的数据基准值下发给底层控制的各个换流器执行。故障控制主要是生成满足 N-1 准则、换流站设备容量和直流电压允许运行范围内的电压和功率等数据的基准值，保证系统在换流站退出和线路故障等暂态情况下可以保持较为稳定的状态，直到系统恢复正常。

2.2 电压源换流器的控制

直流配电网通过电压型 PWM 换流器 G-VSC 并入交流主网，如图 2-2 所示。

由图 2-2 可得三相静止坐标系下的数学模型表示为

$$\begin{cases} u_{ga} = R_g i_{ga} + L_g \frac{di_{ga}}{dt} + u_{ca} \\ u_{gb} = R_g i_{gb} + L_g \frac{di_{gb}}{dt} + u_{cb} \\ u_{gc} = R_g i_{gc} + L_g \frac{di_{gc}}{dt} + u_{cc} \end{cases} \quad (2-1)$$

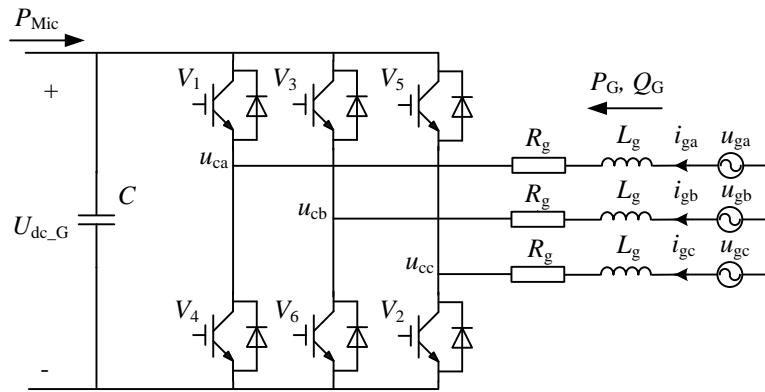


图 2-2 联网换流器 G-VSC 的拓扑结构图

式中 u_{gx} 、 i_{gx} 、 u_{cx} ——电网三相电压、电流以及换流器输出电压，(x=a, b, c);
 R_g 、 L_g ——滤波电抗器的电阻和电感。

直流侧电压方程可表示为

$$C \frac{dU_{dc_G}}{dt} = \frac{P_{Mic}}{U_{dc_G}} - \frac{P_G}{U_{dc_G}} \quad (2-2)$$

式中 P_{Mic} 、 P_G ——直流配电网内的有功功率、联网换流器的输出有功功率;
 C 、 U_{dc_G} ——直流侧电容和电压。

采用坐标变换可得联网换流器在 dq 同步坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} - \omega_s L_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} + u_{cd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + \omega_s L_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + u_{cq} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中 u_{gd} 、 u_{gq} 、 i_{gd} 、 i_{gq} 、 u_{cd} 、 u_{cq} ——dq 同步坐标系下的电网电压、电流、联网换流器输出电压的 d 轴、q 轴分量;

ω_s ——交流系统频率。

有功和无功功率输出可表示为

$$P_G = \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq}) \quad (2-4)$$

$$Q_G = \frac{3}{2} (u_{gq} i_{gd} - u_{gd} i_{gq}) \quad (2-5)$$

将同步坐标系的 d 轴定向在电网电压矢量上, 即有 $u_{gd}=u_g$, $u_{gq}=0$ 。则由式(2-4)、(2-5), 有功功率和无功功率输出可表示为

$$P_G = \frac{3}{2} u_g i_{gd} \quad (2-6)$$

$$Q_G = -\frac{3}{2}u_g i_{gq} \quad (2-7)$$

由以上两式可知，当采用电网电压定向控制时，可以通过控制 i_{gd} 来控制有功功率，通过控制 i_{gq} 来控制无功功率，从而实现了有功和无功的解耦控制。

根据式(2-3)，可得出联网换流器在 dq 坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_{cd} = u'_{cd} + \Delta u_{cd} + u_g \\ u_{cq} = u'_{cq} + \Delta u_{cq} \end{cases} \quad (2-8)$$

式中，

$$\begin{cases} u'_{cd} = -L_g \frac{di_{gd}}{dt} - R_g i_{gd} \\ u'_{cq} = -L_g \frac{di_{gq}}{dt} - R_g i_{gq} \end{cases}, \quad \begin{cases} \Delta u_{cd} = \omega_s L_g i_{gq} \\ \Delta u_{cq} = -\omega_s L_g i_{gd} \end{cases}$$

由式(2-8)可知，联网换流器电压在矢量控制下并未完全解耦，需要增加前馈补偿项 Δu_{cd} 和 Δu_{cq} 后来消除 d、q 轴电流间的交叉耦合。联网换流器采用基于电网电压定向矢量控制的双闭环控制结构如图 2-3 所示，外环为直流电压控制和无功功率控制，电压外环的输出为有功电流指令值 i_{gd}^* ，无功电流指令 i_{gq}^* 由外部给定的无功功率指令值决定。电流内环的主要作用是跟踪设定的有功、无功电流指令，根据式(2-8)可得到最终的 d、q 轴电压分量 u_{cd}^* 、 u_{cq}^* ，

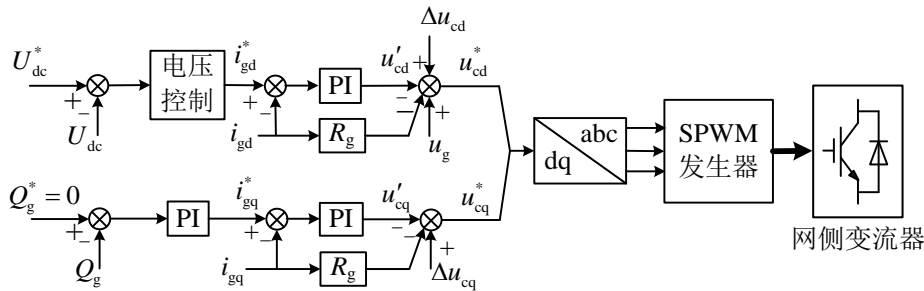


图 2-3 联网换流器的控制结构图

2.3 光伏阵列建模及控制

如图 2-4 所示为光伏电池的等效电路。

光伏电池的输出特性方程为^[31, 32]：

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2-9)$$

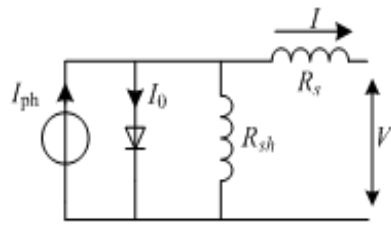


图 2-4 光伏电池等效电路

式(2-9)中, I 为光伏电池输出电流 (工作电流); V 为光伏电池输出电压 (工作电压); I_{ph} 为光生电流; I_0 为反向饱和电流 (对于光伏单元而言, 其数量级为 $10^{-4}A$); I_d 为二极管结电流; q 为电子的电荷量 ($1.6 \times 10^{-19}C$); R_s 为光伏电池的串联电阻 (小于 1Ω); n 为二极管特性因子 (当 $T=300K$ 时, 约为 2.8); k 为玻耳兹曼常数 ($1.38e-23 J/K$); T 为光伏电池温度; R_{sh} 为光伏电池的并联电阻 (数量级为 $k\Omega$)。

光伏单元需要实现 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 模式和稳压模式。光伏最大功率追踪算法 (MPPT) 使光伏电池持续输出最大功率。常见的算法有爬山法、固定电压法和电导增量法等^[33-35]。本文采取电导增量法, 算法框图见图 2-5。而稳压模式主要是用于直流配电网系统中其他换流站处于无法控制母线电压的状态时 (如变换器中流动的功率已经超过额定功率, 或者离网运行时), 可以由光伏单元来控制直流电压。

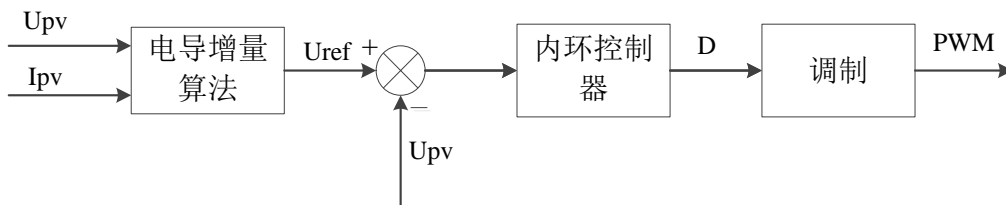


图 2-5 MPPT 算法框图

光伏出口 DC/DC 转换电路为 Boost 变换器, 属于并联型开关变换器, 又称为升压变换器, 其电路拓扑结构如图 2-6 所示。

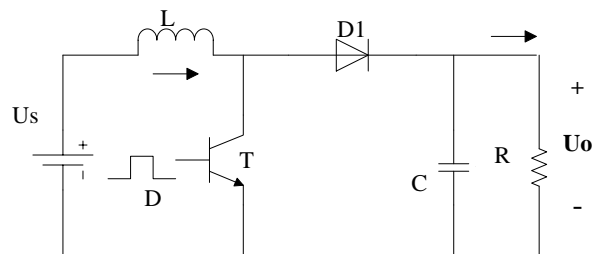


图 2-6 Boost 变换器结构图

基于 BOOST 电路的光伏单元的 MPPT 控制结构图如图 2-7 所示^[35]。

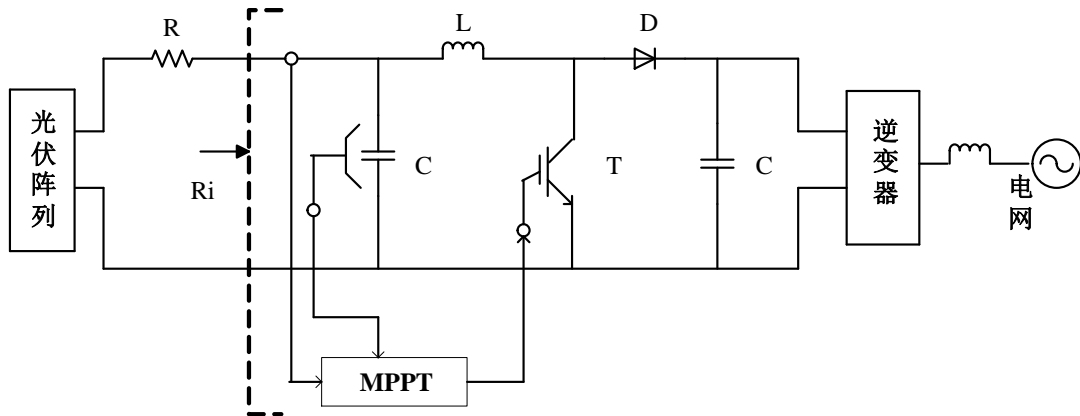


图 2-7 基于 BOOST 电路的 MPPT 控制结构图

将光伏电压和电流进行 MPPT 控制计算，输出参考电压与调制波进行比较生成 PWM 信号，该信号驱动开关管导通或关断，使其占空比 D 发生变化，从而改变等效电阻 R_i 的大小，使光伏阵列输出最大功率。

2.4 储能的建模与控制

2.4.1 蓄电池建模

蓄电池采用通用模型，如图 2-8 所示，等效为受控电压源和电阻串联。

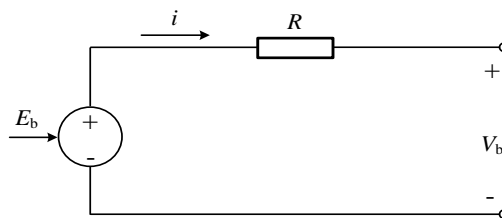


图 2-8 蓄电池等效电路模型

受控电压源数学模型为

$$\begin{cases} E_b = E_0 - k \frac{Q}{Q - \int idt} + Ae^{(-B \cdot \int idt)} \\ V_b = E_b - R \cdot i \end{cases} \quad (2-10)$$

式中 E_0 、 E_b 、 V_b ——蓄电池的恒定电压、空载电压、端电压；

Q —— 电池的容量；

i —— 蓄电池电流；

R —— 蓄电池内阻；

k 、 A 、 B —— 极化电压、指数区域幅值、指数区域时间常数的倒数。

2.4.2 双向 DC-DC 换流器控制

在直流配电网中，蓄电池储能单元通过 DC/DC 换流器 Bi-DC 并联至直流网络，Bi-DC 换流器采用能量可以双向流动的 Buck/Boost 拓扑结构来实现对蓄电池的充放电管理^[32]，如图 2-9 所示。

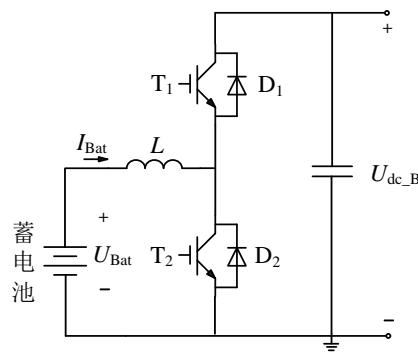


图 2-9 双向 DC/DC 换流器的拓扑结构

蓄电池向直流网络放电时，Buck/Boost 换流器工作在 Boost 升压模式，如图 2-10 所示， T_1 完全截止。设开关周期为 T_s ，在开关管 T_2 导通期间 $T_{on}=D_{Boost}T_s$ (D_{Boost} 为占空比)，蓄电池通过 T_2 将能量储存在电感 L 中；在开关管 T_2 关断期间 $T_{off}=(1-D_{Boost})T_s$ ，电感 L 中储存的电磁能经过 T_1 的反并联二极管 D_1 释放至直流侧，通过控制 T_2 的工作周期和占空比可以调节直流侧电压大小。

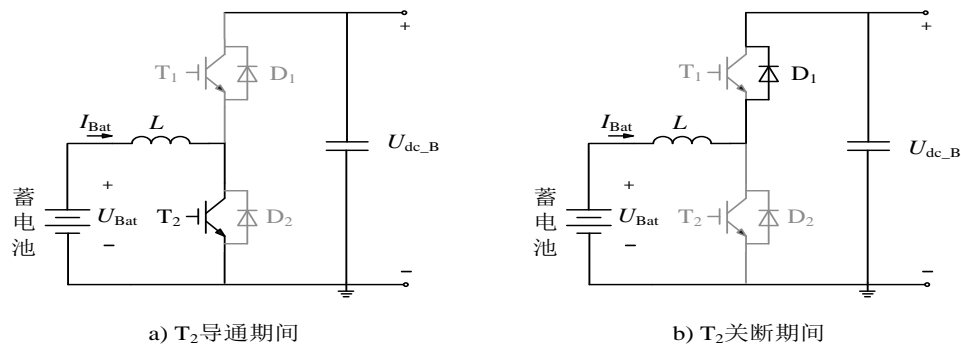


图 2-10 Boost 电路的工作模式

蓄电池放电过程中 DC/DC 换流器的控制结构图如图 2-11 所示，采用双闭环控制结构。外环采用直流电压控制来计算电流内环控制的给定值。内环为电流控制环，采用 PI 控制器使蓄电池实际电流 i_{bat} 跟踪给定值电流 i_{bat}^* ，以消除电流跟踪的稳态误差。

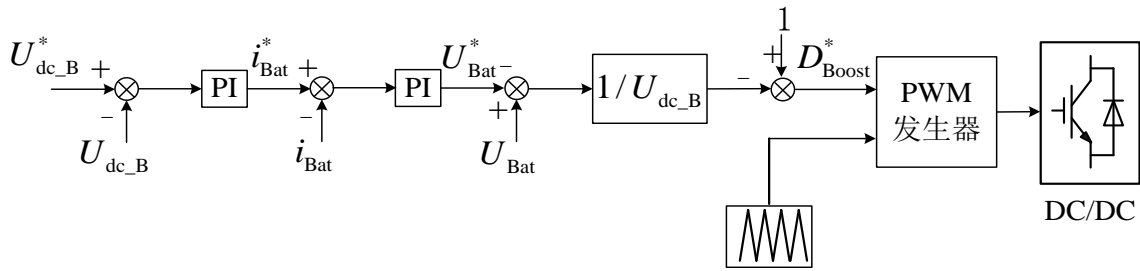


图 2-11 蓄电池放电时 DC/DC 换流器的控制结构图

蓄电池工作在充电模式时，Buck/Boost 换流器工作在 Buck 降压模式，如图 2-12 所示， T_2 完全截止。在开关管 T_1 导通期间，由于直流侧电压大于蓄电池电压，因此配电网内能量会经过电感吸收后对蓄电池进行充电；在开关管 T_1 关断期间，电感中储存的电磁能经由 T_2 的反并联二极管 D_2 续流继续向蓄电池充电，同样可以通过控制 T_1 的开关工作周期和占空比来改变蓄电池的充电电压。

