

# 华北电力大学

## 硕士学位论文

### 多端柔性直流系统运行及控制参数优化研究

### Research on Control Parameter Optimization and Operation Optimization of VSC-MTDC

史卓

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

# 多端柔性直流系统运行及控制参数优化研究

国家高技术研究发展计划课题（2015AA050101）资助

硕士研究生：史卓

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 Control Parameter Optimization and  
Operation Optimization of VSC-MTDC**

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

## 摘 要

柔性直流输电（Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC）是一种以电压源换流器和脉宽调制等技术为基础的新型直流输电技术。与传统高压直流输电相比，VSC-HVDC 采用了全控型器件，实现了有功功率和无功功率的解耦，能够向弱交流系统甚至无源网络供电，不会发生换相失败，很适合应用于海上风电并网、分布式能源接入、交流系统互联、构造多端柔性直流（Voltage Source Converter based Multi-terminal Direct Current, VSC-MTDC）系统等领域，在国内外引起了广泛的关注。本文对多端柔性直流系统的电压协同控制策略、控制参数优化和优化运行进行了如下研究：

在  $dq0$  旋转坐标系下建立了电压源换流器的数学模型，推导了 VSC-HVDC 的双闭环控制结构：外环根据所连接网络的不同选用不同的控制策略，内环采用前馈补偿的结构实现有功功率和无功功率的解耦。在 VSC-HVDC 控制策略的基础上，研究了 VSC-MTDC 适用的直流电压主从控制、直流电压偏差控制和直流电压斜率控制这三种多端系统的控制策略，对三种控制策略进行了对比，并设计了三种策略的控制器结构。

提出了一种确定 VSC-MTDC 系统控制参数的方法，可以保证控制器对系统稳态和过渡过程进行准确、稳定的控制。首先以控制器外环控制量的稳态偏差最小为目标，确定各控制器控制参数的初始值，保证对系统稳态运行情况的控制能力；再根据系统过渡过程中控制特性区域的不同划分时间区间，构造了 VSC-MTDC 控制特性的评价指标，并以此为目标函数采用单纯型算法对控制参数的初始值进行了进一步的优化，最终得到控制参数的最优值。仿真验证表明本文提出的控制参数整定方法可以改善系统的控制精度和动态响应。

提出了一种适用于 VSC-MTDC 的分层优化控制体系，可以在保证系统稳定运行的同时对系统运行的网损进行优化。其中控制体系的下层采用直流电压斜率控制策略，是控制体系的基础；上层通过采集各换流站的出力数据，以优化系统运行时的网损为目标，考虑系统功率平衡等约束条件，计算出系统的最优潮流，进而给下层的斜率控制器下发新的参考值，实现系统的最优网损运行。

关键词：VSC-MTDC；协调控制策略；控制参数优化；最优潮流；运行优化

## Abstract

Voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission is a new type of direct current transmission technology base on voltage source converter (VSC) and pulse width modulation (PWM). Because of its full controlled power electronic devices, the advantages of VSC-HVDC conclude decoupling active power and reactive power, supplying power to the passive network and avoiding commutation failure. Therefore, it is suitable for connecting offshore wind power station, integrating distributed energy resource, interconnecting different AC system and forming multi-terminal direct current (VSC-MTDC) system. The VSC-HVDC has received extensive attention of academia and industry both at home and abroad. In this thesis, the control strategy, control parameter optimization and operation optimization of VSC-MTDC are studied. The main contents of this thesis are as follows:

In this thesis, the mathematical model of VSC in dq0 rotation coordinate system is established, and then the double closed-loop control strategy of VSC-HVDC is deduced. The inner loop controller adopts the feed-forward compensation structure to achieve the decoupling of active power and reactive power, while the outer loop controller chooses control strategy among constant DC voltage, constant active power, constant reactive power and constant AC voltage according to different application scenarios. The control strategies of VSC-MTDC such as DC voltage master-slave control, DC voltage deviation control and DC voltage droop control are studied based on the studies of VSC-HVDC control strategies. The advantages and disadvantages of each control strategy are analyzed, and the control structure of each control strategy is designed.

A method to determine the control parameters of the VSC-MTDC system is proposed, which can guarantee the controller to control the system accurately and stably in both steady state and transition process. Firstly, the initial value of each controller's control parameters is determined to minimize the steady-state deviation of controller's outer loop control variables, thus the stable operation of system is

guaranteed. By dividing time interval according to the difference of control characteristic region in transition process, the evaluation index of VSC-MTDC control characteristics is constructed and then used as objective function. Finally the optimal control parameters are obtained by using the simplex algorithm to optimize the initial values of the control parameters. Simulation results show that the control parameter tuning method proposed in this thesis can improve the control precision and dynamic response of the control system.

A hierarchical optimization control system for VSC-MTDC is proposed, which can optimize the system's network loss while guaranteeing the stable operation of the system. The primary control level uses the DC voltage droop control strategy, which is the foundation of the control system. The secondary control level first collects the active power of each converter station, takes the network loss as objective function and a series of equality and inequality as constraints, then calculates the optimal power flow of the system. Finally The secondary control level gives the new reference values to controllers of the primary control level and the minimum network loss of the system is reached.

**Keywords:** VSC-MTDC, Coordinated Control Strategy, Control Parameter Optimization, Optimal Power Flow, Operation Optimization

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	II
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 VSC-HVDC 的技术特点 .....	2
1.3 VSC-HVDC 的应用现状 .....	2
1.4 国内外研究现状 .....	3
1.4.1 VSC-MTDC 数学模型和控制策略研究 .....	4
1.4.2 VSC-MTDC 控制参数优化研究 .....	5
1.4.3 VSC-MTDC 的优化运行研究 .....	5
1.5 本文的主要工作 .....	6
第 2 章 柔性直流系统的控制策略 .....	8
2.1 电压源换流器的数学模型 .....	8
2.2 VSC-HVDC 的双闭环控制策略 .....	9
2.2.1 VSC-HVDC 的内环控制 .....	9
2.2.2 VSC-HVDC 的外环控制 .....	10
2.3 VSC-MTDC 的电压协同控制策略 .....	11
2.3.1 直流电压主从控制策略 .....	12
2.3.2 直流电压偏差控制策略 .....	13
2.3.3 直流电压斜率控制策略 .....	14
2.4 本章小结 .....	15
第 3 章 多端柔性直流系统控制参数初始化及优化方法 .....	16
3.1 基于单纯形法的控制参数优化 .....	16
3.1.1 单纯形优化算法 .....	16
3.1.2 目标函数的构造 .....	17
3.2 控制参数初始化 .....	20
3.3 仿真分析 .....	22
3.3.1 VSC-MTDC 仿真模型参数 .....	22

3.3.2 仿真过程和结果对比 .....	22
3.3.3 最优参数的鲁棒性检验 .....	24
3.4 本章小结 .....	26
<b>第 4 章 多端柔性直流系统的网损优化运行 .....</b>	<b>27</b>
4.1 多端柔性直流系统的分层优化控制体系 .....	27
4.2 下层斜率控制策略 .....	28
4.3 上层网损优化运行模型 .....	29
4.3.1 目标函数 .....	29
4.3.2 约束条件 .....	29
4.3.3 求解方法 .....	31
4.4 稳态计算和结果 .....	31
4.4.1 稳态工作点计算 .....	32
4.4.2 最优潮流计算结果 .....	32
4.5 动态仿真验证 .....	34
4.5.1 只有下层斜率控制时的动态仿真 .....	34
4.5.2 采用分层优化控制体系的系统动态仿真 .....	36
4.5.3 系统某一换流站退出时的动态仿真 .....	37
4.5.4 通信中断时系统的动态仿真 .....	39
4.6 本章小结 .....	41
<b>第 5 章 结论与展望 .....</b>	<b>42</b>
5.1 结论 .....	42
5.2 展望 .....	43
<b>参考文献 .....</b>	<b>44</b>
<b>攻读硕士学位期间参加的科研工作 .....</b>	<b>47</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>48</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景

随着能源短缺和环境污染问题的日益加剧，绿色环保的可再生能源越来越受到世界各国的重视。然而，由于具有分散性、不确定性和远离主网等特点，可再生能源在接入时将给电力系统带来一系列新的问题和挑战。可再生能源并网稳定性问题的原因是可再生能源的不确定性决定了其功率的波动，并且由于电力系统消纳能力的限制，可再生能源发电并未得到充分的利用，甚至出现浪费现象。如何实现可再生能源可靠、经济、大规模的接入成了电力系统必须解决的问题<sup>[1, 2]</sup>。

自 1954 年世界上第一条直流输电工程投入商业运行至今，高压直流输电（High Voltage Direct Current, HVDC）技术以其优异的输电性能在世界范围内得到了广泛的应用。与交流输电相比，HVDC 具有以下技术和经济方面的优势：当输电距离大于等价距离时，直流输电比交流输电经济；交流线路的输电能力受到同步发电机功角稳定性的限制，而直流输电不存在功角稳定性的问题；采用直流对交流系统进行互联不会增加系统的短路容量等<sup>[3, 4]</sup>。

虽然相比于交流输电，高压直流输电有很多优点，但是传统 HVDC 中负责交直流转换的电力电子器件是半控型的晶闸管，使得传统 HVDC 也存在以下的不足之处：为了给换流器中晶闸管提供换向电流，HVDC 两端连接的交流系统必须有足够的电气强度，因此难以应用于弱交流系统和无源系统中；当所连交流系统故障时，容易引起换相失败的问题；HVDC 在运行时需要消耗大量无功功率，并且谐波含量较大，因此换流站需要配备大量的滤波装置和无功补偿设备；直流输电的换流站造价较高，并且结构也更为复杂。

近年来以绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表的全控型电力电子器件在技术上有了较大的进步，基于全控型电力电子器件的电压源换流器正逐步取代基于晶闸管的电网换相换流器，在直流输电领域引起了一场重大的变革。电压源换流器型直流输电（VSC-HVDC）以电压源换流器（Voltage Source Converter, VSC）和脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术为基础，是一种新型的直流输电技术，又称柔性直流输电技术。VSC-HVDC 很适合应用于海上风电