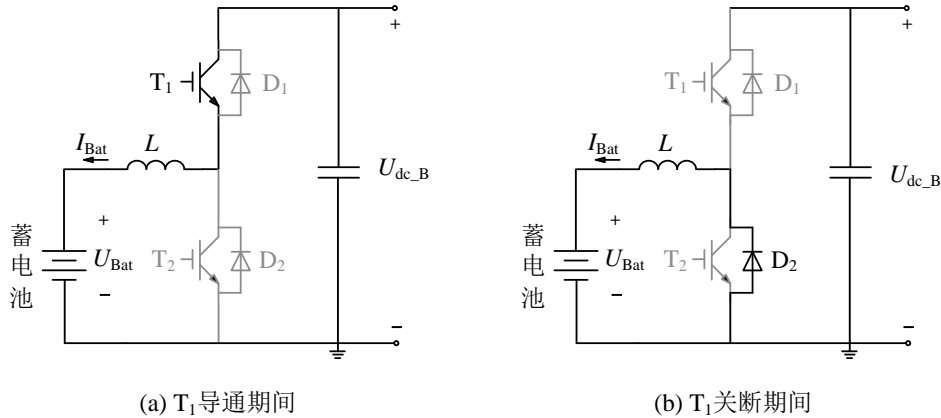


图 2-12 Buck 电路的工作模式

蓄电池充电过程中 DC/DC 换流器的双闭环控制结构图如图 2-13 所示。

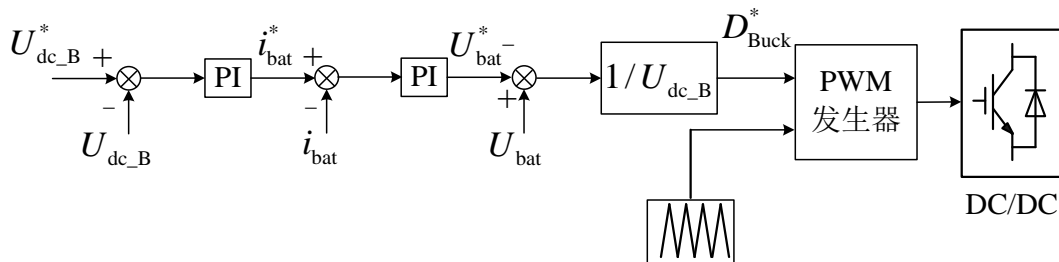


图 2-13 蓄电池充电时 DC/DC 换流器的控制结构图

2.5 负荷换流器的控制

交流负荷通过 L-VSC（负荷换流器）连入直流配电网^[36]，如图 2-14 所示。

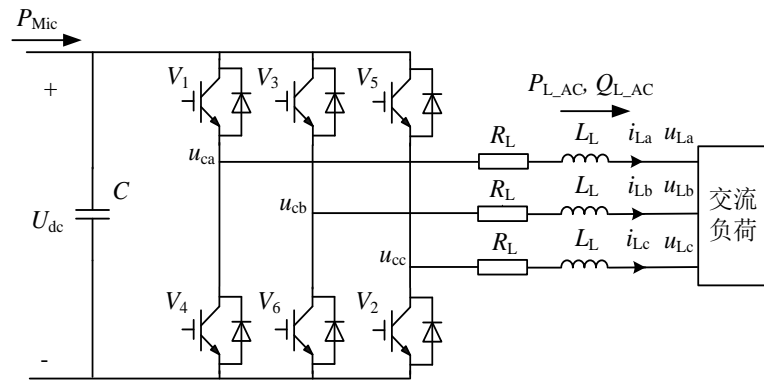


图 2-14 连接交流负荷的换流器 L-VSC 的拓扑结构图

L-VSC 的数学模型的推导同联网换流器，其控制仍采用基于矢量化控制的双闭环控制结构，如图 2-15 所示。外环为采用基于交流电压 dq 分量的定交流电压控制，输出电流参考值给内环，电流内环快速跟踪参考电流值。

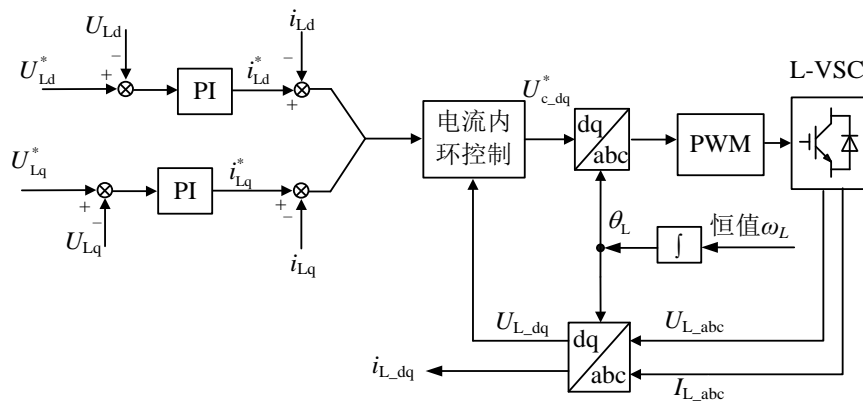


图 2-15 交流负荷侧换流器 L-VSC 的控制策略

2.6 本章小结

本章提出直流配电网的分层控制体系：换流器控制层、底层控制和上层控制。各个控制层有着不同的控制目标，协调机制和响应时间。

在换流器控制层对直流配电网各个单元进行了建模分析。电压源换流器采用基于 d-q 轴的解耦控制方式，属于直接电流控制方式。其双闭环的解耦控制器，外环主要控制功率，内环用于控制电流。

光伏单元部分介绍了光伏等效电路、MPPT 的实现算法和 Boost 变换器控制结构。储能单元部分叙述了蓄电池特性，并对 DC-DC 双向变换器的控制进行了详细分析，分为升压模式和降压模式。最后分析了负荷换流器的定交流电压控制策略。

该章的分层控制体系和各个单元的建模分析为接下来协同控制策略的提出提

供了基础。

第3章 多换流器的电压协同控制

3.1 直流电压和系统有功功率的关系

我们知道，直流配电网没有无功功率、电压相角等交流电网独有的电量，只有有功功率和电压大小两个电量，功率和电压之间有什么关系呢？下面从以下两个角度进行分析。

(1) 从能量流动角度分析

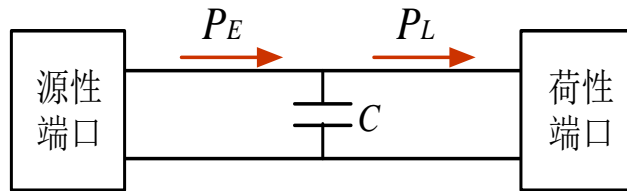


图 3-1 系统功率流动图

直流配电网系统的端口可以分为源性端口和荷性端口，顾名思义，源性端口指为直流配电网提供能量的端口，荷性端口指消耗直流配电网能量的端口。直流母线间的总电容设为 C ，电容储存的能量可用下式计算得到：

$$J_C = \frac{1}{2} C U_{dc}^2 \quad (3-1)$$

当源性端口提供的能量大于荷性端口所需的能量时，多余能量存储在电容里，即 J_C 升高，用于给电容充电，那么此时直流电压 U_{dc} 升高，如果这种情况持续，那么直流电压持续升高。当源性端口提供的能量不足以满足荷性端口所需的能量时，电容放电给直流母线提供能量，即 J_C 下降，那么此时直流电压 U_{dc} 降低，如果这种情况持续，那么直流电压持续下降。

(2) 从网络等值分析

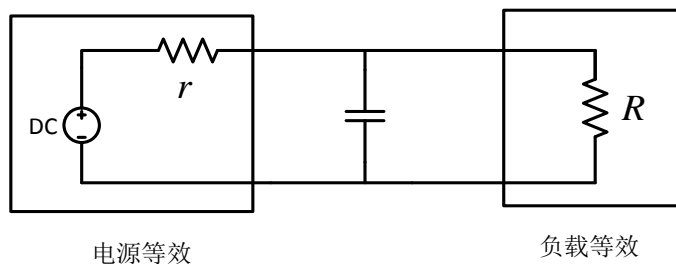


图 3-2 网络等值图

直流配电系统所有发出功率的单元的总和可以等效为如图 3-2 所示的由直流电源 DC 和内阻 r 的结构, 随着不同单元的输出功率和直流母线电压的实时变化, 等效直流电源电压 E 和等效内阻 r 也是时刻变化, 同时等效负载电阻 R 随着负荷功率的变化也是时刻变化的。在时刻 t 假设电源输出和前一时刻相同, 并未发生变化, 此时若负载突然增加, 相当于等效负载电阻 R 突然增加; 此时若负载突然减少, 相当于等效负载电阻 R 突然减小。直流母线电压 U_{dc} 可由式(3-2)确定;

$$U_{dc} = E \cdot \frac{R}{R+r} \quad (3-2)$$

由公式(3-2)知, 当 E 和 r 固定情况下, R 越大, 电压 U_{dc} 越大, 电阻 R 越小, 电压 U_{dc} 越小。

为此, 当负荷增大时, 直流母线电压 U_{dc} 降低; 当负荷减小时, 直流母线电压 U_{dc} 增大。

负载消耗的功率可用公式(3-3)计算得到:

$$P_L = \frac{U_{dc}^2}{R} \quad (3-3)$$

当电源的功率突然增大, 由功率平衡知: 为了消耗掉多余的功率, 直流母线电压上升。当电源的功率突然减小, 由功率平衡知: 为了均衡负荷间的功率, 直流母线电压下降。

不论从能量流动的角度还是网络等值的角度, 我们可以得到这样的结论: 直流配电网功率的波动直接影响到直流母线电压的波动, 当直流配电网提供的功率大于消耗的功率时, 直流母线电压上升, 当直流配电网提供的功率小于消耗的功率时, 直流母线电压下降。即直流配电网的母线电压可以作为协调各单元的控制信号。

3.2 基本的控制方式

由前文分析可知, 多端柔性直流系统中, 系统直流电压和有功功率有着密切的关系, 直流电压的波动情况直接影响系统的潮流分布情况。因此直流电压的控制至为重要。

直流配电网中系统惯量小、功率扰动大、可控端多, 设计具有高可靠性的直流配电网多节点电压协同控制策略是难点之一。直流配电网的电压控制方式分为主从控制、偏差控制和下垂控制方式^[37-39]。主从控制需要换流站之间相互通信, 达到控

制直流电压的目的。但是该控制方式对上层协调控制层有着较高的要求，对通信的准确性和速度有着较高的要求^[40]，其控制可靠性较低^[6]。

下面简要讲直流电压偏差和下垂控制方式：

3.2.1 直流电压偏差控制

直流电压偏差控制方式是指直流电网中，主换流器控制直流电压，并在一定条件下转换为的定有功功率控制器。所有的从换流器的使用定有功功率控制器，并在一定情况下控制直流电压^[41]。当系统出现扰动，运行参数超越极限值时，可以自动地快速切换控制方式，通过主从换流站的配合达到良好的控制效果，不需要通信。

下面以图 3-4 的系统来说明直流电压偏差控制的原理，其中 G-VSC1、G-VSC2 和 G-VSC3 采用图 3-3 所示的偏差控制，光伏 PV 和负荷的功率均为恒定值。

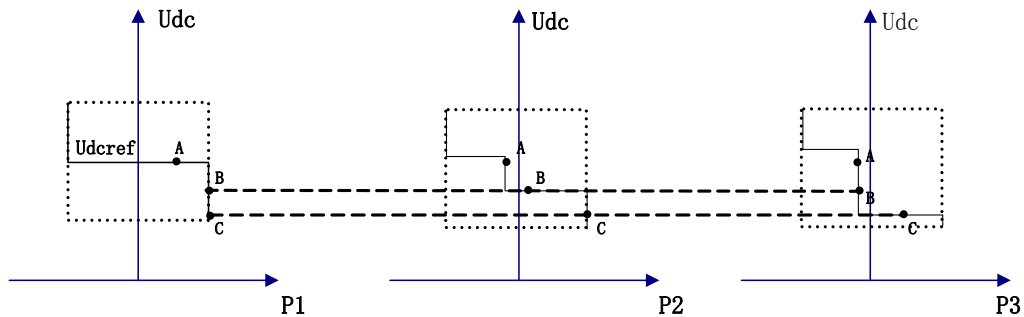


图 3-3 电压偏差控制的控制原理

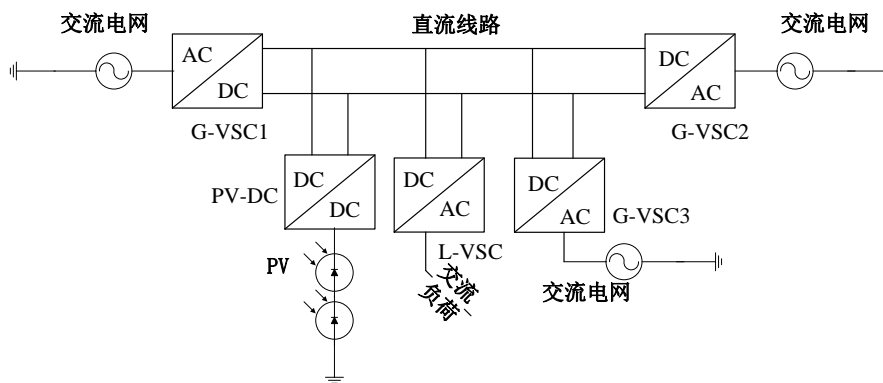


图 3-4 多端柔性直流系统结构

该系统在正常工作状态下，G-VSC1 为定直流电压控制，发出功率；G-VSC2 和 G-VSC3 为定有功功率控制，吸收功率；系统直流电压为 $U_{dref}=10kV$ ，运行在工作点 A。

当系统光伏输出功率减少时，G-VSC1 功率增大，系统的运行点向 B 点移动，当 G-VSC1 的功率增大至其极限功率时，无法继续承担控制直流电压的任务，转为

定有功功率控制。此时系统出现功率缺额，直流电压下降，直到 B 点。此时，当 G-VSC2 控制器检测直流电压降至 B 点时，转换为定直流电压控制，代替 G-VSC1 来调节直流电压。当光伏功率继续减少时，G-VSC2 也达到了其功率极限，转为定有功功率控制。此时直流电压继续下降至 C 点，由 G-VSC3 来控制直流电压。由于 G-VSC3 的直流电压裕度值更大，其控制直流电压的优先级最低，实现了三个主从换流站之间的配合。

该控制方式的外环控制器如图 3-5 所示。图 3-5 所示的控制逻辑为：

$$i_{dref} = \max(i_{dref1}, \min(i_{dref2}, i_{dref3})) \quad (3-4)$$

式中 i_{dref1} ， i_{dref2} ， i_{dref3} 分别为 3 个比例—积分（PI）控制器的输出值。

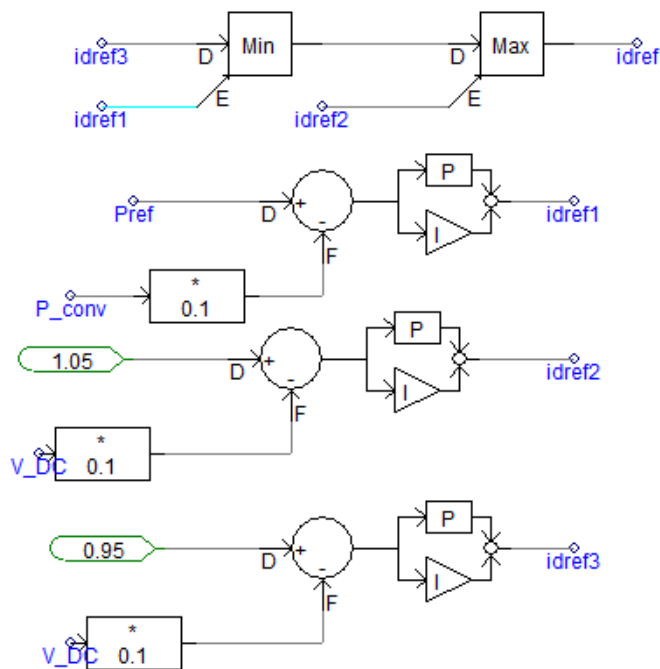


图 3-5 偏差控制器设计

但这种控制策略也存在诸多缺陷：多个换流站之间优先级的配合需要复杂的计算，当系统变得庞大，换流站增多的时候，该设计过程将变得很困难。同时，当系统功率在稳态时频繁小幅度波动时，其直流电压的控制效果较差^[42]。

3.2.2 直流电压下垂控制

直流电压下垂控制^[43, 44]的换流器直流电压随着输出电流或者功率的增加而线性下降。该控制方式中，多个换流站同时采用下垂控制器，当系统出现功率频繁波动时，各个换流站可以同时承担起平抑功率波动的任务，按照预先设定的斜率值分

配功率余量，使得系统整体的功率趋于稳定，直流电压的控制效果也较好。

该控制方式的原理如图 3-6。

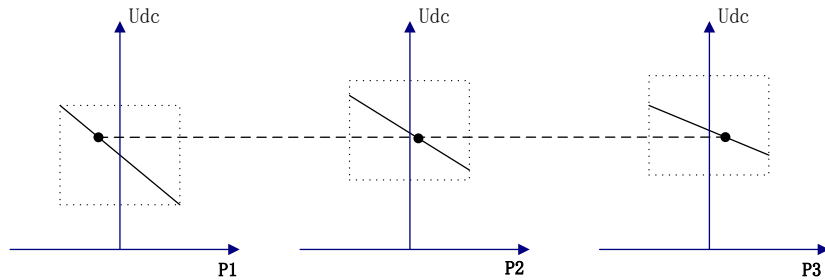


图 3-6 直流电压下垂控制原理

图 3-4 中 G-VSC1、G-VSC2 和 G-VSC3 都采用直流电压下垂控制，其控制器如图 3-7 所示。

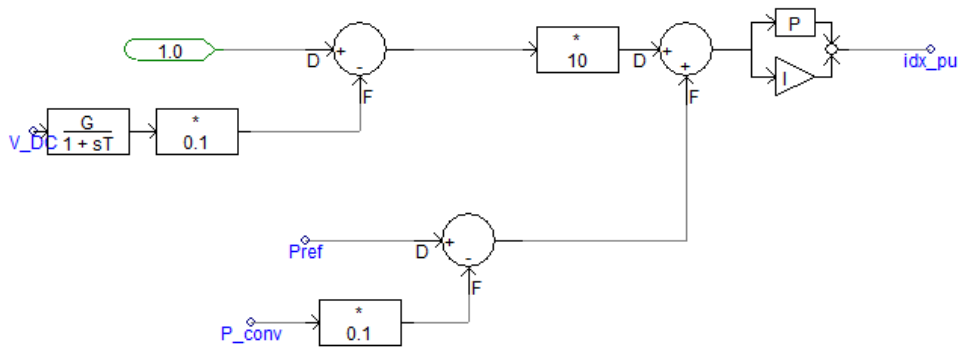


图 3-7 直流电压下垂控制器

采用下垂控制器的系统能对频繁的功率波动快速响应，增发或者减小其输出功率，使系统运行平稳。因此下垂控制适用于功率波动频繁的直流配电网中。

但是其缺陷是直流电压暂态特性较差，系统功率出现较大变化时，直流电压也会相应升高或者降低，出现静态电压误差^[40]。为此需要直流配电网各个端共同配合。本文将针对此缺陷提出改进方法。

3.3 基于偏差和下垂的混合控制

3.3.1 站内混合控制

3.3.1.1 偏差-下垂原理

基于偏差控制及下垂控制二者的优点，可以在不同时间尺度上，在同一端的控制方式中引入偏差-下垂控制，实现直流电压平稳控制，其中一种配合方法可以如下图 3-8。其中，P1, P2, P3、PV 和 P4 分别代表 G-VSC1、G-VSC2、G-VSC3、光伏

和交流负荷的功率。

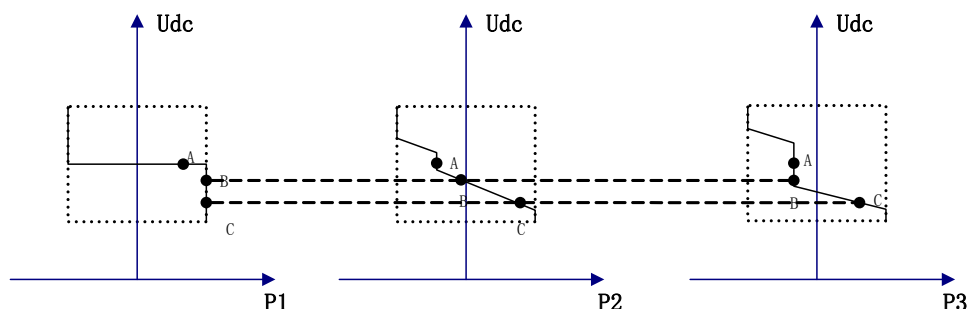


图 3-8 偏差-下垂控制示意图

如上图 3-8 所示，换流站 1 采取定直流电压控制，换流站 2, 3 采取偏差-下垂控制。换流站 2 作为主站的备用站，在稳态情况下（A 点）采取定有功功率控制，在直流电压越限（ $0.02 \leq |\Delta V_{dc1}|$ ）后采取下垂控制来稳定直流电压（B 点）。其中换流站 1 和 2 在 $0.02 \leq |\Delta V_{dc1}|$ 时，使用的是偏差控制的思想，即换流站 2 在电压变化量大于 0.02 后接管直流电压的控制，不同的是，换流站 2 在接管后，不是采取定直流电压控制，而是下垂控制。换流站 3 作为次备用站，其动作阈值更大，在 $(0.05 \leq |\Delta V_{dc1}|)$ 后，切换控制模式，从而与换流站 2 实现了配合。

该配合方法在不同时间尺度上对偏差，下垂控制策略进行组合，可以实现系统在功率波动甚至脱网、换流站的投退、交流电网的故障等情况下直流电压的稳定过渡，具有更好的稳态和故障穿越性能。

3.3.1.2 仿真验证

采用如图 3-4 所示的多端柔性直流系统来测试所提出的站内混合控制方式的有效性。稳态情况下，系统直流电压等级 10kV，VSC1 端采取定直流电压控制，输出功率为 $P1=4.5\text{MW}$ ，有功功率越限后使用定有功功率控制。VSC2 稳态时使用定有功功率控制 $P2=-1.3\text{MW}$ ，并加入直流电压偏差和下垂控制，直流电压裕度为 $\Delta U_{dc}=0.2\text{kV}$ ，其直流电压控制的优先级高于 VSC3。VSC3 稳态时使用定有功功率控制 $P3=1.7\text{MW}$ ，并加入直流电压偏差和下垂控制，直流电压裕度为 $\Delta U_{dc}=0.5\text{kV}$ 。光伏输出恒定功率。交流负荷侧的 AC-DC 换流器使用定交流电压控制。

仿真过程为：交流负荷吸收的功率变化，2s 时由 -1MW 变为 -2.3MW ，4s 时继续增大功率吸收量至 -3MW 。

图 3-9 给出了直流电压和各端换流站有功功率在负荷量改变时的变化过程，电压单位为 kV，功率单位为 MW。仿真开始时直流电压为 10kV，系统处于稳态，PV 输出功率恒定。交流负荷吸收的功率出现变化，2s 时由 -1MW 变为 -2.3MW ，如图 3-9 所示。这时主站相应增加了所发出的功率 P1，P1 增加超过上限 5.5MW 经过小

幅度波动后，VSC1 转换为定有功功率控制，系统出现功率缺额，引起直流电压的降低。直流电压降低至 9.8kV 时，VSC2 接管了直流电压的控制，由定有功功率转换为下垂控制模式。此时，直流电压还未下降至 9.5kV，VSC3 依然吸收恒定有功功率。

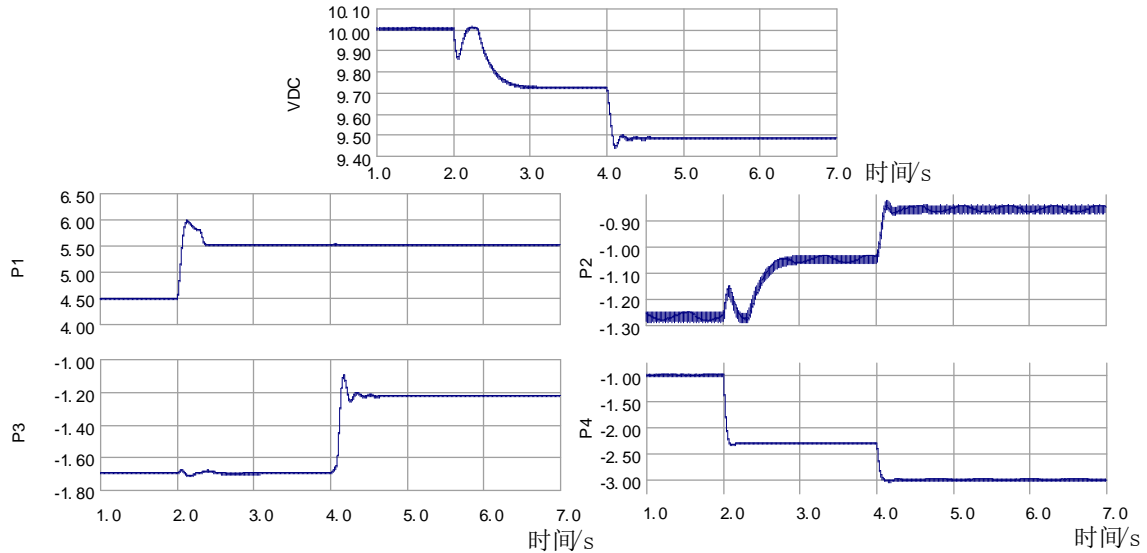


图 3-9 站内混合控制仿真波形图

4s 时，交流负荷继续增大功率吸收量至-3MW，由于此时 VSC2 使用下垂控制，直流电压降低直到 9.5kV，使得 VSC3 切换控制模式，由定有功功率控制转换为下垂控制。此时，系统由 VSC2 和 VSC3 共同协调控制直流电压，系统达到新的稳态。

由图 3-9 的仿真波形可知，采用站内混合控制策略，各个换流站之间实现了优先级不同的裕度控制，在不同工况下实现了控制模式的切换，直流电压得到了良好控制。

3.3.2 站间混合控制

3.3.2.1 偏差+下垂原理

在同一时刻，多端系统的换流站可以使用不同的控制方式，如定有功功率控制，定直流电压控制，下垂控制等。在系统加入分布式能源和负荷，从而引入扰动后，可以由各个换流站来平抑其波动，实现稳态以及故障情况下直流电压的平稳。图 3-10 描述了在同一时间尺度下系统同时进行定直流电压控制和下垂控制的实现方法。其中，P1、P2、P3、PV 和 P4 分别代表 VSC1、VSC2、VSC3、光伏和交流负荷的功率。

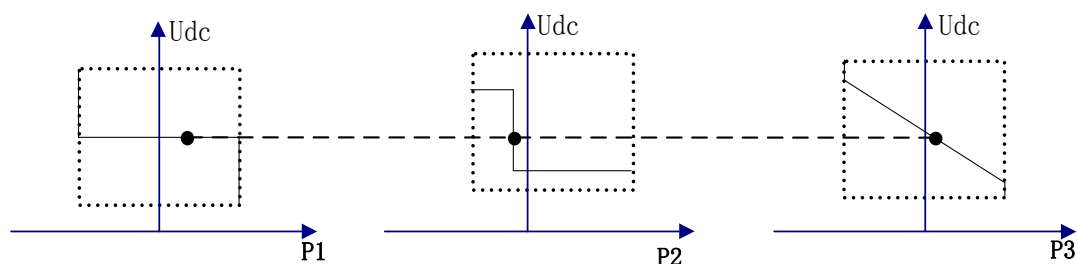


图 3-10 偏差+下垂控制示意图

偏差+下垂控制，在偏差控制的基础上，VSC3 端引入下垂控制，在稳态时，功率的变化量主要由 VSC1 承担，VSC1 作为主站控制直流电压恒定。VSC3 负责系统中功率的微小波动，由于直流配电网中分布式能源和负荷的波动很频繁，需要有下垂控制站来实时迅速地平抑功率的小扰动。同时，暂态过程中，一直都有 VSC3 根据下垂特性来平衡功率缺额，实现了直流电压的平稳变化。

3.3.2.2 仿真验证

采用如图 3-4 所示的系统来测试所提出的站间混合控制方式的有效性。稳态情况下，VSC1 端采取定直流电压控制，输出功率为 $P1=5.5\text{MW}$ ，有功功率的范围为 $4.5\text{--}6.5\text{MW}$ ，有功功率越限后采取定有功功率控制。VSC2 作为控制直流电压的备用站，稳态时采用定有功功率控制，其功率 $P2=-2.5\text{MW}$ ，并引入偏差控制，直流电压控制裕度为 $\Delta U_{dc}=0.5\text{kV}$ 。VSC3 稳态时 $P3=-2\text{MW}$ ，采取下垂控制。光伏利用电导增量法实现最大能量跟踪，其光照强度随机波动，输出功率随时间变化。交流负荷采取定交流电压控制。

仿真过程为：2s 时 VSC2 侧的交流电网出现三相接地故障，2.3s 时故障被清除，4s 时 VSC1 与直流电网断开。

图 3-11 给出了直流电压和各端换流站有功功率在负荷量改变时的变化过程，电压单位为 kV，功率单位为 MW。仿真开始直流电压为 10kV，系统处于稳态，由于 PV 的输出功率波动，P1 和 P3 的值也出现了微弱的波动，以平衡系统功率。第 2s 时 VSC2 发生交流电网三相接地故障，这使得 VSC2 输出功率几乎减少到零，并且引起了直流电压降低，如图 3-11 所示，这时主站相应减少了所发出的功率 P1，直流电压出现波动，但不至于崩溃。第 2.3s 时交流故障被清除，交流电压迅速恢复，VSC2 吸收功率快速增加，直流电压迅速升高，并恢复为 10kV，系统各个换流站功率恢复。4s 时 VSC1 与电网断开，VSC2 作为直流电压的备用控制站，接管直流电压的控制任务，由于其直流电压裕度为 $\Delta U_{dc}=0.5\text{kV}$ ，其直流电压被控制在 9.5kV，VSC3 由于直流电压降低，增发了一部分功率，从而使得 P2 的过渡更为平稳，见图 3-11。5s 后，系统进入新的稳定状态。