并网、分布式能源并网、偏远地区供电、交流系统互联、城市电网增容改造、构造多端直流输电系统等领域，具有广阔的应用前景<sup>[5-7]</sup>。

## 1.2 VSC-HVDC 的技术特点

与传统的电网换相高压直流输电（Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC）相比，VSC-HVDC 具有以下主要优势<sup>[8-11]</sup>：

（1）VSC-HVDC 可以对系统的有功功率和无功功率进行独立解耦控制，而且控制方式非常灵活。

（2）只需要改变有功功率的方向，而不需要改变直流电压的极性，VSC-HVDC 就可以很方便的实现潮流反转。这一优点使得构造多端柔性直流输电（VSC-MTDC）系统非常容易。

（3）VSC-HVDC 可以连接弱交流系统和无源系统，因为其采用的是全控型的电力电子器件，可以通过控制信号实现自关断。

（4）采用 VSC-HVDC 不会引起系统短路容量的增加，因此不需要重新整定原网络中的保护设备。

（5）VSC 通常采用 SPWM 技术来产生 IGBT 和二极管的触发信号，其开关频率相对较高，经过低通滤波后就得到所需交流电压，所需滤波装置的容量大大减小。

（6）与传统的高压直流输电相比，VSC-HVDC 采用了全控型电力电子器件，可以由触发信号控制器件的关断，不会发生换相失败的问题。

## 1.3 VSC-HVDC 的应用现状

相比于交流输电和高压直流输电，VSC-HVDC 具有一系列经济、技术上的优势，因此国内外多家公司和机构对其都进行了广泛而深入的研究。世界上第一个商业运行的柔性直流输电工程于 1999 年在瑞典哥特兰（Gotland）岛投运，此后 VSC-HVDC 以其优越的性能在世界范围内得到了越来越多的关注，新建工程的电压等级越来越高，输送容量也越来越大。迄今为止，世界范围内已经有多条线路相继投入商业运行，如表 1-1 所示<sup>[12-14]</sup>。

表 1-1 世界范围内投运和在建的主要 VSC-HVDC 工程

工程名称	投运时间	额定功率/MW	直流电压/kV
Heallsjon	1997	3	± 10

表 1-1 (续表) 世界范围内投运和在建的主要 VSC-HVDC 工程

工程名称	投运时间	额定功率/MW	直流电压/kV
Gotland	1999	50	± 80
Directlink	1999	3×60	± 80
Tjaereborg	2000	7.2	± 9
Eagle Pass BTB	2000	36	± 15.9
Cross Sound Cable	2002	330	± 150
Murray Link	2002	220	± 150
Troll A	2005	2×41	± 60
Estlink	2006	350	± 150
NorD E.ON 1	2009	400	± 150
Caprivi Link Interconnector	2009	300	± 350
Valhall	2010	78	150
The Trans Bay Cable	2010	400	± 200
上海南汇风电场柔性直流输电	2011	18	± 30
East West Interconnector	2012	500	± 200
Borwin1	2012	400	± 150
Borwin2	2013	800	300
Helwin1	2013	576	259
Dolwin1	2013	800	± 320
Inelfe	2013	2×1000	± 320
南澳柔性多端直流输电	2013	200	± 160
浙江舟山多端柔性直流输电	2014	1000	± 200
Skagerrak HVDC Interconnection	2014	700	500
Sylwin1	2014	864	± 320
厦门柔性直流输电工程	2015	1000	± 320
Dolwin2	2015	900	± 320
Nordbalt	2015	700	± 300
张北多端柔性直流输电	2016	3000	± 500

## 1.4 国内外研究现状

由于柔性直流输电所具有的优异性能和广阔前景，世界各国的研究人员都对其展开了广泛而深入的研究工作。主要的研究领域包括换流站在各种坐标系下数学模型，VSC-HVDC 的新型拓扑结构及与其相应的控制策略，VSC-MTDC 的协调控制策略，VSC-HVDC 的故障诊断与保护，直流变压器和断路器的研制以及 VSC-MTDC 的优化运行等几个方面。

### 1.4.1 VSC-MTDC 数学模型和控制策略研究

建立合适的数学模型是研究 VSC-HVDC 及其控制策略的基础，国内外学者在数学模型和控制策略等方面进行了广泛的研究，取得了一系列有益的成果。

VSC-HVDC 有直接电流控制和间接电流控制两种控制方式。其中间接电流控制是通过控制换流器交流侧基波电压的幅值和相位来控制交流电流。文献[15-17]对间接电流控制的原理和应用进行了介绍。这种控制方法具有结构简单、易于实现的优点，因而在早期的研究中得到广泛应用，但它具有动态响应慢的缺点，并且不能实现对有功功率和无功功率的独立控制，因此工程实际中广泛使用的是直接电流控制的控制方式。文献[18, 19]根据换流站的结构建立了柔性直流输电系统的数学模型，再将系统模型从 abc 三相静止坐标系变换为 dq0 坐标系，设计了内环和外环的控制器结构，实现了有功功率和无功功率的独立控制。文献[20]搭建了含有风电场的柔性直流系统，通过在风电场侧和电网侧采用不同的外环控制策略，保证了风电并网时系统的稳定运行，验证了柔性直流系统对于风电可靠接入的有效性。

VSC-MTDC 是由 3 个及以上个数换流站和它们连接的直流输电线路构成的多端直流输电系统，其优点在于可靠性高，经济性好，控制方式灵活，更适用于新能源的可靠输出以及无源网络的负荷供电。交流系统的稳定性包括电压稳定、频率稳定和功角稳定，而直流系统的稳定性仅取决于直流电压的稳定，因此 VSC-MTDC 系统控制策略的核心是实现对各换流站直流电压的稳定控制。文献[21]设计了一个五端 VSC-MTDC 的控制策略，该策略中只有一个换流站控制直流电压。此时，若该换流站出现故障退出运行时，剩余换流站没有对直流电压的备用控制能力，所有换流站的直流电压将失去控制，整个系统无法运行。因此要满足 VSC-MTDC 系统的稳定运行，不能采用单点直流电压控制，而需要有至少两个换流站可以对直流电压进行控制。文献[22-24]研究了 VSC-MTDC 的直流电压偏差控制策略，并设计了直流电压偏差控制器。采用偏差控制策略

的换流站可以根据直流电压的偏差量自动对控制模式进行切换，且不需要依赖通信，从而提高了系统运行的可靠系。文献[25-27]研究了 VSC-MTDC 的直流电压斜率控制策略。采用此控制策略的换流站的直流电压和有功功率呈线性关系，类似于交流系统中的一次调频，可以根据功率的波动自动调整直流电压和有功功率，保证系统的功率平衡和电压稳定。文献[28]研究了 VSC-MTDC 的主从控制策略，但该控制方式的顺利实现依赖于通信的配合。由于 VSC-MTDC 的几种控制策略具有不同的优点和局限性，文献[14, 29-31]设计了一种新型的控制策略，对斜率控制和偏差控制的优点进行了结合，可以实现小扰动时换流站有功功率的自动调整以及大扰动时换流站控制方式的自动切换，保证了系统的稳定运行。

#### 1.4.2 VSC-MTDC 控制参数优化研究

对于直流系统控制参数优化的研究从传统高压直流输电时就开始了。文献[32]通过 Bode 图求出满足系统稳定性的控制参数取值范围，然后提出了一种参数可行域划分优化方法来用于控制系统的参数寻优，并对优化得到的控制器进行了鲁棒性检验，然而文献在对可行域进行划分时也具有一定的主观性，可行域步长的不同对优化的结果有很大的影响。文献[33]采用单纯形法优化了 HVDC 的控制参数，并针对优化后系统波形出现的振荡，对目标函数进行了改进，消除了这一缺陷。文献[34]采用了一种混合遗传算法对高压直流输电的控制参数进行优化，结果表明该算法在优化精度和速度方面都有较大的优势。文献[35]基于 PSCAD 和 MATLAB 的联合调用，采用改进粒子群算法对高压直流输电系统的控制参数进行了优化。文献[36]指出，与高压直流输电系统不同，柔性直流输电系统准确的传递函数很难描述，因此单纯形法可以用来对其控制参数进行寻优，并且目标函数和权重的构造和选择在优化过程中至关重要。文献[37]采用单纯形算法对柔性直流输电系统的控制参数进行了优化，提高了控制系统的控制精度，改善了系统的性能。文献[38]采用单纯形法对一个四端柔性直流系统的控制参数进行了优化，但是该文献没有考虑到多端系统控制策略的复杂性，所搭建的系统采用的是单点直流电压控制方式，无法保证直流电压控制站在功率越限和故障情况下剩余换流站的稳定运行。

#### 1.4.3 VSC-MTDC 的优化运行研究

采用直流电压斜率控制策略的换流站可以根据斜率特性自动调整有功功率,但是斜率控制存在直流电压稳态偏差,且斜率特性固定不变,不能根据系统运行情况的变化进行修改。当系统出现较大幅度的功率波动时,固定的斜率特性容易使换流站的直流电压越限,因此需要根据系统运行情况的变化对换流站的斜率特性进行修正,从而对系统的运行进行优化。