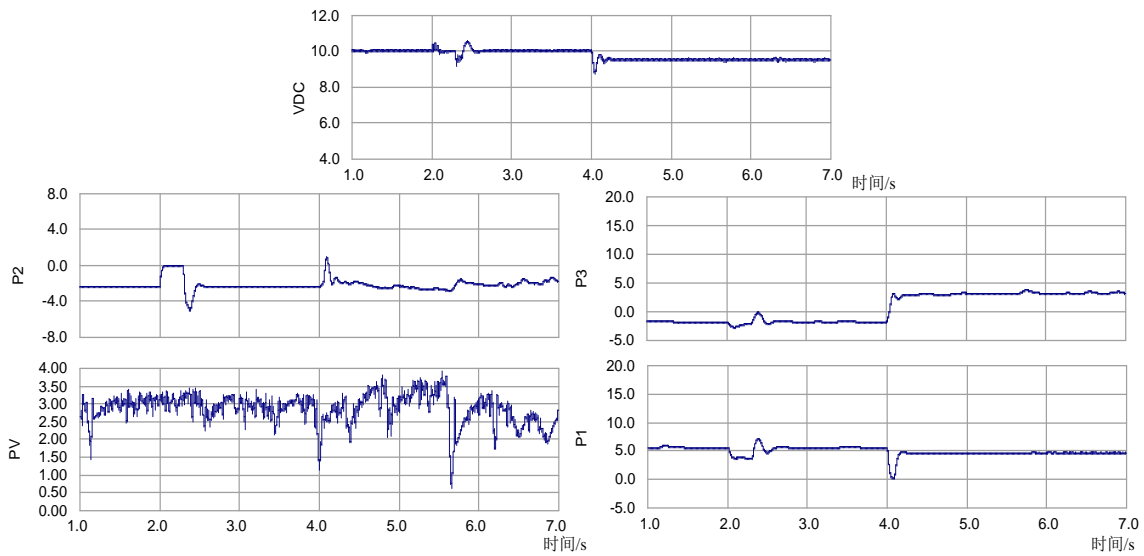


图 3-11 站间混合控制仿真结果

图 3-11 仿真波形可知,采用站间混合控制策略,各个换流站控制模式正确切换,直流电压在各个工况下也实现了良好控制。

3.4 控制策略比较

3.4.1 系统仿真条件介绍

直流配电网中系统惯量小、功率扰动大、可控端多,需要设计具有高可靠性的直流配电网多节点电压协同控制策略。本小节研究在直流系统中,底层控制器采用不同的控制策略时,在稳态和故障时对系统进行仿真模拟,对所得的直流电压数据进行计算分析。

仿真系统如图 3-4 所示,其中三端的 G-VSC 连接交流系统,一端 DC-DC 换流器连接光伏 PV,一端 L-VSC 连接交流负荷。采用不同的控制策略时,各端换流器的控制方式如表 3-1,下面将比较这 4 种不同的控制策略的直流电压控制效果。

表 3-1 各个控制策略实现方式

控制策略	G-VSC1	G-VSC2	G-VSC3	PV	交流负荷
偏差	偏差	偏差	定有功	最大功率	定交流电压
下垂	下垂	下垂	定有功	最大功率	定交流电压
3 端下垂	下垂	下垂	下垂	最大功率	定交流电压
偏差+下垂	偏差	偏差	下垂	最大功率	定交流电压

为仿真直流配电网的实际运行环境，在系统中加入功率实时无规律变化的波动源，其功率如图 3-12 所示，单位为 MW。系统在稳态时，直流电压为 10kV，整个系统功率平衡，运行稳定。两种暂态工况分别为：在 2s 时，VSC2 交流侧发生三相短路故障，0.3s 后，故障切除；4s 时，主站 VSC1 退出运行。

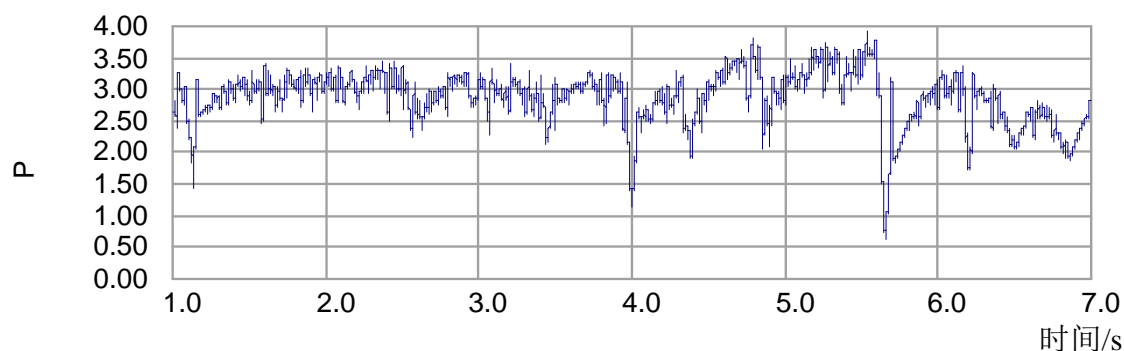


图 3-12 波动源功率

当系统采用不同的控制策略时，在稳态和两种暂态工况下计算各自的直流电压数据（方差和超调量），并进行分析和比较，得出相关结论。

3.4.2 稳态数据分析

稳态时，系统各端功率保持不变，直流电压为 10kV。然而由于系统加入了无规律变化的波动源，其直流电压值也有微小的波动。本小节研究使用了不同控制策略时，直流电压在稳态时的波动情况，用其数据的方差和超调量来表示。

表 3-2 稳态直流电压数据

	偏差	下垂	3 下垂	偏差+下垂
稳态方差	0.00038	0.00026	0.00010	0.00018
稳态超调量	0.00386	0.00226	0.00164	0.00212

由表 3-2 可得结论为：三端下垂的控制方式，各项数据指标最优。

下垂控制方式中，多个换流站同时采用下垂控制器，当系统出现功率频繁波动时，各个换流站可以同时承担起平抑功率波动的任务，按照预先设定的斜率值分配功率余量，使得系统整体的功率趋于稳定，直流电压的控制效果也较好。

同时，参与直流电压控制的换流站越多，直流电压在稳态下性能越好。

这是由于：此种控制方式下，VSC1、VSC2 和 VSC3 三个换流站配备下垂控制器，在直流电压波动的时候，它们均可以根据各自的下垂特性，实时补偿系统的功率缺额，从而达到负反馈的效果，阻止直流电压的继续下降，其 P-U_{dc} 特性曲线类似于发电机的 P-f 频率特性，动作机理亦与一次调频类似。

3.4.3 暂态数据分析

暂态时，伴随着短路、故障等功率频繁变动的情况，直流电压也会有较大的波动。同时由于有波动源的存在，其直流电压值数据也会进一步恶化，需要采取相应的控制策略来应对。本小节研究使用了不同控制策略后，直流电压在暂态时的波动情况，用其数据的方差和超调量来表示。其中 2*代表 2s 短路故障时的数据，4**代表 4s 主站退出运行时的数据。

表 3-3 暂态直流电压数据

	偏差	下垂	3 下垂	偏差+下垂
2*方差	0.04615	0.07573	0.02500	0.01999
2*超调量	0.03308	0.05029	0.02940	0.02777
4**方差	0.13804	0.20185	0.02556	0.04710
4**超调量	0.04974	0.03776	0.01566	0.02292

由表 3-3 可得结论 1 为：VSC3 加入下垂控制后，直流电压各项指标均变优。即三端下垂优于下垂，偏差+下垂优于偏差。

这是由于：系统功率出现缺额时，会引起直流电压的变化，单纯采用偏差控制时，功率的缺额只能由控制直流电压的主站（VSC1）或者从站（VSC2）来补充，这种为了维持直流电压恒定而增（减）发功率的行为反应速度较慢，无法实现快速实时的功率平衡，也就不能很好地控制直流电压。而如图 3-13 所示，VSC3 加入下垂控制后，当功率出现缺额引起直流电压变化时，VSC3 可以迅速反应，根据其下垂系数相应地增（减）发功率，从而使直流电压变化更为平稳，其控制机制如图 3-14。

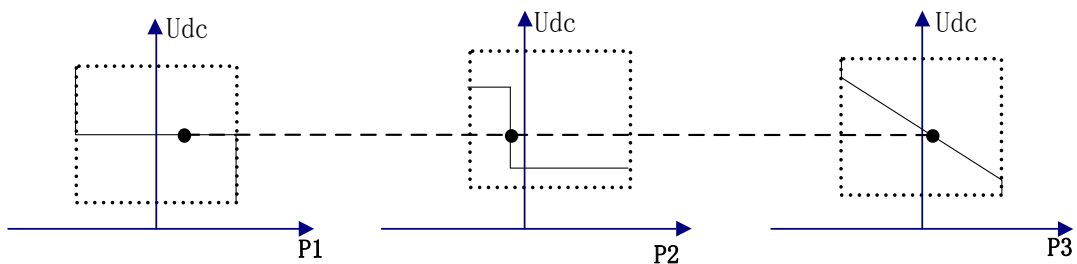


图 3-13 偏差+下垂控制示意图

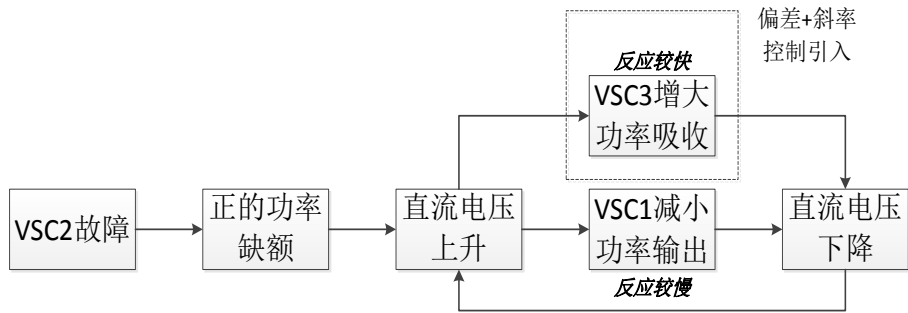


图 3-14 偏差+下垂控制机制图

由表 3-3 可得结论 2 为：2s 短路故障的暂态期间，偏差加下垂控制的直流电压特性优于三端下垂。

这是由于：当负荷功率小范围波动时，系统运行状态平稳，不易出现越限等情况，此时由之前的分析可知，采用下垂控制的效果最好。但是若系统发生较大的扰动，下垂控制器的直流电压会产生较大的偏差量。

综上所述，采用偏差控制的系统，在大扰动时的直流电压控制效果最好。

由表 3-3 可得结论 3 为：4s 主站退出运行期间，3 端下垂控制的直流电压特性最优。

这是由于偏差控制策略存在的相应缺陷：同一时刻，参与直流电压控制的换流站只有一个，其应对恶劣环境的能力较差；因此，当控制直流电压的主换流站 VSC1 退出运行时，从换流站 VSC2 还处在定有功功率控制的模式下，VSC2 需要一定的时间切换至直流电压控制模式，此时系统只有 VSC3 在参与直流电压控制，使系统直流电压数据恶化。同时可以得出结论，参与直流电压控制的换流站越多，直流电压性能越好。

3.5 改进的直流电压混合控制

为解决直流电压下垂控制时，功率波动较大导致直流电压偏差较大的问题，同时基于上述所得出的结论，提出一种改进的底层控制策略，且均基于基本的下垂、偏差控制。图 3-4 的柔性直流输电系统，其中的一端为分布式能源，一端为直流（交流）负荷，余下的三端参与直流电压的协同控制，其各自采取的控制方式如图 3-15 所示。

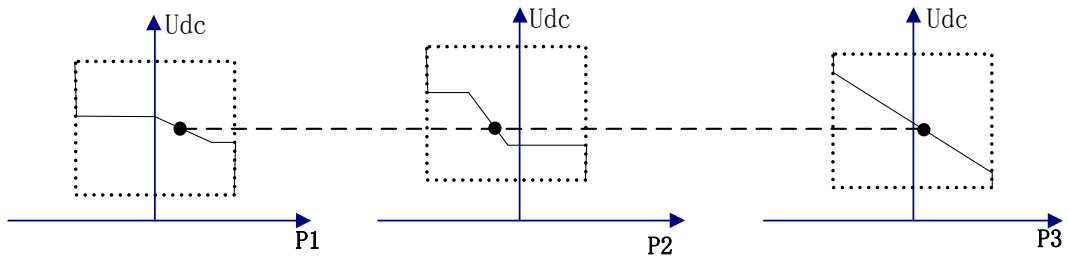


图 3-15 改进的混合控制示意图

如图 3-15 所示，在稳态工况下，VSC1、VSC2 和 VSC3 均采用下垂控制，稳态时应对功率的频繁波动。当功率变化较大时，VSC1 再转为定直流电压控制，减小下垂控制的直流电压偏差量。VSC2 稳态使用下垂控制，可保证 VSC1 退出运行时系统可以平稳过渡。直流电压继续变化时，使用定直流电压控制，保证系统暂态稳定。同时，在各个工况下，各端均参与直流电压控制。

采用和上节相同的仿真过程，通过稳态和暂态的仿真数据，比较上述改进的控制方式和之前 4 种控制方式，所得的直流电压数据如表 3-4 和表 3-5。

表 3-4 稳态直流电压数据

	偏差	斜率	3 斜率	偏差+斜率	改进
稳态方差	0.00038	0.00026	0.00010	0.00018	0.00009
稳态超调量	0.00386	0.00226	0.00164	0.00212	0.00153

表 3-5 暂态直流电压数据

	偏差	斜率	3 斜率	偏差+斜率	改进
2 方差	0.04615	0.07573	0.02500	0.01999	0.00846
2 超调量	0.03308	0.05029	0.02940	0.02777	0.02449
4 方差	0.13804	0.20185	0.02556	0.04710	0.03232
4 超调量	0.13793	0.12049	0.05546	0.05545	0.02091

由表 3-4 和表 3-5 可见，改进的混合控制其直流电压的方差和超调量在稳态和暂态的值均处于较好的水平，取得了预期的控制效果，证明了改进的混合控制的优越性。

3.6 本章小结

在多端柔性直流系统中，对直流电压控制端进行改造，实现多点直流电压控制。利用偏差和下垂两种基本控制，实现了基于换流站的站内混合控制和站间混合控制，通过仿真，验证了控制效果。同时，比较了偏差、下垂和站间混合控制的效果，通

过仿真数据分析，验证了混合控制策略的优越性。最后提出一种改进的站间混合控制，取得了良好的改进效果。

上述分析得出三点结论：

(1) 稳态情况下，小扰动时，使用下垂控制的系统直流电压性能较好。直流配电网中系统惯量小、功率扰动大，下垂控制器可以根据直流电压的微小波动，实时迅速地调整其所发出的功率。因此在正常运行状态时，不使用定直流电压控制，各端采取下垂控制，反而取得很好的控制效果。但是功率变化较大时，直流电压也会产生很大的偏差，下文从底层和上层控制器两个方面解决这个问题。

(2) 暂态情况下，大扰动时，使用偏差控制的系统直流电压性能较好。因此，可以考虑在下垂控制器中，加入偏差控制，在直流电压偏差过大后将其限制在较为合适的水平，从而保证系统的暂态稳定性。

(3) 同一时间参与直流电压控制的换流站越多，直流电压在稳态下性能越好。

同时可以得出各端控制方式选取原则：1) 所有换流站尽可能都参与直流电压控制。2) 稳态，各个换流站均使用下垂控制，其功能类似于交流系统中的一次调频发电厂。3) 当主站(G-VSC1)和从站(G-VSC2)使用定直流电压控制时，其功能类似于交流系统中的二次调频发电厂，这种调节的换流站必须满足一定的要求，诸如，调整容量足够大，调整速度足够快，调整范围内其经济性能较好，调整时不至于引起换流站内部和相互间工作的困难。系统容量较大，调节性能较好，响应速度较快的换流站作为主换流站。

本章的各项数据分析和结论为后续的底层多换流器的电压协同控制策略的提出提供了基本的依据和支撑；同时提出的一些控制方式的缺陷，在上层控制中进行改善。

第4章 底层控制：电压协同控制策略

多端柔性直流系统用于直流配电网时，由于组成元件增多，电网拓扑和运行方式更具多样性，其控制系统更加复杂。

直流配电网中系统惯量小、功率扰动大、可控端多，设计具有高可靠性的直流配电网多节点电压协同控制策略是本课题的难点之一。根据各端电源、负荷和储能等单元的运行特性，设计多端换流站的分散自律控制策略。如下文介绍所示：各端不同类型的换流器根据直流母线电压偏差大小自动进行协同控制，通过快速的一次调压控制弥补系统惯性小的缺点，确保直流电网在各种模式下的稳定运行，并且该控制策略不依赖于通讯、不受换流站数目影响，具有较高的可靠性。

4.1 模型概述

直流配电网的拓扑结构，主要有放射状、环网和两端配电三种^[9]，本文采用两端配电的拓扑结构，设置其电压为 10kV，其结构如图 4-1 所示，包含以下几部分组成：

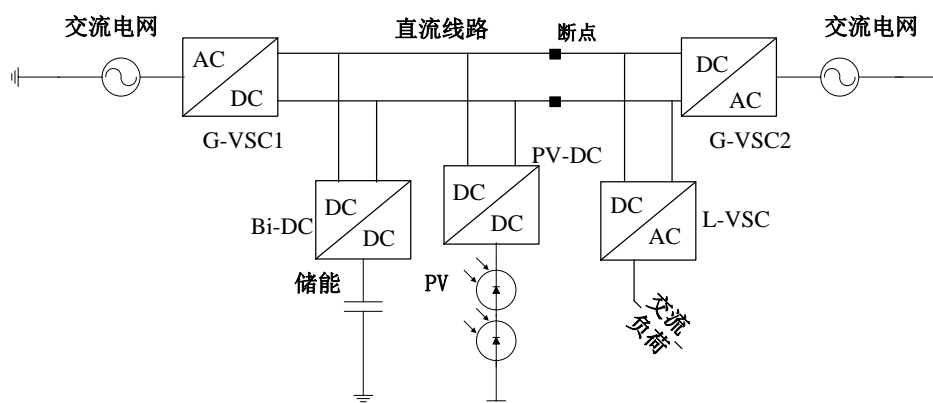


图 4-1 多端柔性直流配电网系统模型图

1) 分布式发电单元：采用光伏电池，通过 PV-DC 并入直流电网。光伏组件正常运行时工作于最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方式，以尽可能多的捕捉太阳能，但在电压上升较多时需要降功率运行。

2) 储能单元：采用蓄电池储能(battery energy storage, BES)，通过 DC/DC 换流器 Bi-DC 并入直流电网。直流电网正常稳定运行时，蓄电池功率为零。电压波动较大时，BES 单元将参与直流电压的调节。

3) 负荷单元: 交流负荷通过换流器 L-VSC 并入直流网络。

4) 联网换流器: 直流电网通过换流器 G-VSC 并入交流电网。正常运行时该换流器参与直流电压控制。系统功率变化较大时, 会达到功率极限转为定功率控制。

4.2 控制模式切换的指令及滞环原理

由于直流配电网频繁的功率扰动, 容易造成直流电压的变化。为了防止换流站在直流电压临界值附近频繁切换控制模式, 设置带有滞环控制的指令值 S , 根据直流电压的变化进行赋值^[45]。

直流电压阈值与控制模式切换的指令的关系如图 4-2 所示。图 4-2 (a) 表示直流电压由 10kV 下降时, 下降到 9.8kV 后 S 由 0 切换为 1, 继续下降到 9.5kV 后 S 由 1 切换为 3; 相对应的, 直流电压由 9kV 开始上升时, 上升到 9.55kV 后 S 由 3 切换为 1, 继续上升到 9.85kV 后 S 由 1 切换为 0。

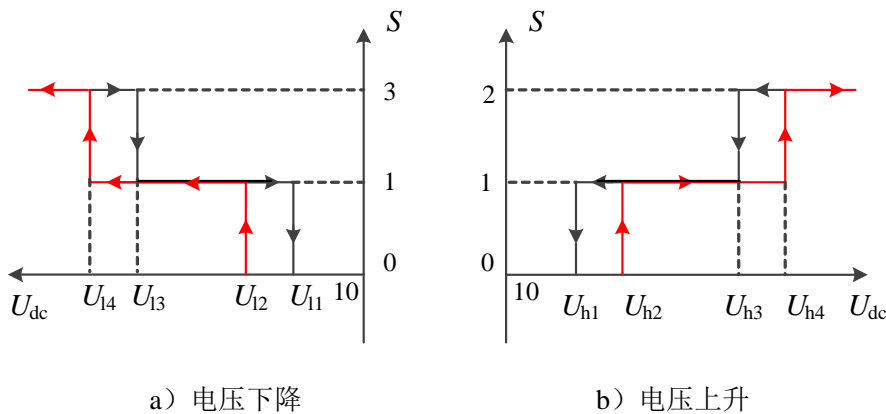


图 4-2 直流电压阈值与控制模式切换的指令的关系示意图

根据文献[45]的直流电压阈值的确定方法, 并结合系统对直流电压稳定运行的要求, 选取直流电压上升时阈值的典型值为 1.02pu 和 1.05pu, 直流电压下降时阈值的典型值为 0.98pu 和 0.95pu, 并选取相应的滞环值与其配合。

4.3 电压协同控制策略

4.3.1 基于指令值的控制策略表

为应对系统的不同运行状态, 各个换流站需要相互配合, 其控制思路如图 4-3 所示。各个换流站检测直流电压变化前后的值, 根据图 4-2 直流电压阈值与控制模式切换的指令的关系求得指令值 S , 各个换流站根据指令值及本文设计的控制策略

表(表 4-1) 切换控制模式。同时,控制模式切换的指令值 S 也用在了上层控制中,成为了联系底层和上层控制的信息量。

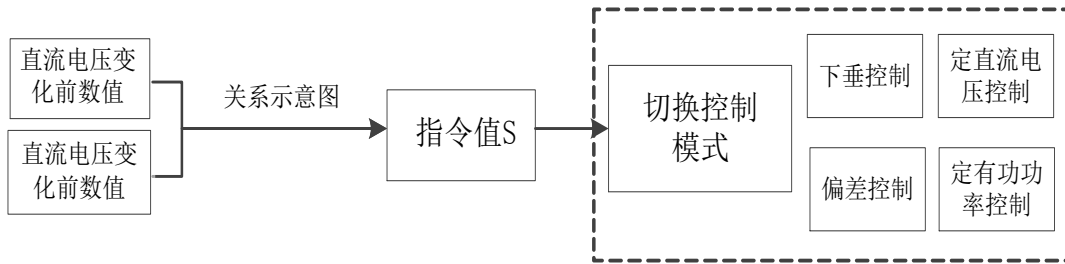


图 4-3 带有指令值 S 的控制思路示意图

直流配电网中,系统的直流电压是其稳定运行的关键^[17,46]。本文提出分段控制的电压协同控制策略,不同的直流电压运行范围对应着各自的区间。在控制区间中合理设置换流器的控制方式以使系统直流电压保持稳定,同时每个区间内至少有一端换流器控制直流电压以维持系统内部功率平衡。

各个换流站根据直流电压变化量得出指令值 S 后,运行对应的控制器,其控制策略的实现方法见表 4-1,其中直流电压单位为 kV。

表 4-1 各端控制策略表

S	ΔU_{dc}	G-VSC1	G-VSC2	储能	光伏	负荷
0	$\Delta \leq 0.2 $	下垂	下垂	零功率	最大功率	定交流电压
1	$ 0.2 \leq \Delta \leq 0.5 $	下垂	限功率	下垂	最大功率	定交流电压
2	$\Delta \geq 0.5$	限功率	限功率	限功率	定直流电压	定交流电压
3	$\Delta \leq -0.5$	限功率	限功率	限功率	最大功率	切负荷
4	系统故障	切换控制模式或者修改参数值等故障控制策略				

直流配电网中各端通过测量直流电压的值,执行如上的策略表,参与系统整体的协同控制。该控制策略的各个换流站控制运行相互独立且反应动作快,能根据系统运行的变化实时调整,且无需通信,达到了分散自律,多点协同的特点。

同时,在控制策略中引入指令值 S ,不止能在底层分散自律的控制策略表中发挥作用,当系统出现短路、断线等故障或者功率大幅波动时,单纯采用控制策略表去控制直流电压稳定已经变得很困难,此时需要上层控制器中加入相应的故障模块。其功能为检测系统故障情况或者大的功率波动,通过一定的算法或者人工操作,生成对应的模式切换指令值 S ,并将其送至各个换流站,使各个换流站强行切换控制模式或者修改参数值,从而保证系统在暂态情况下的直流电压稳定性。

本文测试了在多端柔性直流配电系统中,中间线路断开后,换流站 G-VSC1 和换流站 G-VSC2 分别组成两个独立的系统时系统采取的控制策略。经过上层控制器

的计算,指令值 S 变为 4,此时换流站 G-VSC1 和换流站 G-VSC2 均使用下垂控制,指令值 S 控制其有功功率基准值发生变化,使各自系统的有功功率平衡,直流电压保持稳定。

4.3.2 电压分段控制特性

基于换流站 P-Udc (P 为换流器直流功率, Udc 为换流器直流电压) 曲线,对直流电压协同控制策略的各个区间的运行状况进行说明:

图 4-4 为本文提出的直流电网的电压分段控制特性图,分别为 G-VSC1、G-VSC2、Bi-DC、PV-DC 和 L-VSC 在不同控制区间下的控制特性,图中黑点表示各端工作在最佳状态,此时直流电压 $U_{dc}=10\text{kV}$, $\Delta U_{dc}=0$ 。P1、P2、Pev、Ppv 和 PL 分别表示 G-VSC1、G-VSC2、Bi-DC、PV-DC 和 L-VSC 的功率。功率为正表示各个换流站向直流电网输入功率。下面具体介绍各段控制情况及各端换流器的控制方式。

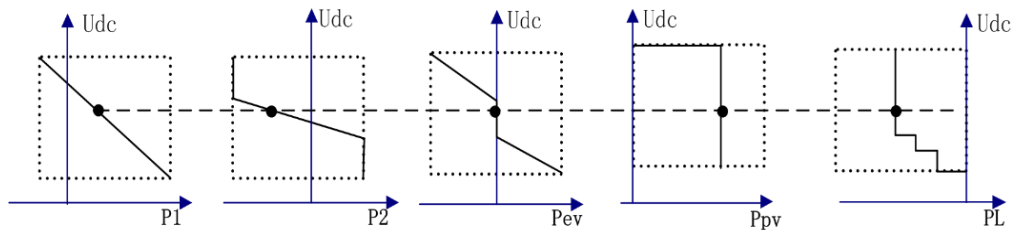


图 4-4 电压分段控制特性图

第 1 区间 ($S=0$) 下直流电压的变化范围是 $|\Delta U_{dc}| \leq |0.2|$ 。此区间内,系统处于稳态。光伏单元进行最大能量跟踪,发出尽可能多的电能,系统保证分布式能源的最大利用率。蓄电池为防止频繁动作损坏蓄电池寿命,在充电后保持零功率。

直流配电网中负荷变动频繁,功率时刻在波动,下垂控制可以实时监测系统功率变化,调整其直流功率,保持直流电压的稳定。因此,在稳态时, G-VSC1 和 G-VSC2 使用下垂控制。

第 2 区间 ($S=1$) 下直流电压的变化范围是 $|0.2| \leq \Delta U_{dc} \leq |0.5|$ 。此区间内,光伏依旧保持最大的电能输出。

由于直流电压偏差量的变大,单纯由 G-VSC1 和 G-VSC2 用下垂控制来控制直流电压,已无法满足直流配电的运行要求。此时,蓄电池具有充足的能量裕度,有足够的能量吸收和释放能量,此时,蓄电池按照下垂控制特性来参与直流电压控制。其中 G-VSC2 由于其换流器容量限制和系统控制要求,达到了其最大容量,转变为限制功率控制方式。

第 3 区间 ($S=2$) 下直流电压的变化范围是 $\Delta U_{dc} \geq 0.5$ 。此区间内,系统由于发

电功率过大或者负荷较少等原因出现了功率过剩，此时储能无法全部吸收所剩功率，导致直流电压的升高。

此时，单纯由各个换流站切换控制方式已经无法控制直流电压在限定的范围内，需要光伏采取降功率措施，控制方式也变为定直流电压控制，将直流电压稳定在 10.5kV，保证了系统的稳定运行。

第 4 区间 ($S=3$) 下直流电压的变化范围是 $\Delta U_{dc} \leq -0.5$ 。此区间内，系统由于负荷需求功率过大，而发电单元、储能和联网换流器均无法满足，使得系统出现了功率缺额，导致了母线直流电压的上升。

此时，直流电压下降过低，继续由其他换流站采用基本控制方式来稳定直流电压已经变得很困难，为防止直流电压的崩溃，需要采取切负荷措施，按照负荷的优先级，依次切除不重要负荷和重要负荷，直到直流电压回到稳定区间内。

4.4 仿真验证

为试验该电压协同控制策略的有效性，在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 4-1 所示的系统，其中光伏额定条件下时功率为 8MW，此时光照为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，温度为 25 度。换流站 G-VSC1 的额定功率为 6MW，功率极限为 8MW；换流站 G-VSC2 的额定功率为 4MW，功率极限为 5MW。负荷正常状态下容量为 6MW。直流母线电压为 10kV。

下面给出该控制策略的仿真结果，分为正常运行模式 ($S=0$)、电压升高模式 ($S=1$ 、2)、电压降低模式 ($S=1$ 、3) 和中间线路断线 ($S=4$)。仿真结果中各个换流器的输出功率为正表示换流器向直流电网输入功率。

4.4.1 电压升高模式

图 4-5 给出了在电压上升模式下，直流电压和各端换流器有功功率的变化过程，电压单位为 kV，功率单位为 MW。仿真开始时，光伏单元的光照为 $500\text{W}/\text{m}^2$ ，温度为 25 度，向直流电网输出功率 P_{pv} 为 4MW，G-VSC1 输出功率 P_1 为 6MW，G-VSC2 吸收功率 P_2 为 4MW，储能处于备用状态，功率 P_{ev} 为 0，负荷功率 P_L 为 6MW。整个系统处于正常状态，供需平衡，直流电压为 10kV， $S=0$ 。

3s 时，光照增加到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏输出功率随之增加至 8MW，多余的功率 4MW 流向直流电网，引起了直流电压的升高，但不高于 10.5kV。随着直流电压的升高，超过了动作阈值 10.2kV，使得 S 变为 1，储能开始启动，按照下垂特性吸收能量。同时，两个 G-VSC 也根据各自的下垂特性去吸收光伏多发的功率。

7s 时，切除一半的负荷容量，使得负荷的功率由 6MW 降低为 3MW，系统出现了 3MW 的功率富余，直流电压进一步升高，超过了 10.5kV，S=2。此时，若不采取相应的控制策略，直流电压将会升高较多，如图 4-6 中上方的波形所示。