对 VSC-MTDC 运行优化方面的研究比较少,文献[39]提出了一种 VSC-MTDC 系统的潮流优化方法,以网损最小为目标对系统的优化运行进行了研究,与斜率控制策略进行了对比,所提出的方法可以大大减少系统运行时的网损。但是文献中并没有将斜率控制和潮流优化进行结合,如果发生通信故障,系统就有可能出现功率不平衡和电压越限。文献[40, 41]提出了一种将斜率控制和潮流优化结合的 VSC-MTDC 的控制结构,由上层计算出系统网损最小时的潮流,再给下层斜率控制器下发新的参考值,下层控制器根据上层指令对斜率特性进行修正,使系统运行时的网损最小。仿真证明在稳态和系统功率波动的情况下采用所提出控制结构的系统都可以稳定运行。但是,文献[40]在优化 VSC-MTDC 的网损时,没有考虑到网损的降低会使得系统直流电压的升高,因此如果在优化的过程中不对直流电压进行约束,可能会导致换流站直流电压的越限。文献[41]推导了换流站直流电压峰值的计算方法,并以此为依据对下层控制系统的斜率特性、直流电容、控制环的时间响应和直流电缆等参数进行了设计,使得在功率发生波动的情况下各换流站的直流电压仍然在限值之内。文献[42]提出了多端柔性直流系统适用的一种分布式直流电压控制方法,将直流电压的控制任务分散给多个换流站。通过加入优化算法,所提出的控制策略可以对系统的网损进行优化,并且加入了  $N-1$  约束来限制换流站的直流电压,防止网损优化后过电压的发生。文献[43]对直流配网的网损和电压不平衡度指标进行了研究,综合考虑了网损和电压不平衡度作为目标函数,建立了直流配电网的 OPF 模型对直流配网的控制指令进行优化,在采用主从控制策略的直流配电网中对所提出的模型和优化方法进行了仿真验证。

## 1.5 本文的主要工作

基于对国内外研究现状的分析,本文以 VSC-HVDC 技术为核心,重点研究了电压源换流器的数学模型和控制策略,多端柔性直流系统的直流电压协同控制策略,控制器参数的选择和优化方法,以及系统的优化运行等内容,希望

本文进行的研究能够为柔性直流技术的进一步研究和工程应用有所帮助。本文的具体研究内容主要包括以下几方面：

(1) 搜集阅读相关文献资料，了解 VSC-HVDC 的发展历程、技术优势、应用领域，以及在我国电网建设中的重要作用，把握其发展前景，工程现状和目前的国内外研究现状，这是本论文进行研究的背景和意义。

(2) 以单个电压源换流器的稳态模型为基础，建立了 VSC-HVDC 系统在 dq0 同步旋转坐标系下的数学模型，并设计了 VSC-HVDC 的双闭环控制结构。内环采用前馈补偿的方式消除了有功功率和无功功率之间的耦合，从而实现了有功、无功的独立控制。在 VSC-HVDC 的基础上，对拓扑结构更为复杂的 VSC-MTDC 系统的控制策略进行了研究。研究了 VSC-MTDC 适用的直流电压主从、偏差和斜率控制策略，分析了每种控制策略的优点和不足，并设计了每种控制策略的控制器结构。

(3) 本文提出了一种 VSC-MTDC 控制器参数的整定方法。首先以系统控制量的稳态误差为目标函数，对控制器的控制参数进行初始选择，保证对系统准确稳定的控制。在初始参数的基础上，提出了一种根据系统控制特性区域的不同划分时间区间的控制参数优化方法，构造了 VSC-MTDC 系统适用的目标函数，并采用单纯形算法对得到的初始参数进行进一步的优化，改善了系统的响应特性，优化了系统的过渡过程。采用本文提出的控制参数优化方法可以避免工程中采用试凑法进行参数整定的盲目性，并且得到的最优参数具有良好的鲁棒性。

(4) 提出了一种适用于 VSC-MTDC 的分层优化控制体系，在保证系统直流电压稳定和有功功率平衡的前提下，可以对系统运行时的网损进行优化。控制体系的下层采用直流电压斜率控制策略，是控制系统的基础，负责系统的直流电压稳定和功率分配；上层网损优化通过采集各换流站的有功功率，以系统运行时的网损最小为目标计算出系统的最优潮流，进而给下层的斜率控制器下发新的参考值，从而实现 VSC-MTDC 的最优网损运行。为了避免网损优化过程中换流站直流电压达到直流电压上限值，在上层优化的约束条件中加入了  $N-1$  约束的内容，即使在某一换流站功率越限或退出运行时系统的直流电压也不会越限。

## 第2章 柔性直流系统的控制策略

### 2.1 电压源换流器的数学模型

VSC-HVDC 中电压源换流器的基本模型如图 2-1 所示, 其中  $L$  为换流电抗器的等效电感,  $R$  为换流器的等效损耗电阻,  $U_s$  为交流母线基波电压向量,  $U_c$  为换流器输出基波电压向量,  $\delta$  为  $U_c$  滞后  $U_s$  的角度,  $P_s$ 、 $Q_s$  为交流系统向公共连接点处注入的有功功率和无功功率,  $P_c$ 、 $Q_c$  为换流器直流侧从交流侧吸收的有功功率和无功功率<sup>[44]</sup>。

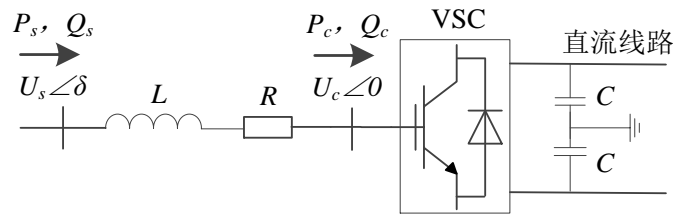


图 2-1 电压源换流器的基本模型

由基尔霍夫电压定律可得出 abc 三相坐标系下交流侧的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式中,  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为交流系统三相电压的瞬时值,  $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$  为换流器侧三相电压的瞬时值,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为电抗器三相电流的瞬时值。

通过 Park 变换将式(2-1)由 abc 坐标系变换至 dq0 坐标系可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{c0} \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega i_q \\ -\omega i_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

式中,  $u_{sd,q}$  为电网电压的 dq 轴分量;  $u_{cd,q}$  为换流器交流侧电压基波的 dq 轴分量;  $i_{d,q}$  为电抗器电流的 dq 轴分量。

采用的 Park 变换矩阵  $P$  为

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\alpha & \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

令  $d$  轴以电网电压向量定位，即  $u_{sq}=0$ ，则由式(2-2)可得：

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q \\ u_{cq} = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2-4)$$

交流系统注入换流站的有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$  分别为：

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_d \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_q \end{cases} \quad (2-5)$$

由式(2-5)可知， $P_s$  仅由  $d$  轴电流  $i_d$  控制， $Q_s$  仅由  $q$  轴电流  $i_q$  控制，通过分别控制交流电流的两个分量  $i_d$  和  $i_q$ ，就可以实现对换流站吸收的有功功率和无功功率的解耦控制。

## 2.2 VSC-HVDC 的双闭环控制策略

VSC-HVDC 主要有直接电流控制和间接电流控制两种控制方式。间接电流控制的优点是控制结构简单，实现容易，但是动态响应较慢，并且不能实现有功功率和无功功率的解耦，因此工程中一般采用的是直接电流控制的方法。

### 2.2.1 VSC-HVDC 的内环控制

由式(2-4)可知，交流电流在  $dq$  轴的两个分量  $i_d$  和  $i_q$  仍然互相耦合，因此没有完全解耦有功和无功电流。为了消除有功、无功电流的耦合以及  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  的影响，定义两个新的输入量  $u_d$  和  $u_q$ ，将式(2-4)改写为：

$$\begin{cases} u_d = u_{sd} - u_{cd} - \omega Li_q \\ u_q = u_{sq} - u_{cq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2-6)$$

式中，

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases} \quad (2-7)$$

通过引入  $u_d$  和  $u_q$ ，就可以实现非线性方程的解耦，同时通过对电网电压分量  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  采取前馈补偿，解耦了交流电流分量  $i_d$  和  $i_q$ 。采用比例积分（PI）控制器实现式(2-7)为：

$$\begin{cases} u_d = k_{p1}(i_{dref} - i_d) + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \\ u_q = k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (2-8)$$

式中， $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$ 、 $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  是控制器的比例系数和积分系数， $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  是电流内环的参考值。根据式(2-8)设计如图 2-2 所示的 VSC-HVDC 内环电流控制器结构<sup>[45]</sup>。

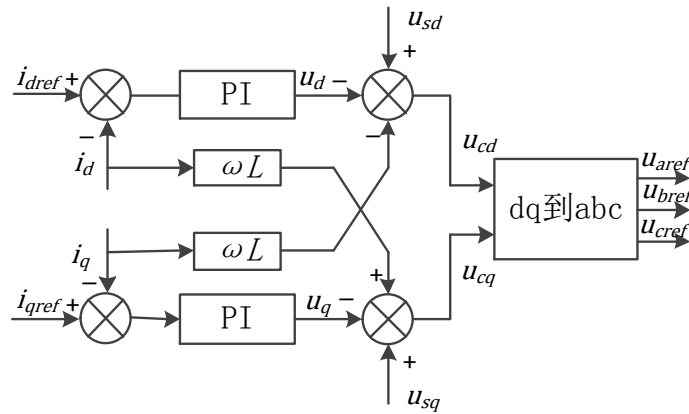


图 2-2 内环电流控制器结构图

图中电流内环参考值  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  由外环控制器输出，内环电流控制器的输出量经 Park 反变换至 abc 坐标系，再与调制波进行比较得到 IGBT 的开通和关断信号。

### 2.2.2 VSC-HVDC 的外环控制

在 VSC-HVDC 的双闭环控制结构中，内环控制器使交流电流分量  $i_d$  和  $i_q$  跟踪其参考值，外环控制器则根据控制量的偏差给内环电流控制器提供参考值。VSC-HVDC 的外环控制包括定直流电压控制、定有功功率控制、定无功功率控制和定交流电压控制等几种。其中定直流电压控制策略的作用是维持换流站的直流电压稳定，因此 VSC-HVDC 中必须有一侧换流站的外环采用定直流电压控制，另一侧的控制方式由该换流站连接的系统类型决定。若换流站连接有源

系统，则应采用定有功功率控制来控制与交流系统交换的有功功率；若换流站连接无源网络，则应采用定交流电压控制保证无源网络的交流电压稳定。与有源网络相连的换流站的外环控制器结构如图 2-3 所示<sup>[4]</sup>。