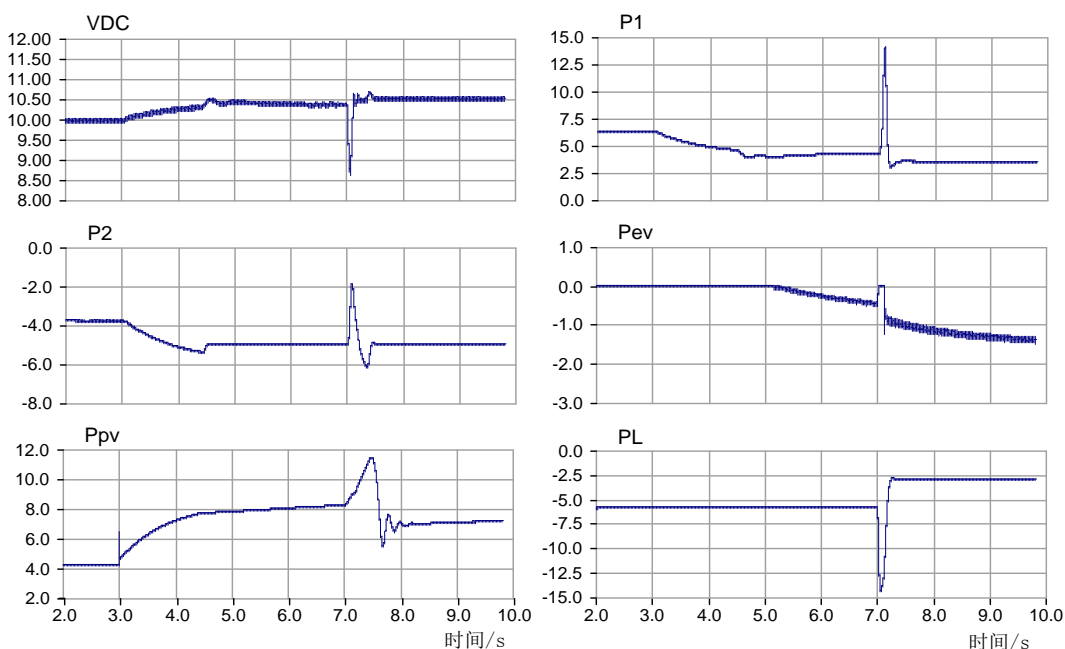


图 4-5 电压上升模式的波形图

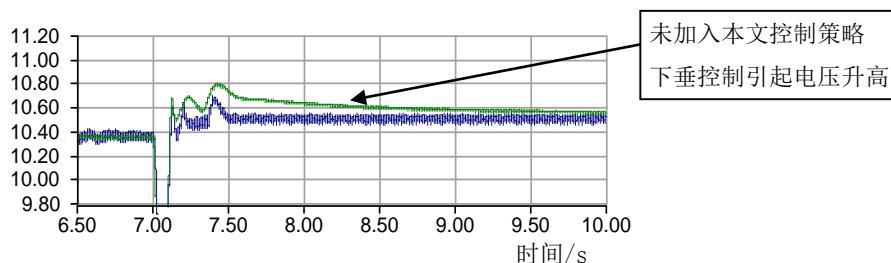


图 4-6 加入控制策略前后直流电压波形对比图

此时光伏电池不再处于最大能量跟踪状态，为了使直流电压限制在 10.5kV 而主动降低功率运行，光伏单元转为定直流电压控制。同时，两个 G-VSC 根据自己的下垂特性吸收部分富余功率。G-VSC2 由于达到其功率极限 5MW，而转为极限功率控制。此时，直流电压较原始的下垂控制方式有了较大改善，7s-8s 内的动态波动量和 8s 后的稳态偏差值均得到了减小，如图 4-6 中的曲线所示。

图 4-5 和图 4-6 说明，当采用所提出的协同控制策略时，在直流电压上升时，系统可以保持直流电压在合理的运行区间内，相比较下垂控制有了改进，整个系统保持稳定。

4.4.2 电压降低模式

图 4-7 给出了在电压降低模式下,直流电压和各端换流器有功功率的变化过程,电压单位为 kV,功率单位为 MW。仿真开始时,光伏单元的光照为 $1400\text{W}/\text{m}^2$,温度为 25 度,向直流电网输出功率 P_{pv} 为 9.5MW, G-VSC1 输出功率 P_1 为 6MW, G-VSC2 吸收功率 P_2 为 4MW,储能处于备用状态,功率 P_{ev} 为 0,负荷功率 P_L 为 11.5MW。整个系统正常状态供需平衡,直流电压为 10kV, $S=0$ 。

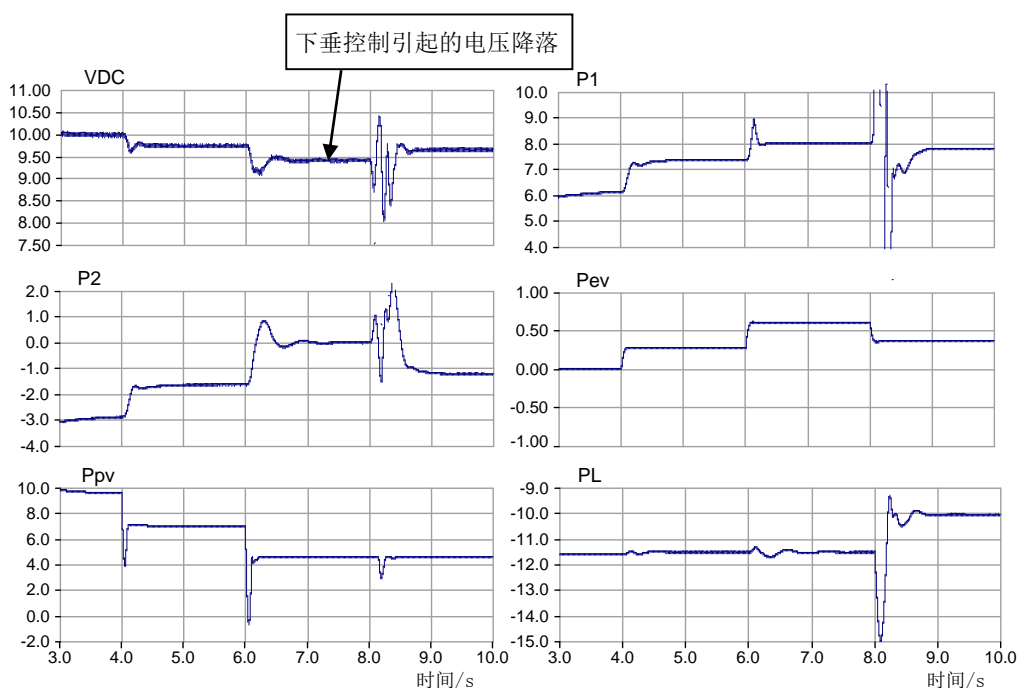


图 4-7 电压下降模式的波形图

4s 时,光照减小到 $900\text{W}/\text{m}^2$,光伏输出功率随之降低到 7MW,使得直流电网的流入功率减少,直流电压降低,但不低于 9.5kV。随着直流电压低于动作阈值 9.8kV, $S=1$ 。此时,储能开始放电,补充系统的能量缺额。同时,两个 G-VSC 使用下垂控制器去补充缺少的注入功率。

6s 时,光照继续降低为 $550\text{W}/\text{m}^2$,光伏输出功率随之降低至 4.5MW,使得直流电网的流入功率进一步减少,直流电压降低到 9.4kV,低于 9.5kV, $S=3$ 。此时若不采取相应的控制策略,由于下垂控制器的特性,直流电压将会有较大的偏差值,如图 4-7 中 7s-8s 内直流电压波形所示。

此时由于直流电压下降过多,8s 时,系统发出切负荷指令,负荷功率 P_L 降低至 10MW,系统重新在直流电压为 9.65kV 时达到了功率平衡, S 重新切换为 1,直流电压较 7s-8s 内的值有了提高,改善了采用原始的下垂控制时的直流电压特性。

同时，G-VSC1 和储能根据自己的下垂特性增发功率，G-VSC2 根据下垂特性减少功率的吸收量，使系统的功率达到平衡。在 7s-8s 期间，由于电压降低过多，G-VSC1 增发功率到极限功率 8MW，而转为极限功率控制。

图 4-7 说明，当采用所提出的协同控制策略时，在直流电压降低时，系统可以保持直流电压在合理的运行区间内，整个系统保持稳定。

4.4.3 中间线路断线

图 4-8 给出了中间线路断线时，两端直流电压、中间线路功率和指令值的变化情况，电压单位为 kV，功率单位为 MW。如图 4-8 所示， P_{mid} 为断点所在线路的功率，当系统的中间联络线在断点处断开时时，整个系统将隔离为两个单独的系统，分别为 G-VSC1、光伏 PV 和储能组成的系统 1，其 G-VSC1 出口直流电压为 VDC1；G-VSC2 和负荷组成的系统 2，其 G-VSC2 出口直流电压为 VDC2。其中，VDC1 原始波形和 VDC2 原始波形为未采用本文控制策略时的直流电压波形，较稳态电压值 10kV 均出现了大幅度的偏差。

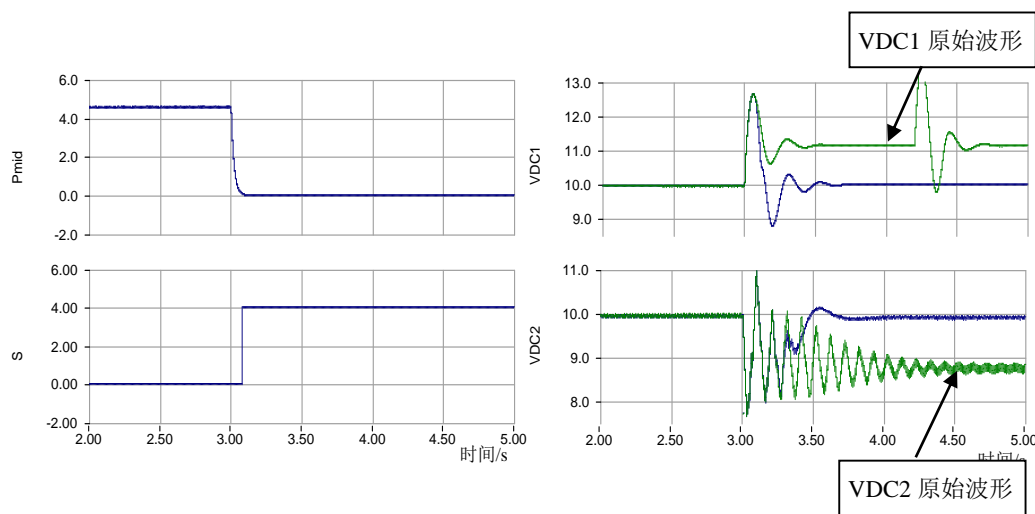


图 4-8 中间线路断线的波形图

此时，采用下垂控制的换流站 G-VSC1 和 G-VSC2 的有功功率基准值，需要根据本独立系统的功率分布情况做出改变。其中，上层控制器通过检测断点所在线路的传输功率 P_{mid} ，3s 时发现其降低至几乎为 0 时，改变模式切换指令值 S ， S 由 0 变为 4，并传递给换流站 G-VSC1 和 G-VSC2，使其改变各自控制器的有功功率基准值，从而使系统功率平衡，直流电压稳定。由图 4-8 可知，新的运行方式下，由于加入了相关的控制和算法，两个独立系统直流电压 VDC1 和 VDC2 都运行在了设定值 10kV，较各自的原始波形有了很大改善，如图 4-8 所示。

可见，在上层控制器和指令值 S 的配合下，系统针对断线故障有较好的应对能力，可以维持直流电压在设定值，保证系统的稳定性。

4.5 本章小结

(1) 本文研究了直流配电网的系统构造和相关的控制特点，针对性地提出了应用于直流配电网的电压协同控制策略。其中，创新性地提出了控制模式切换的指令值 S 。根据直流电压所处的范围和变化趋势，换流站自动生成相应的指令值，指令值改变控制器的参数和控制方式，成功实现了控制模式的平稳过渡，使得系统在各个直流电压区间内均有对应的换流站参与直流电压控制，维持系统功率平衡。

(2) 计算指令值的过程中，引入滞环控制，避免了各端换流站模式切换的频繁动作。同时，在各个换流站中采用下垂控制器来参与系统直流电压控制。针对直流配电网的特点，通过让多个换流站共同参与直流电压的控制，来应对功率的频繁波动，从而在不需要通讯的条件下，直流电压在各个工况下都取得了良好的控制效果。同时，指令值 S 和相关控制算法的加入，使得系统在恶劣情况下，功率大幅度变化时也有良好的控制效果。

第5章 上层控制

5.1 引言

在实际运行中，直流配电网的运行受到多方面的考验：分布式能源功率的频繁波动，负荷功率频繁变化，一个或者多个换流站故障停运和线路断线等等情况，其中的一些工况将会引起系统工作点的巨大变化，导致系统停运等恶劣后果。此时，单纯采用底层多换流器的电压协同控制策略已经无法保证系统安全稳定运行，需要基于换流器间通讯和调度的上层控制参与系统的电压控制。

上层控制是直流配电网分层控制体系的最高层控制。主要分为三个部分：集中控制、电压优化和故障控制。集中控制类似于交流输电系统的调度系统，监视系统的运行数据，负责保证系统整体的可靠性和经济性，通过一定的模型计算系统的各项指标，通过一定的算法调节潮流分布，使系统时刻保持最优的运行状态。电压优化就是二次调压，建立系统网损最低、电压偏差量最小的目标函数，并建立系统潮流方程和约束方式，通过一定数值算法求解最优解，生成对应的数据基准值下发给底层控制，给各个换流器的控制器执行。故障控制主要是生成满足 N-1 准则，换流站设备容量和直流电压允许运行范围内的电压和功率等数据的基准值，保证系统在换流站退出和线路故障等暂态情况下可以保持一定的稳定状态运行，直到系统恢复正常状态。

上层控制的三个部分均需要时刻监视系统运行状态，获得实时的运行数据，以便在各种恶劣工况下及时响应。同时，通过上层控制策略生成对应的数据基准值、控制方式切换指令和启动关停指令等信号，需要传递给底层控制的各个换流站去执行，因此对通信有着一定的要求，需要上下层之间信息的互动传播。

5.2 二次调压

5.2.1 二次调压基本概念

直流配电网的一次调压可采取多点下垂控制方式，维持系统的实时稳定运行，本文之前章节的电压协同控制方式均属于一次调压，为底层控制层。但是当系统内的潮流发生变化时，直流配电网不能保持最优潮流运行，需要二次调压进行优化控

制。二次调压属于上层控制层。

二次调压的优化目标主要有网损优化、电压不平衡度优化、以及网损与电压综合优化等。文献[47, 48]对直流配电网的网损优化进行了研究，提出了一种电压分层控制策略，一次控制采用电压下垂控制，二次控制以网损最小为优化目标，通过潮流优化算法周期性的更新一次控制中的相关参数，文献[49]对直流配电网的优化调度方法，提出了相关调度策略，并建立了综合考虑运行成本、环境效益以及系统损耗的多目标优化调度模型，但对于直流配电网的一次调压和二次调压之间的配合没有进行深入研究。文献[50]针对采用主从控制的直流配电网，提出了网损和电压不平衡度指标研究分布式能源接入对直流配网潮流的影响，以网损和电压不平衡度为目标函数建立了直流配电网的 OPF 模型，但对于底层控制采用多点下垂控制的直流配电网的优化有待进一步研究。

5.2.2 电压优化运行分析

当直流配电网中一次调压采用多点电压下垂控制策略时，参与一次调压的各端换流站利用下垂控制的特性，能够实时快速的响应系统内的功率平衡，具有很强的调节能力，且不需要站间通信。但是传统的电压下垂控制存在相应的问题，当系统内发生较大功率波动时，容易导致过电压的发生。由于直流配电网内传输线路阻抗的存在，因此系统内的各端换流站直流侧电压不可能同时都达到额定电压。因此为了减少由于一次调压引起的电压偏差，本文采取的二次调压的目的是实现系统内各端换流站的总直流电压偏移最小。

在直流配电网中，根据直流电压和有功功率的情况可以将节点分为两类：一类是 P 节点，有功功率已知而直流电压未知（换流站采用有功功率控制方式）；一类是 V 节点，电压已知而有功功率未知（换流站采用电压控制方式）。那么，直流配电网内的状态变量 X 可以定义为 P 节点的直流电压，控制变量 U 定义为 V 节点的直流电压，固定变量 W 定义为 P 节点有功功率。明确了节点类型和变量定义后，二次调压的目标可以用式(5-1)-(5-4)来描述：

$$\min f(X,U) \tag{5-1}$$

满足等约束条件和不等约束条件：

$$g(X,U,W)=0 \tag{5-2}$$

$$V_{dc \min} < V_{dc,i} < V_{dc \max} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{5-3}$$

$$|P_i| < P_{i, \max} \quad i = m+1, m+2, \dots, n \tag{5-4}$$

二次调压的目标函数和约束问题解释如下：

在(5-1)中，目标函数 $f(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ 表示直流配电网中各节点直流电压偏离额定电压的差值的平方和：

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = (U_N - U_1)^2 + \dots + (U_N - U_n)^2 \quad (5-5)$$

其中， U_N 为直流配电网的额定电压。

式(5-1)中 \mathbf{X} 表示直流配电网中 P 节点的直流电压向量， \mathbf{U} 表示直流配电网中 V 节点的直流电压向量，分别表示为：

$$\mathbf{X} = [V_{dc,1}, V_{dc,2}, \dots, V_{dc,m}]^T \quad (5-6)$$

$$\mathbf{U} = [V_{dc,m+1}, V_{dc,m+2}, \dots, V_{dc,n}]^T \quad (5-7)$$

其中，下标 m 表示 P 节点的个数， n 表示系统内总节点数。

等式约束条件(5-2)代表了 P 节点处有功功率的平衡，表示为：

$$g(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = [g_1, g_2, \dots, g_m]^T \quad (5-8)$$

$$g_i = P_{Gi} - P_{Li} + \sum_{j=1}^n G_{ij} V_i V_j \quad (5-9)$$

其中， P_{Gi} 和 P_{Li} 分别表示节点 i 的发电功率和负荷功率， G_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的电导。

不等约束条件(5-3)、(5-4)分别表示直流电压的限制和换流站交换功率的限制。式(5-3)中 V_{dcmax} 和 V_{dcmin} 表示参与二次调压的各端换流站的直流电压的上下限值，式(5-4)中 $P_{i,max}$ 表示参与二次调压的换流站交换功率的限值。

由式(5-1)-(5-4)表示的直流配电网最优潮流问题实质上是一个非线性规划数学优化问题，可以用简易梯度法来求解。运用拉格朗日乘数法，根据已知的目标函数和约束条件建立新的目标函数，即拉格朗日函数：

$$L(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) + \boldsymbol{\lambda}^T g(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) + q(\mathbf{V}, \mathbf{P}) \quad (5-10)$$

其中， $\boldsymbol{\lambda}$ 是与等约束条件(5-2)相关的拉格朗日乘数向量； $q(\mathbf{V}, \mathbf{P})$ 是针对不等式约束条件(5-3)、(5-4)引入的罚函数，表示为：

$$q(\mathbf{V}, \mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n r_{max,i} (V_i - V_{dcmax})^2 + \sum_{i=1}^n r_{min,i} (V_i - V_{dcmin})^2 + \sum_{i=1}^n r_{P,i} (P_i - P_{i,max})^2 \quad (5-11)$$

其中， $r_{max,i}$ 、 $r_{min,i}$ 、 $r_{P,i}$ 分别是关于直流电压上限、直流电压下限、换流器功率限值的罚因子。

如果一个变量满足不等约束条件，则相应的惩罚项为 0；否则，相应的惩罚项不为 0。然后，由式(5-10)可得：

$$\begin{cases} \nabla L_x = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} + \left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{X}} \right]^T \lambda + \frac{\partial q}{\partial \mathbf{X}} = 0 \\ \nabla L_u = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{U}} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{U}} + \left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{U}} \right]^T \lambda + \frac{\partial q}{\partial \mathbf{U}} = 0 \\ \nabla L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = 0 \end{cases} \quad (5-12)$$

用简化梯度法求解最优潮流的步骤如下：

- (1) 设定控制变量的初值 $\mathbf{U}^{(0)}$ ；
- (2) 求解基本潮流方程 $\nabla L_\lambda = g(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = 0$ ；
- (3) 由(2)中计算所得的状态变量 \mathbf{X} ，求得： $\mathbf{J} = \partial g / \partial \mathbf{X}$ ，代入 $\nabla L_x = 0$ ，求得：

$$\lambda = -[\mathbf{J}^T]^{-1} \left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial q}{\partial \mathbf{X}} \right]$$
；
- (4) 利用(3)中所得 λ 求解 ∇L_u ；
- (5) 判断是否达到精度要求，即如果 $|\nabla L_u| \geq \varepsilon$ ，则进行下一步，否则迭代停止，优化完成；
- (6) 修正控制变量： $\mathbf{U}^{(k+1)} = \mathbf{U}^{(k)} - \beta |\nabla L_u|$ ，返回至第(2)步，继续计算，其中 β 为迭代步长。

5.2.3 计算验证

下面利用如图 5-1 的四端直流系统验证该算法的正确性。换流站各自采用的控制方式为：G-VSC1 和 G-VSC4 采用定有功功率控制，G-VSC2 和 G-VSC3 采用下垂控制。

该系统的主要参数如下：额定直流电压为 20kV。G-VSC1 的额定容量为 10MW，吸收功率 5MW。G-VSC2 的额定容量为 10MW，吸收功率 2.5MW。G-VSC3 的额定容量为 20MW，下垂系数为 0.1，G-VSC4 的额定容量为 20MW，下垂系数为 0.1。直流线路的单位长度电阻 $r_0=0.0139\Omega/\text{km}$ ，单位长度电感 $l_0=0.159\text{mH}/\text{km}$ ；直流线路 $l_{12}=10\text{km}$ ， $l_{13}=15\text{km}$ ， $l_{24}=5\text{km}$ ； $l_{34}=10\text{km}$ 。

G-VSC3 和 G-VSC4 换流站的下垂特性方程分别为：

$$\begin{aligned} U_{dc3} &= 10 - 0.1P_3 \\ U_{dc4} &= 10 - 0.1P_4 \end{aligned} \tag{5-13}$$

其中， U_{dc3} 和 U_{dc4} 分别为 G-VSC3 和 G-VSC3 的换流器直流侧出口电压， P_3 和 P_4 分别为 G-VSC3 和 G-VSC3 的直流侧功率。

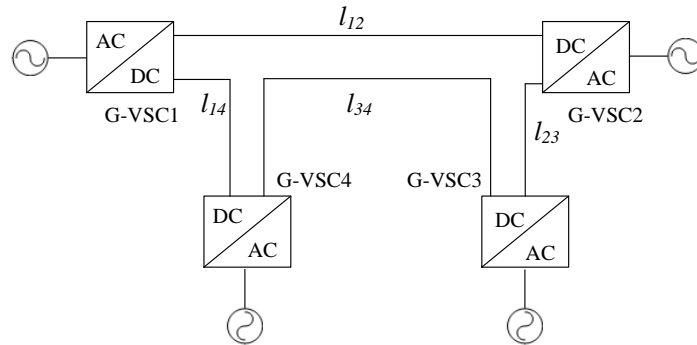


图 5-1 四端直流系统结构图

利用 matlab 软件计算，按照公式(5-5)、(5-9)、(5-3)和(5-4)分别列出方程组的目标函数、等式约束和不等式约束，同时列出下垂控制换流站的下垂特性方程(5-13)，对二次调压优化前后的直流电压偏差值进行对比分析，如表 5-1 所示。规定换流站的传输功率以流向直流配电网为正方向。其中 U_{dc1} 、 U_{dc2} 、 U_{dc3} 、 U_{dc4} 分别为换流站 G-VSC1、G-VSC2、G-VSC3 和 G-VSC4 出口侧的直流电压， P_2 和 P_3 分别为换流站 G-VSC2 和 G-VSC3 的有功功率，偏差值为根据公式(5-5)的出的直流电压数据。

由表 5-1 可知，采用该算法，可以求出满足各项约束并使直流电压偏差最小的直流电压数据。利用求得的直流电压和有功功率的数据，修改对应控制器的参数，即可达到本节所设计的控制效果。其中电压单位为 kV。

表 5-1 优化前后的数据对比分析表

	U_{dc1}	U_{dc2}	U_{dc3}	U_{dc4}	P_2	P_3	偏差值
优化前	21	21	21	21	5	2.5	4
优化后	20.0209	19.9992	20.0014	20.0057	5.0083	2.4858	0.0004

5.3 基于功率基准值的控制策略

直流电压下垂控制的主要缺点是当功率变化较大时，直流电压也会有很大的偏差值，控制效果会变差。因此需要上层控制器的参与直流电压控制，通过改变功率

基准值 P_{ref} 和模式切换的指令来协调直流电压的控制。

下图 5-2 的下垂控制器中，对 G-VSC1 和 G-VSC2 的功率基准值 P_{ref} 进行重新计算，加入了修正量 $dP1$ ，其算法为： $dP1=K_1*dP$ ， $dP1=K_2*dP$ ，其中 dP 为系统整体的功率缺额值， $dP1$ 和 $dP2$ 分别为 G-VSC1 和 G-VSC2 的功率基准值变化量。

G-VSC1 和 G-VSC2 不仅根据下垂特性来平衡功率的变化量，而且由上层控制计算其他换流站的功率改变量 dP ，当发现 dP 值过大时，则根据一定的比例系数去改变功率基准值 P_{ref} ，从而对换流站的稳定工作点重新定位。通过功率的重新分配，实现直流电压的更小偏移量。其比例系数，根据各站的功率调节能力，功率容量，各个站之间相互配合来确定。该控制器的结构如图 5-2。

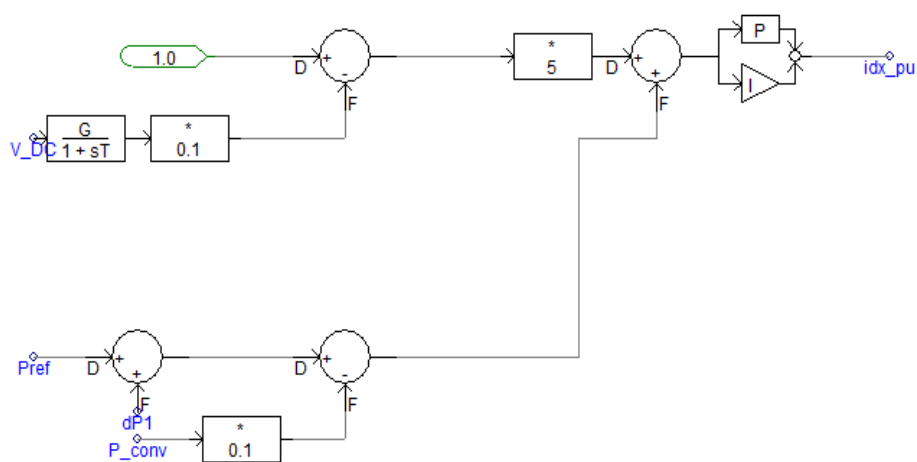


图 5-2 变功率基准值控制器

下面对该控制方式进行仿真分析：

测试图 4-1 所示的系统中在应用所提出的变功率基准值控制器是否具备良好动态特性。系统的初始运行点为的稳态运行点，其直流电压为 10kV。其中，换流站 G-VSC1 和 G-VSC2 底层控制策略采用下垂控制，并引入了本节中叙述的变功率基准值控制器。测试的仿真条件为：2s 时系统减负荷，负荷容量由 6MW 减少到 3MW。

图 5-3 给出了 G-VSC1 侧直流电压的仿真波形，电压单位为 kV。其中 VDC 为采用初始的下垂控制器的直流电压，VDC_1 为变功率基准值的下垂控制器的直流电压。

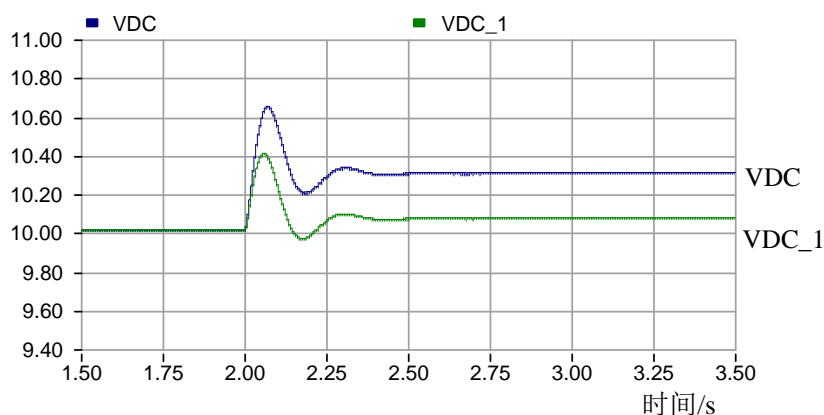


图 5-3 基于功率基准值的控制仿真波形

2s 时，系统负荷增大，出现功率缺额，此时 G-VSC1 和 G-VSC2 底层控制策略采用初始的下垂控制时，稳态后直流电压有较大偏移量。当上层控制器中加入变有功功率基准值后，直流电压波动更小，稳态的偏移量也更小。由图 5-3 的仿真波形可知，该控制思路达到了更好的直流电压控制效果。

5.4 基于模式切换的控制策略

5.4.1 基于指令值 S 的模式切换

针对上文提到过的直流配电网的特征，对控制系统可以做出如下改进：控制直流电压端口不是一成不变的，在不同时段选择一个端口作为电压调节端口，这个端口在每个时段可以是不同的。同时，针对主控制站退出运行时，若系统采用的下垂控制不采取相应改变，会引起直流电压很大的偏差量。因此暂态时选择一个稳定直流电压的换流站显得尤为重要。

对于正常稳定状态只有一个站 G-VSC1 控制直流电压（采用定直流电压控制或者下垂控制），此时 G-VSC2 采用定有功功率控制或者下垂控制时，正常状态时直流电压可以运行在设定值上。但是当 G-VSC1 故障或者退出运行时，系统失去了直流电压的主控制站，如果 G-VSC2 继续采用原有的控制方式，可能导致直流电压失控（G-VSC2 采用定有功功率控制）或者出现较大的偏移量（G-VSC2 采用直流电压下垂控制）。

因此，采取一定的措施，使换流站 G-VSC2 在主站退出运行时，切换控制方式，显得很有必要。在上层控制器中加入主站退出运行时的控制模块，可以检测主站 G-VSC1 的运行状态，一旦发现主站退出运行，就改变上一章节提出的控制模式切换的指令值 S，使从站 G-VSC2 的控制方式或者控制参数随之变化，让直流电压回到

系统的预设值，而系统其他的换流站运行不受太大影响。

下面对该控制方式进行仿真分析：

在图 4-1 的系统中，系统运行在稳定状态，直流电压为 10kV。换流站 G-VSC1 和 G-VSC2 的底层控制策略采用下垂控制，其中针对主站退出运行的情况，G-VSC2 加入了控制模式切换的指令值 S ，来改变控制方式。仿真条件为：2s 时，主站 G-VSC1 由于故障，退出系统。

图 5-4 给出了 G-VSC2 侧的直流电压、有功功率和指令值的变化情况，电压单位为 kV，功率单位为 MW。

2s 时，主站 G-VSC1 故障退出系统。此时上层控制检测到主站退出后，改变控制模式切换的指令值 S 由 1 到 1.5，使得 G-VSC2 切换至定直流电压控制方式，从而增大功率的发出量 $P2$ ，使得系统整体的有功功率趋于平衡，直流电压重新被控制在 10kV。由仿真结果图 5-4 可知，在从站 G-VSC2 的控制下，即使主站退出运行，系统直流电压也可以保持稳定。