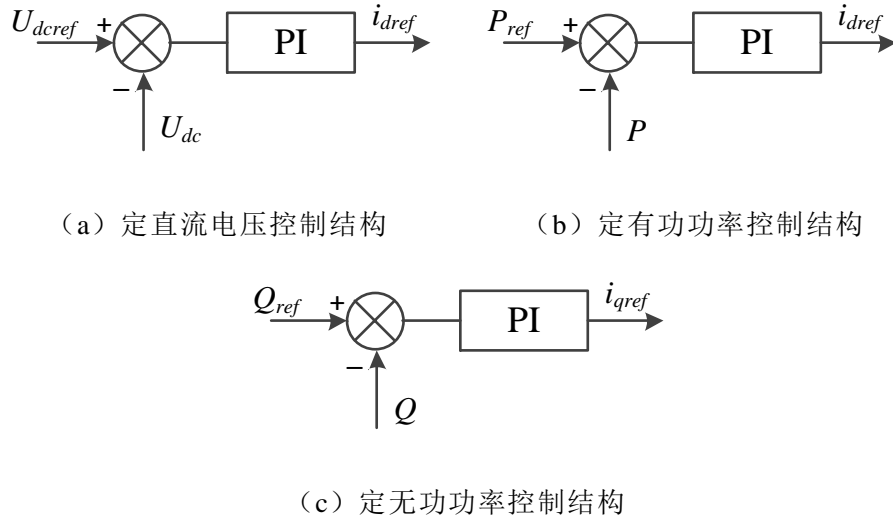


图 2-3 外环控制器的控制结构图

当受端为无源网络时，换流站定交流电压控制的控制结构如图 2-4 所示。

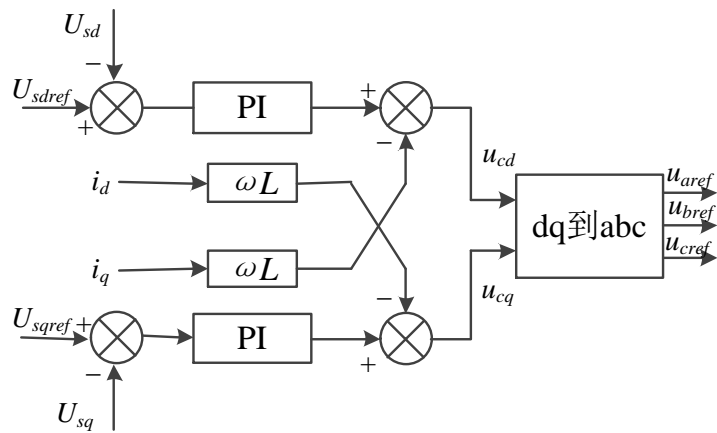


图 2-4 定交流电压控制结构图

### 2.3 VSC-MTDC 的电压协同控制策略

与两端 VSC-HVDC 系统相比，VSC-MTDC 系统具有可靠性高、经济性好、运行方式灵活等优点，更适用于分布式能源的大规模接入。但是随着换流站个数的增加，系统的拓扑结构更为复杂，因此 VSC-MTDC 系统的控制也变的更为复杂。交流系统的稳定性包括电压稳定、频率稳定和功角稳定，而直流系统

的稳定性仅取决于直流电压的稳定，因此 VSC-MTDC 系统控制策略的核心是实现对各换流站直流电压的稳定控制。

两端 VSC-HVDC 是简单的点对点输电系统，一侧换流站采用定直流电压控制维持系统的电压稳定，另一侧换流站采用定有功功率控制决定交换的有功功率，系统就稳定运行。但是对于 VSC-MTDC 系统，为了提高供电的可靠性，当一端换流站控制直流电压时，其余换流站可以为系统提供直流电压的后备控制，需要有至少两个换流站具备控制直流电压的能力。适用于 VSC-MTDC 的直流电压协调控制策略主要有主从控制、偏差控制和斜率控制，本节对这几种控制策略分别进行了研究。

### 2.3.1 直流电压主从控制策略

直流电压主从控制是一种控制结构比较简单的控制方式，其控制思路为：在 VSC-MTDC 系统中选择其中一个换流站作为主换流站，其余换流站为从换流站。正常运行时，主换流站采用定直流电压控制，从换流站采用定有功功率控制，由主换流站负责系统的电压稳定和功率平衡。当系统出现较大幅度的功率波动，主换流站的有功功率出力达到限值甚至退出运行时，系统将无法稳定运行。此时，上层控制环节识别到主换流站失去直流电压控制能力和系统功率不平衡时，会发出控制模式切换指令，将一个从换流站的控制方式切换为定直流电压控制，作为新的主换流站，接管系统直流电压稳定和功率平衡的控制任务。主从控制的控制器结构如图 2-5 所示。

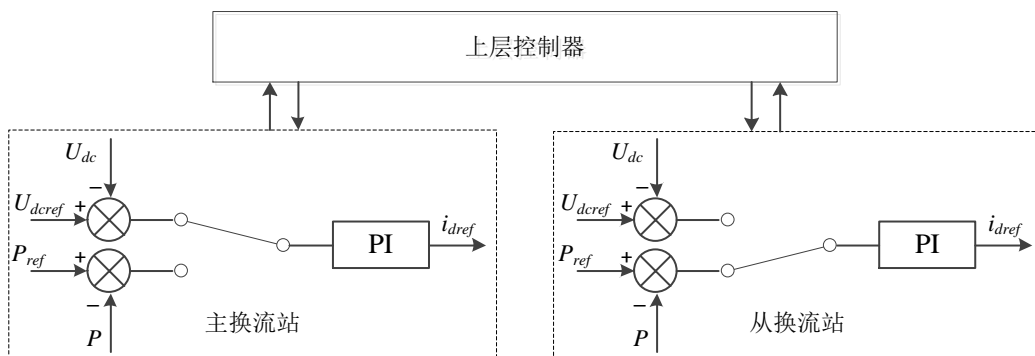


图 2-5 主从控制的控制器结构图

主从控制结构简单，容易实现，但对上层控制有较大依赖，且需要系统具有快速准确的通信能力，难以应用于线路较长的柔性直流系统，一般在背靠背系统中较为适用。

### 2.3.2 直流电压偏差控制策略

主从控制策略的实现依赖于快速准确的通信能力，不适宜远距离的 VSC-MTDC 系统使用。在远距离的多端柔性直流系统中，可以预先整定好各换流站的直流电压偏差值，换流站根据偏差量的大小自动切换控制方式，这就是直流电压偏差控制。直流电压偏差控制的控制特性如图 2-6 所示，其控制思路为：为了使换流站的控制方式可以自动切换，在定直流电压控制站中加入了定有功功率控制环节，在定有功功率控制站中也加入了定直流电压控制环节，且该定直流电压控制器的参考值与主站的直流电压参考值之间有一定的偏差  $\Delta u_{dc}$ 。当系统出现功率不平衡时，采用偏差控制策略的换流站就可以自动切换其控制方式，保证系统的稳定运行。在正常运行情况下，主换流站采用定直流电压控制，从换流站采用定有功功率控制，系统运行于点 B。当出现大扰动而使主换流站失去控制电压的能力时，系统的直流电压会降低或升高。当从换流站直流电压与主换流站直流电压参考值的差达到  $\Delta u_{dc}$  时，从换流站就会自动切换至定直流电压控制方式，接管对系统直流电压的控制任务，此时系统运行于点 A 或点 C。在实际 VSC-MTDC 中，可以在多个定有功功率控制站中都加入定直流电压控制器，每个控制器的直流电压偏差量依次递增。这样即使从换流站到达功率限值，仍然有其余的换流站可以作为备用。直流电压偏差控制的控制器结构如图 2-7 所示。

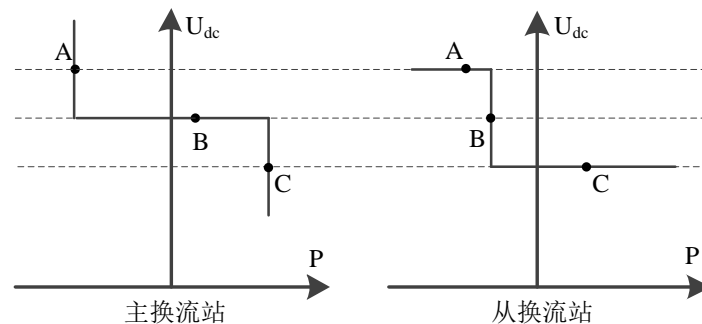


图 2-6 直流电压偏差控制的控制特性

直流电压偏差控制通过在定有功功率换流站加入定直流电压控制，并对各直流电压控制器参考值的偏差量进行协调，可以在主站失去电压控制能力时自动将从站切换为定直流电压控制方式，从而提高了 VSC-MTDC 在大扰动时的稳定性与主从控制相比，偏差控制不需要上层控制，对通信也没有要求。但是

偏差控制仍然存在一定的缺陷：当 VSC-MTDC 的端数增多时，需要设置多个后备定直流电压控制器，每个控制器的直流电压量都不相同。而系统的直流电压不能偏离额定值过多，因此随着换流站数量的增多，控制器的设计难度也会大大增加，所以当换流站数目较多时，不适宜采用直流电压偏差控制策略。