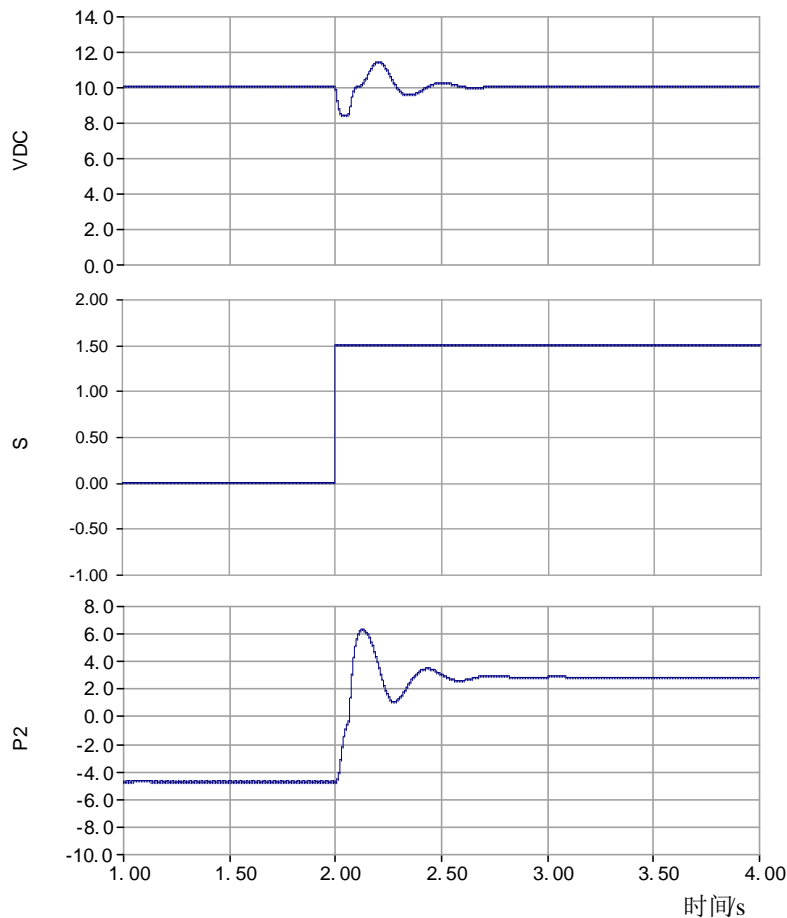


图 5-4 基于模式切换的控制仿真波形图

5.4.2 中间线路断线的控制策略

上述的控制策略均没有考虑直流配电网中间线路断线等情况。

本文直流配电网采用两端配电的拓扑结构，电压为 10kV，其结构如图 4-1 所示。该系统的几种运行情况为：

(1) 两端供电模式：即正常运行情况。直流配电系统两端分别连接高压交流配电网和中低压交流配电网，两端均可给直流配电网供电。两端有可能一端供电，另一端用电。

(2) 单端供电模式：两个联网换流器（G-VSC）中有一个由于故障或者出口线路故障退出运行，整个直流配电系统仅由一端的联网换流器供电，此时系统的控制方式更为容易实现，但是调压容量较低，直流电压控制效果不好，且系统供电可靠性较差。

(3) 两端隔离模式：直流配电系统中间线路断线，形成了两个相对独立的隔离系统，两端隔离的系统均采用原始的底层控制策略，但各自只有一端的联网换流器供电，系统的容量减小，控制方式也要有所调整。其中，文本对这种两端隔离模式进行了仿真，并提出了相应的调整策略。在上层控制器中修改指令值给两个联网换流站，保证了两个独立系统的稳定运行。

两端隔离模式的调整策略也有很多难题：首先，直流配电网系统结构复杂，线路较多，需要检测的数据和线路比较多，相应的处理数据的过程也要复杂，具体的算法和处理机制还有待深入研究。其次，上层控制器检测数据、第一时间把处理结果反馈给底层控制的过程均需要通信，并且对通信的及时性有着一定的要求。最后，要设置合适的算法和检测处理方法来处理断线故障。基本的处理原则是要保证两个独立系统各自的功率平衡，由于两个系统隔离后，原有的潮流分布和功率平衡关系都将改变，若继续采用原始参数的下垂控制器，系统直流电压将会有较大的偏差，并且波动量也会很大，如图 4-8 所示。

因此需要上层控制器统筹协调各个独立系统的功率分布情况，得出两个联网换流器新的电压和功率的基准值，下发各两个联网换流器。本文引入了控制模式切换的指令值 S 来实现这一过程，上层控制层检测线路故障后，生成指令值 $S=4$ 给各个底层换流器，使其改变控制参数，达到良好的控制效果。

上节已经讨论了主站 G-VSC1 的出口直流线路断开时，从站控制模式切换的方法，本节则把基于功率基准值和模式切换的控制思路结合起来，讨论直流线路中间断路器断开后，系统成为双端隔离供电模式的控制策略。其仿真结论见 5.4.3

小节。

5.5 本章小结

本章首先将直流配电网的上层控制分为三个部分：集中控制、电压优化和故障控制。主要分析了电压优化和故障控制。

电压优化即为二次调压，当系统内的潮流发生变化时，直流配电网不能保持最优潮流运行，需要二次调压进行优化控制。在介绍了二次调压的基本概念后，重点对以直流电压偏差量最小为目标的电压优化进行了分析，通过直流网络潮流方程和约束方程，利用简化梯度法来求解最优潮流，使系统达到最小的直流电压偏差值。

针对下垂控制在功率波动较大时直流电压变化较大的问题，本章提出了基于功率基准值的控制策略。上层控制器通过检测并计算整个系统的功率缺额，按照一定的比例将缺额下发给每个换流站，改变功率基准值，达到了预期的控制效果。

在故障控制中，当控制直流电压的主站退出运行时，提出了基于控制模式切换的指令值 S 的控制策略，通过上层控制改变 S 的值，传达给底层的换流站，改变其控制方式。当系统中间线路断线时，通过上层控制器改变指令值 S ，修改各个联网换流器的控制器参数值，保证了各自独立系统的稳定性。

第6章 结论与展望

6.1 全文工作成果及结论

多端柔性直流配电网有着可靠性、经济性、可控性、易于分布式能源接入、减少换流器环节等等优势，有着极大的发展应用前景，可以逐步应用到智能楼宇、分布式能源并网和城市供电等等领域。

本文围绕直流配电网的电压协同控制策略进行了研究，得出如下成果和结论：

(1) 根据控制目标、协调机制和响应时间的不同，将直流配电网的控制体系划分为换流器层控制、底层控制、上层控制 3 个层次。在换流器控制层对直流配电网各个单元（电压源换流器、光伏、储能、DC-DC 换流器和负荷换流器）建模和控制分析的基础上，在 PSCAD 软件中建立了多端柔性直流配电网的系统模型，为后续的研究打下基础。

(2) 基于偏差和下垂两种控制方式的优点，提出了换流站内和换流站间的混合控制，达到了良好的控制效果。对基本控制方式和混合控制方式比较分析后，得出了相应的结论并应用在了后续的研究中：1) 稳态时，当系统中有频繁的功率波动时，直流电压下垂控制方式的直流电压指标更好；2) 下垂控制会在系统功率大幅度改变时产生极大的直流电压变化量，为此采用偏差控制和定直流电压控制把直流电压控制在合理的区间内很有必要。3) 具有电压控制能力的换流站在正常情况下均采用下垂控制。

(3) 在本文数据分析所得结论的基础上，提出了适用于多端柔性直流配电网的多换流器的电压协同控制策略。在该控制策略中引入了滞环控制，并利用了控制模式切换的指令值 S 来控制底层各个换流器控制方式的切换，形成了整体的控制策略表和分段控制特性。通过指令值 S 来协调各个换流站的控制方式，保证了在稳态的各个工况下至少有一端换流站控制直流电压，无需通讯，具备了分散自律、多点协同的特征，并且在系统故障等暂态工况下也能发挥作用。经过验证，该控制策略在稳态和中间线路断线等情况下均能保持系统功率平衡和直流电压的稳定。

该协同控制策略具有适应性和可扩展性，可为基于其他分布式电源和储能系统构建的直流配电网或者直流微网的控制策略研究提供一定的基础。同时，控制模式切换的指令值 S 也用在了上层控制中，成为了联系底层和上层控制的信息量。

(4) 本文将上层控制分为了集中控制、电压优化和故障控制三个部分。电压优

化即为二次调压，对以直流电压偏差量最小为目标的电压优化进行了分析，通过直流网络潮流方程和约束方程，利用简化梯度法来求解最优潮流，使之达到最小的直流电压偏差值。

在故障控制中，当控制直流电压的主站退出运行时，提出了基于控制模式切换的指令值 S 的控制策略，上层控制通过改变 S 的值，传达给底层的换流站，改变其控制方式。当系统中间线路断线时，通过上层控制器改变指令值 S ，改变各个联网换流器的控制器参数值，使两个系统独立都保持稳定运行。

6.2 后续工作展望

直流配电网作为柔性直流输电和配电网未来的一个发展趋势，相关的研究和实践还处于起步阶段，很多技术还尚未成熟。本文对直流配电网的多换流器间的电压协同控制策略进行了分析研究，提出了三层的控制体系和底层的协同控制策略。本文的研究成果还可以在以下方面继续深入：

(1) 本文的直流配电网的系统模型拓扑为两端供电型，虽较为符合直流配电网的运行现状，但其他的拓扑结构（辐射型、环型等）的控制特点和相应的协同控制策略还有待研究。

(2) 本文主要研究光伏直流配电网，分布式能源中未涉及风能。可在后续的研究中加入风机模型，组成风光储直流配电系统，研究风光各自及发电特性和相互间的互补特性，并形成整体的协调控制策略。

(3) 本文在上层控制中，二次调压仅考虑了以直流电压偏差值最小为目标的优化算法，还可进一步研究基于网损最小的优化以及二者的综合优化程序。上层控制的集中控制，涉及系统的整体调度和优化，考虑经济性、安全性和可靠性的调度方案还有待研究。

(4) 本文的电压协同控制策略和上层控制中，只考虑了一部分运行工况。各自控制策略在稳态及更复杂恶劣的暂态情况下的有效性还有待研究。利用控制模式切换的指令值 S 还可处理更多的系统故障和运行失常情况，其在直流配电网控制策略中的适用性还可以深入研究。

参考文献

- [1] 周逢权,黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, (22): 62-67.
- [2] 郑欢. 柔性直流配电网的若干问题研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [3] 谭逢时. 未来直流配电网建设初探[J]. 科技资讯, 2011, (23): 110+112.
- [4] Xu C. D.,Cheng K. W. E. A survey of distributed power system — AC versus DC distributed power system[C]. Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011 4th International Conference on, 2011.
- [5] Kondratiev I.,Dougal R. Synergetic Control Strategies for Shipboard DC Power Distribution Systems[C]. 2007 American Control Conference, 2007.
- [6] 宋强, 赵彪, 刘文华, et al. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, (25): 9-19+5.
- [7] Starke M. R., Tolbert L. M.,Ozpineci B. AC vs. DC distribution: A loss comparison[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES, 2008.
- [8] Wang F., Yunqing P., Boroyevich D., et al. Ac vs. dc distribution for off-shore power delivery[C]. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 2008.
- [9] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, (08): 98-104.
- [10]Lasseter R. H. Smart Distribution: Coupled Microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (6): 1074-1082.
- [11]Ito Y., Zhongqing Y.,Akagi H. DC microgrid based distribution power generation system[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. The 4th International, 2004.
- [12]Kakigano H., Miura Y., Ise T., et al. DC Micro-grid for Super High Quality Distribution — System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices —[C]. Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 2006.
- [13]Magureanu R., Albu M., Priboianu M., et al. A DC distribution network with alternative sources[C]. Control & Automation, 2007. MED '07. Mediterranean

- Conference on, 2007.
- [14] Boroyevich D., Cvetkovic I., Dong D., et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C]. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on, 2010.
- [15] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, et al. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, (22): 39-44+89.
- [16] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010:
- [17] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 50-53.
- [18] Guerrero J. M., Vasquez J. C., Matas J., et al. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids; A General Approach Toward Standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (1): 158-172.
- [19] 王毅, 张丽荣, 李和明. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (4): 16-24.
- [20] 王晶, 李瑞环, 束洪春. 基于智能多代理的能量协调控制在直流微网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, (07): 132-138.
- [21] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, et al. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, (25): 27-35+7.
- [22] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, et al. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, (09): 156-163.
- [23] 孟润泉, 刘家赢, 文波, et al. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, (07): 2186-2193.
- [24] Gu Y., Xiang X., Li W., et al. Mode-Adaptive Decentralized Control for Renewable DC Microgrid With Enhanced Reliability and Flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (9): 5072-5080.
- [25] Guerrero J. M., Chandorkar M., Lee T. L., et al. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids; Part I: Decentralized and Hierarchical Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1254-1262.
- [26] Schonbergerschonberger J., Duke R., Round S. D. DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (5): 1453-1460.
- [27] Xu L., Chen D. Control and Operation of a DC Microgrid With Variable Generation

- and Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (4): 2513-2522.
- [28]Chen D.,Xu L. Autonomous DC Voltage Control of a DC Microgrid With Multiple Slack Terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 1897-1905.
- [29]Chen D., Xu L.,Yao L. DC Voltage Variation Based Autonomous Control of DC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (2): 637-648.
- [30]张犁, 孙凯, 吴田进, et al. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, (02): 248-254.
- [31]徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社,2011:
- [32]王中秋. 分布式储能对微网运行特性的作用研究[D]. 华北电力大学(北京), 2011.
- [33]曹倩茹. 光伏发电的最大功率跟踪研究[D]. 西安科技大学, 2006.
- [34]黄瑶,黄洪全. 电导增量法实现光伏系统的最大功率点跟踪控制[J]. 现代电子技术, 2008, (22): 18-19.
- [35]马兆彪. 太阳能光伏并网发电系统的分析与研究[D]. 江南大学, 2008.
- [36]梁海峰, 李庚银, 李广凯, et al. 向无源网络供电的 VSC - HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, (08): 45-50.
- [37]Nakajima T.,Irokawa S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, Canada, 1999.
- [38]阮思焯, 李国杰,孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 32 (12): 57-60.
- [39]陈海荣,徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, (19): 28-33.
- [40]胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 华北电力大学, 2013.
- [41]Livermore L., Jun L.,Ekanayake J. MTDC VSC Technology and its applications for wind power[C]. Universities Power Engineering Conference, Cardiff, 2010.
- [42]唐庚, 徐政,刘昇. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (15): 125-132.
- [43]Vasquez J. C., Guerrero J. M., Luna A., et al. Adaptive Droop Control Applied to Voltage-Source Inverters Operating in Grid-Connected and Islanded Modes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (10): 4088-4096.

-
- [44]Prieto-Araujo E., Bianchi F., Junyent-Ferre A., et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multiterminal VSC-HVDC grids for offshore wind farms[C]. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014.
- [45]任敬国. VSC-HVDC 输电系统的协调控制与稳态分析方法研究[D]. 山东大学, 2014.
- [46]吴金龙, 刘欣和, 王先为, et al. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 12 (06): 1593-1599.
- [47]ROUZBEHI K., MIRANIAN A., LUNA A., et al. DC Voltage Control and Power Sharing in Multiterminal DC Grids Based on Optimal DC Power Flow and Voltage-Droop Strategy[J]. Emerging & Selected Topics in Power Electronics IEEE Journal of, 2014, 2 (4): 1171-1180.
- [48]GAVRILUTA C., CANDELA I., LUNA A., et al. Hierarchical Control of HV-MTDC Systems With Droop-Based Primary and OPF-Based Secondary[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6 (3): 1502-1510.
- [49]梁海峰, 林嘉麟,李鹏. 含分布式能源直流配电网的优化调度[J]. 中国电力, 2016, 49 (03): 123-127.
- [50]李永刚, 韩冰,刘天皓. 分布式能源接入直流配网的潮流优化[J]. 华北电力大学学报, 自然科学版, 2016, 43 (2): 17-22.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

(一) 拟投稿的学术论文:

- [1] 李庚银, 刘永庆, 刘崇茹, 等. 应用于直流配电网的电压协同控制策略[J].

攻读硕士学位期间参加的科研工作

- [1] 国家高技术研究发展计划课题“保障直流配网可靠性的多端柔性直流控制保护关键技术”（2015AA050101），2015.03-2016.11，主要参与者。

致谢

近四年的硕士研究生涯里，我得到了老师、家人、朋友、同门及同窗的太多鼓励、支持和帮助，感激之情无以言表。

本文是在导师李庚银教授的亲切关怀和精心指导下完成的，并得到了刘崇茹老师的诸多帮助。两位老师平易近人的作风、严谨的治学态度、渊博的知识面给我留下了深刻的印象，他们的言传身教让我终生受益。在此向李老师和刘老师表示最诚挚的敬意和最衷心的感谢，老师的教诲学生一定永远铭记在心。

在华电求学和论文撰写期间，实验室 D301 的同门和研电 1404 班的同学给予了我很大的帮助，帮我解决掉了学习和生活中的很多困难和难题，非常感谢他们的指点和帮助。

感谢一直在背后支持我的家人和女朋友，他们的关怀和期望是我今后努力进取的巨大动力。

最后向所有关心我、帮助我的老师、同学和家人致以由衷的感谢。