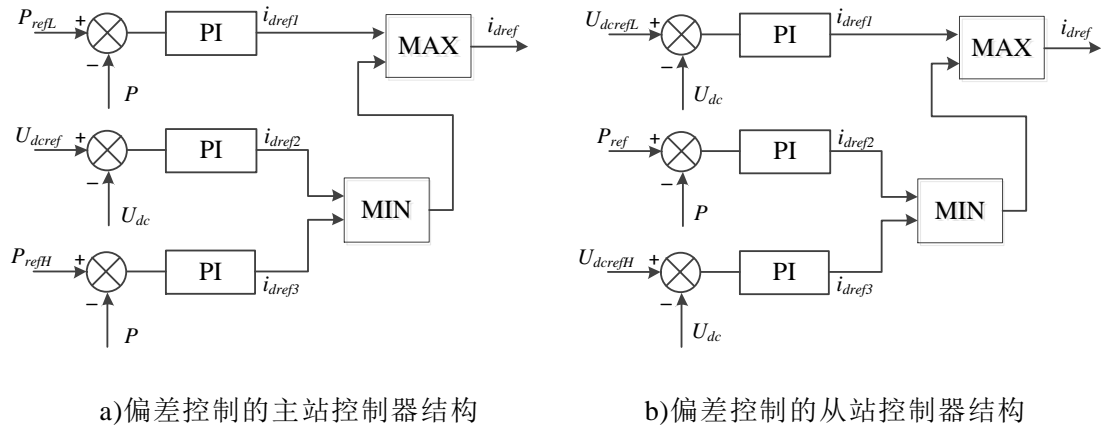


图 2-7 偏差控制的控制器结构图

### 2.3.3 直流电压斜率控制策略

直流电压斜率控制是指换流站直流电压与有功功率呈线性关系的一种控制策略。直流电压斜率控制的控制特性如图 2-8 所示，控制思路为：直流电压斜率控制综合了定直流电压控制和定有功功率控制的特性，采用直流电压斜率控制的换流站可以根据直流电压来调整与交流侧交换的有功功率，从而使系统满足有功功率平衡。例如，当系统直流侧有功功率不足时，直流电压会下降，由图 2-8 可知，在直流电压下降时换流站会增加发出的有功功率，对系统的功率不足进行补偿，最终达到新的有功平衡，此时新的平衡点的直流电压比之前要低。直流电压斜率控制的控制器结构如图 2-9 所示<sup>[46]</sup>。

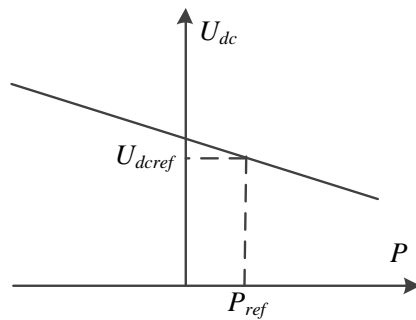


图 2-8 直流电压斜率控制的控制特性

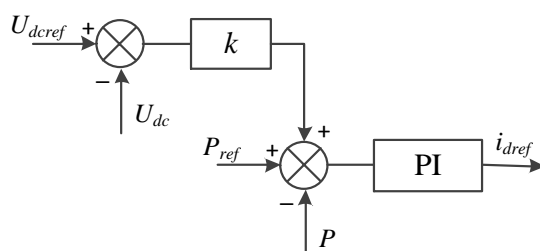


图 2-9 斜率控制的控制器结构图

斜率控制特性的斜率由图 2-9 中的  $k$  决定。若  $k$  较大，则各换流器可以对有功功率进行较好的分配，但是直流电压会发生较大的波动；若  $k$  较小，则功率的分配性能较差，但是直流电压的质量较好。因此，VSC-MTDC 采用直流电压斜率控制策略时，要选择合适的  $k$ ，从而兼顾电压质量和功率分配性能，保证系统的可靠运行<sup>[47, 48]</sup>。

直流电压斜率控制还具有扩展性好的优点，而且也没有对上层控制和通信的需求。当 VSC-MTDC 采用斜率控制时，有功功率出现小幅度波动时换流站可以自动调整有功功率的出力，维持系统的功率平衡。但是，如果系统发生大规模的功率变化，可能会引起直流电压偏离过大，甚至超过正常的运行范围，以及换流站有功功率越限的问题。此时就需要上层控制器根据系统当前的运行情况协调各斜率控制器的整定值，优化系统的运行状况，维持 VSC-MTDC 的稳定运行。本文第 4 章将对这一问题进行具体讨论。

## 2.4 本章小结

建立合适的数学模型是对 VSC-MTDC 进行研究的基础，本章首先在 abc 三相静止坐标系下建立了单个电压源换流器的数学模型，再通过坐标变换推导了其在 dq0 同步旋转坐标系下的数学模型，并设计了 VSC-HVDC 的双闭环控制结构。其中外环根据所连接系统类型的不同选用直流电压、有功功率、无功功率和交流电压等不同的控制量，内环采用前馈补偿的方式消除了有功功率和无功功率之间的耦合，从而实现了有功、无功的独立控制。最后，对拓扑结构更为复杂的 VSC-MTDC 系统的控制策略进行了研究。研究了 VSC-MTDC 适用的直流电压主从、偏差和斜率控制策略，分析了每种控制策略的优点和不足，并设计了每种控制策略的控制器结构。

## 第3章 多端柔性直流系统控制参数初始化及优化方法

控制系统是控制柔性直流系统稳定运行的重要环节，比例积分控制器结构简单，控制效果好，并且具有较强的鲁棒性，被广泛应用于国内外的柔性直流工程中。然而，PI 控制器中比例参数  $k_p$  和积分参数  $k_i$  会对控制器的控制效果产生重大影响，从而决定柔性直流系统的运行状况，因此对 PI 参数的选择至关重要<sup>[34, 38]</sup>。PI 控制作为一种工业中普遍使用的控制方法，对其参数的整定有很多经典方法<sup>[49, 50]</sup>。ZN 经验法和 Cohen-Coon 法等许多方法在整定 PI 参数时要求知道控制系统的传递函数，然而 VSC-HVDC 系统是一个双输入、双输出、非线性的耦合系统，其准确的传递函数很难描述<sup>[36]</sup>。目前工程中一般采用试凑法对 PI 参数进行调节，然而在改变控制参数改善某一指标时，可能会引起其他指标的恶化<sup>[32]</sup>，参数的确定往往带有很强的主观性，因此对多端柔性直流系统中控制器 PI 参数的研究及优化有着重要的意义。

本章提出了一种对多端柔性直流系统控制器的 PI 参数进行优化的方法，构造了采用偏差控制策略的 VSC-MTDC 系统适用的优化目标函数，并针对单纯形法对初值较为敏感的问题，提出了一种对 PI 参数进行初始选择的方法。在选择初始参数的基础上，考虑 ITAE 指标对控制器的 PI 参数进行优化。对采用偏差控制策略的 VSC-MTDC 系统进行了仿真，对 PI 参数优化前后的系统波形和控制效果进行了对比，验证了所提出初始化和优化方法的有效性，并验证了采用优化后 PI 参数的 VSC-MTDC 系统的鲁棒性。

### 3.1 基于单纯形法的控制参数优化

#### 3.1.1 单纯形优化算法

单纯形算法是求解无约束优化问题的一种有效算法，它的算法程序简单，占用内存小，不需要知道系统的传递函数，也不需要进行复杂的矩阵运算，计算量小<sup>[51]</sup>。因此本文选用单纯形算法对柔性直流系统的控制参数进行优化。

所谓的单纯形是指  $n$  维空间  $E_n$  中具有  $n+1$  个顶点的凸多面体。单纯形算法的基本思想是：给定  $E_n$  中一个单纯形后，求出  $n+1$  个顶点上的函数值，确定出有最大函数值的点称为最坏点和最小函数值的点称为最好点，然后通过反射、

扩展、压缩等方法求出一个较好点，用它取代最坏点，构成新的单纯形，依次进行迭代。否则通过向最好点收缩形成新的单纯形重复迭代，用这样的方法逼近极小点<sup>[37, 38, 51]</sup>。然而，单纯形法的缺点是容易陷于局部最优点，对初值依赖度较高，选择不同的初始值对于优化的结果有很大的影响。

对于含有  $k$  个 PI 控制器的柔性直流系统，总共有  $2k$  个待优化的 PI 参数。这些参数往往处于不同的数量级下，并且之间差距较大。当采用单纯形法对柔性直流系统的控制参数进行优化时，要考虑到参数数量级不同带来的影响。如果直接对原始参数进行优化，由于参数数量级的差异，会导致数量级较大的参数只会在初始值附近很小的范围内进行搜索，而数量级较小参数的波动程度又会过大。因此，为了提高算法的搜索效率，在采用单纯形算法进行优化前需要对系统的 PI 参数进行预处理。本章的方法是对待优化的参数进行归算，将待优化的系统控制参数统一到同一数量级下，对归算后的 PI 参数进行单纯形优化，再将得到的最优参数反向归算至实际的数量级下，得到实际的优化后 PI 参数，代入多端柔性直流系统中计算目标函数值，并进行下一次的迭代。

### 3.1.2 目标函数的构造

#### 3.1.2.1 单个控制器的评价指标

目标函数作为算法优化选择的标准，其选取会影响优化后 PI 参数的控制性能，进而影响系统的运行特性，因此要根据期望达到的优化效果来构造目标函数。对于 VSC-MTDC 系统来说，对控制器 PI 参数进行优化是为了保证系统的控制效果最好，包括稳态时各换流站的直流电压稳定，以及当出现扰动使系统的运行状况发生变化时能尽快平稳过渡到下一个状态。控制器的外环控制量包括直流电压、有功功率和无功功率等，因此可以通过计算控制量的实际值与参考值的差来评价系统的控制效果。并且考虑到系统在过渡过程中，系统的直流电压和有功功率应尽可能快速平稳过渡到参考值，因此在目标函数中应该引入与时间  $t$  相关的量。综上考虑，本章选用工程中广泛使用的时间乘以绝对误差积分 (ITAE) 准则作为评价系统控制器的指标：

$$J_{ITAE} = \int_0^t te(t)dt \quad (3-1)$$

式中， $t$  为时间， $e(t)$  为该控制器控制量的测量值与其参考值的差。该指标可以

综合考虑控制量的误差与系统过渡的时间，适合作为控制器的评价指标。

### 3.1.2.2 VSC-MTDC 的系统结构和控制策略

如本文第 2 章所述，为了保持多端柔性直流系统的稳定运行，需要至少有两个换流站具备对直流电压的控制能力。本章搭建了一个三端的 VSC-MTDC 系统，系统采用直流电压偏差控制策略。VSC-MTDC 的拓扑结构如图 3-1 所示，各个换流站的控制特性如图 3-2 所示。

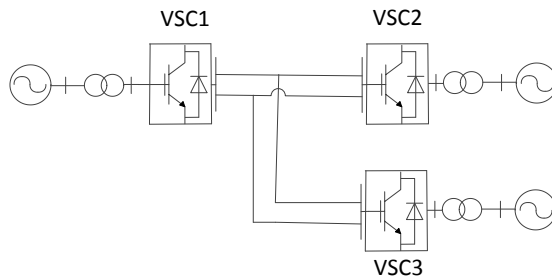


图 3-1 三端系统拓扑结构图

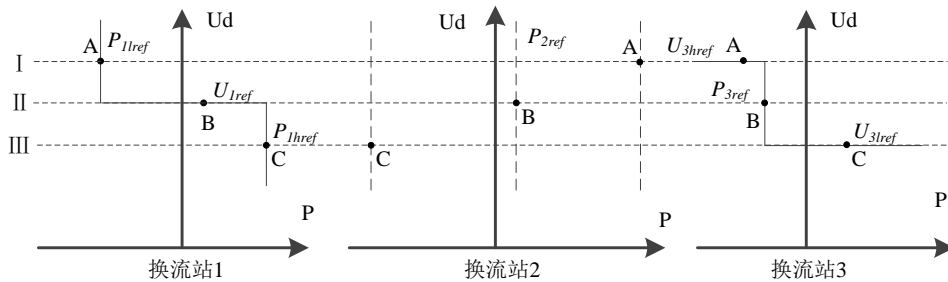


图 3-2 采用偏差控制策略的三端柔性直流系统控制特性

以上图中， $U_{1ref}$  为换流站 1 中定直流电压控制器的参考值； $P_{11ref}$  和  $P_{1href}$  分别为换流站 1 有功功率的运行限值。分别用  $U_{1c}$ 、 $P_{1lc}$ 、和  $P_{1hc}$  表示换流站 1 的直流电压控制器和两个有功功率控制器，换流站 2 和换流站 3 控制器和其参考值的表示方式与换流站 1 类似。

正常情况下，系统运行于点 B，此时换流站 1 为系统的主换流站，负责控制系统的直流电压恒定和有功功率平衡，换流站 2 和换流站 3 采用定有功功率控制方式。当换流站 1 失去控制直流电压的能力时，换流站 3 切换为定直流电压控制方式，接管对系统直流电压的控制，以保证系统的稳定运行，此时系统运行于点 A 或点 C。

### 3.1.2.3 VSC-MTDC 控制参数优化的目标函数

与换流站控制方式固定的 VSC-HVDC 系统不同，采用偏差控制策略的换

流站可以根据系统的运行状况自动切换其控制方式，即换流站 1 和换流站 3 既可以运行于定直流电压控制方式，也可以运行于定有功功率控制方式。在对多端柔性直流系统的控制参数进行优化时，要考虑到与 VSC-HVDC 系统的不同，构造多端系统适用的目标函数。本章提出一种根据系统控制特性区域的不同划分时间区间的方法来构造控制参数优化时的目标函数。

虽然换流站 1 和换流站 3 的控制方式会发生变化，但是在任一时刻换流站的控制方式是固定的。所以根据换流站控制方式的不同，将图 3-2 中整个系统的控制特性分为 I、II、III 三个区域，在任一时刻中，系统的控制方式一定处于三个区域中的某一种。并且不论系统运行于哪一区域中，都是由一个换流站控制直流电压，其余两个换流站控制有功功率。再根据控制区域的不同将系统的整个运行过程划分为若干个时间区间，在每个时间区间中系统的运行区域不改变，换流站 1 和换流站 3 的控制特性不发生切换。通过这种划分时间区间的方法，系统在每个时间区间的子目标函数可以表示为：

$$J_{of1} = \omega_1 \int_{t_0}^{t_1} t |e_U(t)| dt + \omega_2 \int_{t_0}^{t_1} t |e_{P1}(t)| dt + \omega_3 \int_{t_0}^{t_1} t |e_{P2}(t)| dt + \omega_4 \int_{t_0}^{t_1} t |e_Q(t)| dt \quad (3-2)$$

式中， $t_0$ 、 $t_1$  为该时间区间起始与结束的时刻； $e_U$ 、 $e_{P1}$ 、 $e_{P2}$ 、 $e_Q$  分别为该时间区间中直流电压控制器、两个有功功率控制器和无功功率控制器的参考值与实际值的差； $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$  为每一控制量在整个目标函数中的权重，权重越大，表示该控制量越重要。目标函数越小，表示控制量的实际值越接近参考值，控制器的控制能力越好。

通过按照控制特性区域划分时间区间的方法，系统整个运行过程的目标函数就相应地离散成多个积分区间不同的子目标函数，每一个时间区间内评价系统控制性能的子目标函数与式(3-2)类似。再将各个时间区间的子目标函数相加，总和就是系统整个运行过程中的目标函数值。

$$J_{of} = J_{of1} + J_{of2} + J_{of3} + \dots \quad (3-3)$$

式中， $J_{of1}$ 、 $J_{of2}$ 、 $J_{of3}$  等分别为评价系统控制性能的子目标函数， $J_{of1}$ 、 $J_{of2}$ 、 $J_{of3}$  的公式与式(3-2)类似，但是各自的积分区间不同。

采用本章的方法对多端柔性直流系统的控制参数进行优化，可以避免以往工程中采用试凑法进行参数调节的盲目性，改善系统的控制精度和响应特性。多端柔性直流系统控制器参数优化的流程图如图 3-3 所示。

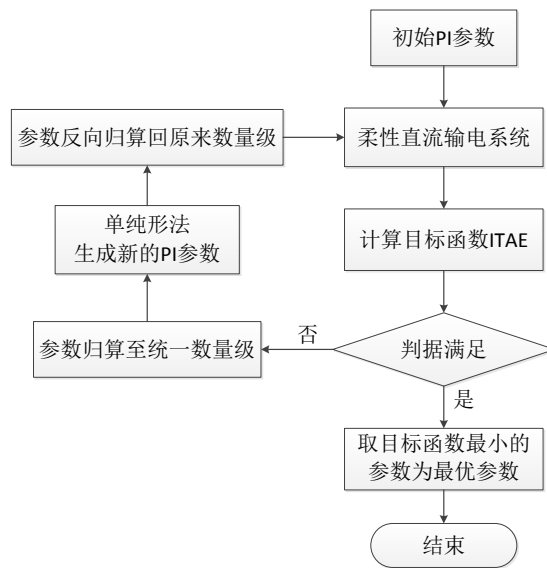


图 3-3 多端柔性直流系统控制参数优化流程图

### 3.2 控制参数初始化

采用单纯形算法对多端柔性直流系统控制参数进行优化时，需要选择一组初始 PI 参数作为单纯形法迭代的初值。初始参数的选择对于参数优化非常必要，原因如下：1) 单纯形算法本身对初值的选择比较敏感，选择合适的初值可以减小算法的迭代次数，并且得到目标函数更小的最优参数；2) 合适的初值可以避免算法在系统运行特性较差的参数区域进行重复的搜索和迭代计算；3) 良好的初始参数可以确保系统顺利启动至稳定运行状态。

目前对于 PI 参数初始化的内容很少，已有文献中大多人为给定一组初始参数作为单纯形法迭代的初值，但初值的选择具有很强的主观性。本章提出了一种对 VSC-MTDC 系统的控制器参数进行初始选择的方法：对于系统中每一个 PI 控制器，按照一定间隔分别选取  $m$  个  $k_p$  参数和  $n$  个  $k_i$  参数，组成  $m \times n$  组 PI 参数作为样本，利用 PSCAD/EMTDC 软件的 multiple run 功能，比较样本中  $m \times n$  组 PI 参数的控制性能，选择控制效果最好的一组作为该比例积分控制器的初始参数。在对  $k_p$  和  $k_i$  参数进行选择时，考虑到控制参数在同一数量级下变化时系统的响应不会有太大的改变，如果采用等步长的方法选则 PI 参数，选用的步长太大时总样本数较少，最后得到的结果不够优秀，而步长太小时又会产生很多不必要的计算。为了在适量的样本数中选取尽可能较大范围的 PI 参数，本章采用了等比例的采样方法：即样本中每一个  $k_p$  参数或  $k_i$  参数之间为近似 2 倍的关系。

在柔性直流系统中，每一个 PI 控制器都只控制着例如直流电压、有功功率和无功功率中的一种控制量，因此该控制器的 PI 初始参数应能保证对其控制量稳定、准确的控制。本章引入如下的目标函数来衡量某一 PI 控制器的控制效果：

$$J_{ini} = \frac{|X_{\max} - X_{ref}| + |X_{\min} - X_{ref}|}{X_{ref}} \quad (3-4)$$

式中， $X_{ref}$  为该控制量的参考值， $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别是系统达到稳态时该控制量实际波形的峰值和谷值。采用该目标函数不仅可以衡量控制量与其参考值之间的稳态偏差，而且可以衡量稳态时控制量的波动程度。

采用偏差控制的三端柔性直流系统中共有 10 个 PI 控制器，而系统在运行过程中，并不是 10 个 PI 控制器同时实现对系统的实际控制。例如当系统运行于图 3-2 的区域 I 时，换流站 1 的  $U_{1c}$  控制器和  $P_{1hc}$  控制器，以及换流站 3 的  $P_{3c}$  控制器和  $U_{3lc}$  控制器此时不对系统具有实际的控制效果。因此，在对 VSC-MTDC 系统的控制参数进行初始化时，需要根据系统运行区域的不同分别对起到实际控制作用的 PI 控制器参数进行初始化。

对控制参数初始化的流程图如图 3-4 所示，图中， $k_{ps}$ 、 $k_{it}$  分别为样本中第  $i$ 、第  $j$  个比例参数、积分参数。

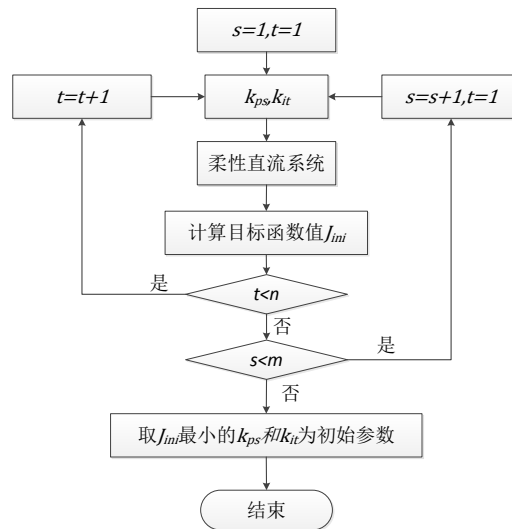


图 3-4 控制参数初始化流程图

对控制参数的初始化只考虑了单一 PI 控制器在稳态下对其控制量的控制效果，因此还需要在初始参数的基础上对整个系统的运行特性进行更全面的优化。在得到所有控制器的初始参数后，还需要采用上节的方法，考虑系统在运行状况改变时的过渡过程对所有控制器的参数进行优化，使得控制系统的整体控制效果最好。

### 3.3 仿真分析

#### 3.3.1 VSC-MTDC 仿真模型参数

为了验证所提出控制参数初始化和优化方法的正确性和可行性，在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建了如图 3-1 所示的三端 VSC-MTDC 系统进行了仿真验证。系统参数如下：三个换流站交流侧均连接无穷大交流系统，交流系统线电压有效值为 10kV，频率 50Hz，连接变压器变比为 10kV/5kV，额定直流电压为 10kV，换流站额定容量均为 10MW，忽略直流线路的电阻。换流站采用直流电压偏差控制策略，三个换流站的控制特性如图 3-2 所示，其中， $U_{1ref}=10\text{kV}$ ， $P_{1lref}=-4\text{MW}$ ， $P_{1href}=4\text{MW}$ ， $P_{3ref}=-2\text{MW}$ ， $U_{3lref}=9.5\text{kV}$ ， $U_{3href}=10.5\text{kV}$ 。

本文研究的三端系统总共有 10 个 PI 控制器，因为各个换流站除了控制策略外系统的结构完全相同，并且每一个换流站的无功功率控制器结构也相同，为了简化计算，减少待优化的控制参数数目，缩短仿真时间，本章设定 3 个换流站无功功率的控制参数相同，待优化的控制器数目减少为 8 个。

#### 3.3.2 仿真过程和结果对比

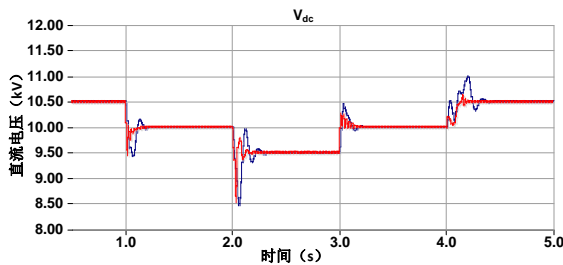
参数初始化的过程为：先设定  $P_{2ref}=7\text{MW}$ ， $Q_{2ref}=2\text{MW}$ ，此时系统运行于区域 I，对换流站 1 的  $P_{1lc}$  控制器，换流站 2 的  $P_{2c}$  控制器，换流站 3 的  $U_{3hc}$  控制器，以及所有换流站的无功功率控制器  $Q_c$  的参数进行初始化。然后更改  $P_{2ref}$  的值分别为 1MW 和 -6MW，使系统再运行在区域 II 和区域 III，继续对其他 PI 控制器的参数进行初始化。

得到所有控制器的初始参数后，以这些初始值作为单纯形法的初值，采用单纯形法对控制参数进行优化。因为直流电压的稳定是柔性直流系统最重要的，因此将目标函数中与直流电压相关的权重设为 2，其余为 1，即  $\omega_1=2$   $\omega_2=2$   $\omega_3=2$   $\omega_4=2$ 。仿真过程如下：开始时设定  $P_{2ref}=7\text{MW}$ ，1s 时  $P_{2ref}$  变为 2MW，2s 时  $P_{2ref}$  变为 -6MW，3s 时  $P_{2ref}$  变为 2MW，4s 时  $P_{2ref}$  再变为 7MW，三个换流站的无功功率参考值均为 0。优化的目标函数为式(3-3)，整个积分区间为 0.5s 至 5s，共分为 5 个时间区域，对应于 5 个子目标函数。在这段过程中，VSC-MTDC 系统的运行区域经历了 I → II → III → II → I 的过渡，考虑了系统在实际运行时可能出现的控制策略切换的所有情况。控制器初始化和优化后的参数值以及目标

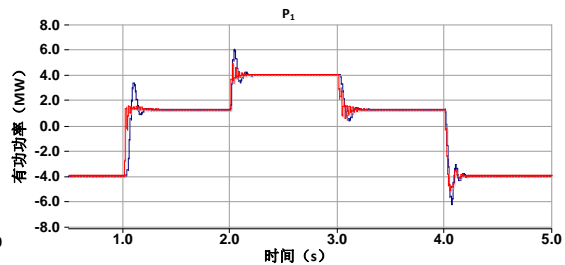
函数如表 3-1 所示，采用初始参数和优化后参数时系统的直流电压、有功功率和无功功率波形对比如图 3-5 所示，其中蓝色波形为采用初始参数的系统波形，红色为采用优化后参数的系统波形。

表 3-1 优化前后控制参数及目标函数对比

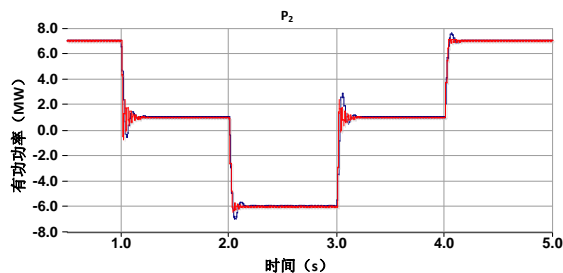
换流站	控制器	初始参数( $k_p, k_i$ )	优化后参数( $k_p, k_i$ )
	$U_{1c}$	(10, 0.0025)	(37.77, 0.001325)
VSC1	$P_{1lc}$	(0.001, 0.005)	(0.001558, 0.003730)
	$P_{1hc}$	(0.001, 0.01)	(0.0006185, 0.0009134)
VSC2	$P_{2c}$	(0.001, 0.01)	(0.001098, 0.0007097)
	$P_{3c}$	(0.01, 0.01)	(0.01624, 0.0008106)
VSC3	$U_{3lc}$	(5, 0.0025)	(7.228, 0.0008737)
	$U_{3hc}$	(5, 0.0025)	(6.847, 0.00008578)
所有换流站	$Q_c$	(0.01, 0.01)	(0.01364, 0.01356)
目标函数		0.5433	0.2778



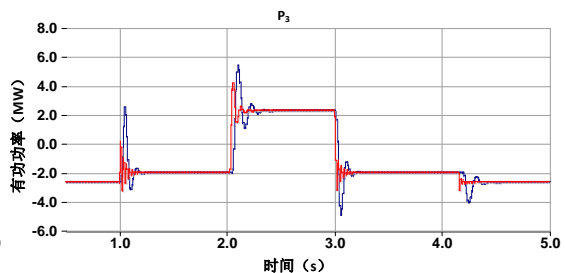
(a)系统直流电压波形



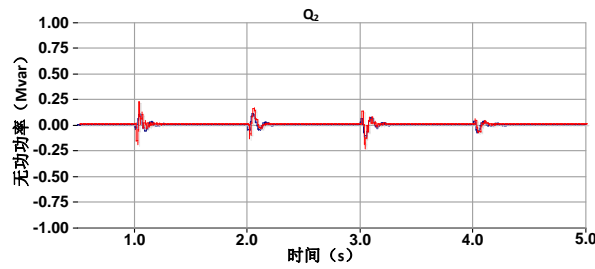
(b)VSC1 有功功率波形



(c) VSC2 有功功率波形



(d) VSC3 有功功率波形



(e)VSC2 无功功率波形

图 3-5 参数初始化和优化后波形对比图

由图 3-5 可知，采用本章提出的控制参数初始化方法得到的初始控制参数已经可以对系统进行比较准确的控制，并且在功率变化时可以完成系统控制区域的顺利切换，稳态下系统波形稳定、准确，控制效果良好。但是在有功功率变化导致系统的控制区域发生切换时，系统的直流电压和有功功率会产生较大的波动，系统的过渡时间较长，过渡过程还需要进行优化。与初始参数相比，经过优化后系统在过渡过程中的直流电压和有功功率的波动减小，并且过渡过程也更为迅速。虽然经过优化后无功功率的波动略有升高，但总体来说整个系统的动态响应得到了改善，由表 3-1 可知，VSC-MTDC 系统控制参数优化后的目标函数为初始参数的 51%。

### 3.3.3 最优参数的鲁棒性检验

采用上述控制参数初始化和优化方法得到的最优参数可以对多端柔性直流系统进行准确的控制，并且系统的过渡过程也得到了优化。但是采用最优参数的系统鲁棒性如何，还需要进行进一步的检验。为了验证采用最优参数的 VSC-MTDC 系统的鲁棒性，对系统正常运行时直流电压的控制站退出运行以及系统交流侧三相短路的情况进行仿真分析。

#### 3.3.3.1 直流电压控制站退出运行

仿真过程如下：开始时 VSC2 定有功功率参考值为 1MW，系统运行于区域 II，由 VSC1 控制系统的直流电压稳定和有功功率平衡，三个换流站的无功功率参考值均为 0。1s 时 VSC1 因为故障退出运行，系统的工作点发生变化，系统直流电压和有功功率波形如图 3-6 所示。开始时，VSC2 向直流系统注入 1MW 的有功功率，VSC3 从直流系统吸收 2MW 有功功率，由 VSC1 控制整个系统的电压稳定和功率平衡。当 1s 时 VSC1 退出运行，直流系统出现有功功率缺额，系统的直流电压下降。当电压下降到 9.5kV 时，VSC3 由原来的定有功功率控

制切换到定直流电压控制，将直流电压稳定在 9.5kV，并调整自身的有功功率来平衡系统功率缺额，系统的运行区域由区域 I 切换至区域 II，1.15s 左右系统过渡到新的稳定运行状态。整个过程中 VSC2 的有功功率控制稳定，没有发生变化。采用优化后控制参数的 VSC-MTDC 系统，在直流电压控制站退出运行时，系统仍然可以自动切换工作点继续稳定运行，过渡过程平稳快速，验证了控制策略的正确性和系统的鲁棒性。

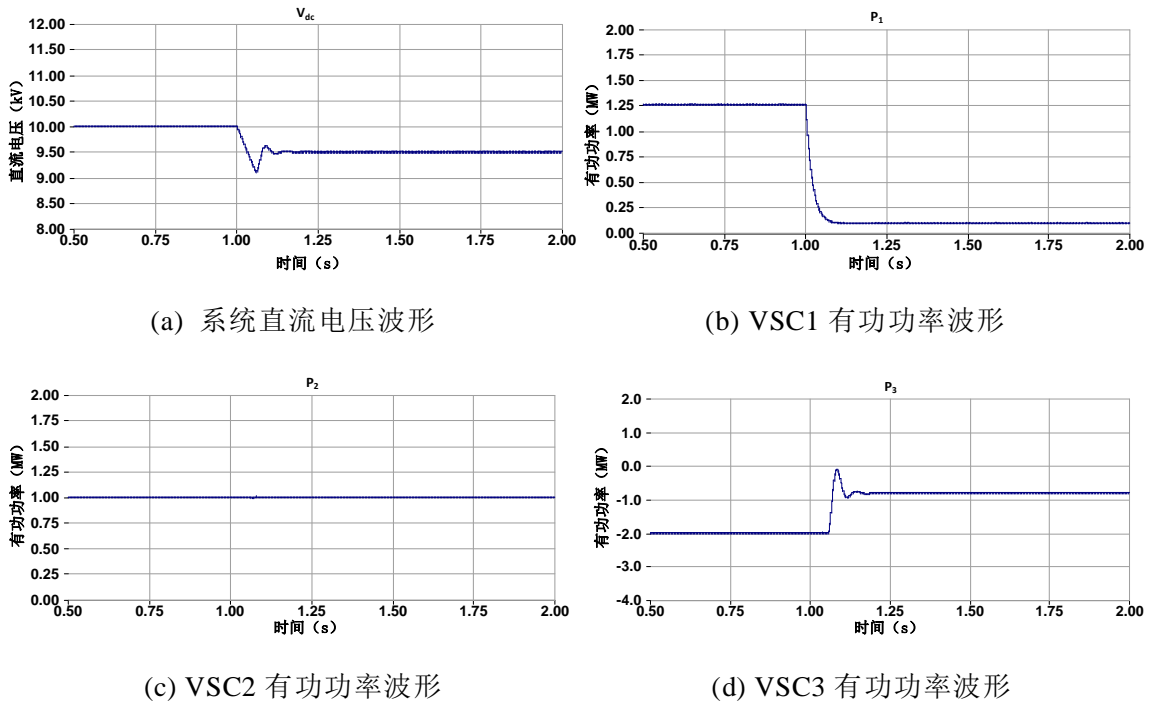


图 3-6 VSC1 退出运行时系统波形图

### 3.3.3.2 系统交流侧三相短路

仿真过程如下：开始时 VSC2 定有功功率参考值为 1MW，系统运行于区域 II，由 VSC1 控制系统的直流电压稳定和有功功率平衡，三个换流站的无功功率参考值均为 0。1s 时 VSC1 侧变压器与交流电网之间发生三相短路故障，故障持续时间为 0.1s，系统直流电压和有功功率波形如图 3-7 所示。开始时，由 VSC1 控制系统的电压稳定和功率平衡，系统运行于区域 II。1s 时由于 VSC1 交流侧发生三相短路，VSC1 侧的有功功率出现跌落，直流系统出现功率缺额，系统的直流电压迅速下降。1.1s 短路故障清除后，VSC1 继续恢复对系统直流电压的控制，直流电压上升，经短时振荡后稳定在参考值 10kV。VSC1 和 VSC3 的有功功率逐渐恢复短路故障前的数值，VSC2 在故障中基本没有受到影响，1.25s 左右系统完全恢复稳定运行。采用优化后控制参数的 VSC-MTDC 系统，

在直流电压控制站出现短路故障时，系统具有一定的故障穿越能力。

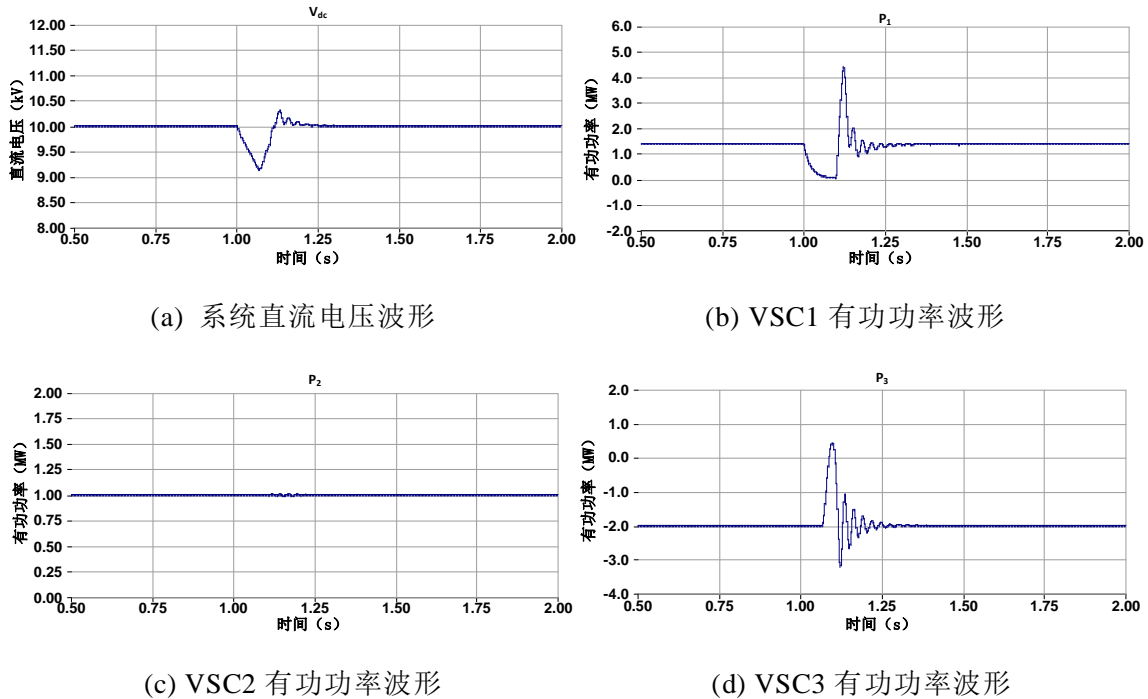


图 3-7 VSC1 交流侧三相短路时系统波形图

### 3.4 本章小结

对于多端柔性直流系统控制参数的确定问题，本章提出了一种对采用偏差控制策略的 VSC-MTDC 系统控制器的 PI 参数进行初始选择的方法，得到的初始控制参数可以准确控制系统的稳态运行状况。在初始参数的基础上，提出了根据系统控制特性区域的不同划分时间区间来构造目标函数的方法，构造了多端柔性直流系统控制参数优化时适用的目标函数，采用单纯形算法对初始参数进行了优化，改善了系统的控制精度和响应特性，优化了系统的过渡过程。

为了验证所提出控制参数初始化和优化方法的正确性和可行性，在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中对采用偏差控制策略的三端 VSC-MTDC 系统进行了动态仿真验证，得到以下结论：

- 1) 提出的控制参数初始化方法得到的初始 PI 参数对系统稳态运行时具有准确的控制效果，避免了以往工程中采用试凑法整定参数的盲目性；
- 2) 采用本章构造的目标函数对系统的初始控制参数进行优化后，取得了良好的优化效果，整个系统的动态响应得到了改善；
- 3) 采用上述参数初始化和优化方法得出的最优参数具有良好的鲁棒性。

## 第4章 多端柔性直流系统的网损优化运行

当多端柔性直流系统采用直流电压斜率控制策略时，各个换流站根据直流电压和有功功率的斜率特性，能够实时快速的调整有功功率出力，平衡系统的功率缺额。但是传统的斜率控制存在直流电压偏差，且斜率特性固定不变，不能根据可再生能源出力或系统负荷的变化调整有功功率和直流电压的参考值。当系统内出现较大幅度的功率波动时，采用固定的斜率控制特性很容易导致系统直流电压越限，使得换流站退出运行。

本章提出了多端柔性直流系统的分层优化控制体系，在满足系统直流电压稳定和有功功率平衡的前提下，可以对系统的运行状况进行优化。其中，控制体系的下层采用直流电压斜率控制策略，负责系统的直流电压稳定和有功功率平衡，是控制体系的基础；控制体系的上层以系统运行时的网损最小为目标，通过计算网络的最优潮流，负责在系统发生功率波动或网络结构变化后对换流站的直流电压和有功功率参考值进行更新，优化系统的运行状况，减少电能损耗。分别对仅采用斜率控制的系统和采用分层优化控制的系统进行了仿真比较，验证了所提出的分层优化控制体系可以保证系统的直流电压稳定，实现系统的最优网损运行，并且即使出现通信中断系统依然可以稳定运行。

### 4.1 多端柔性直流系统的分层优化控制体系

多端柔性直流系统的分层优化控制体系如图 4-1 所示。

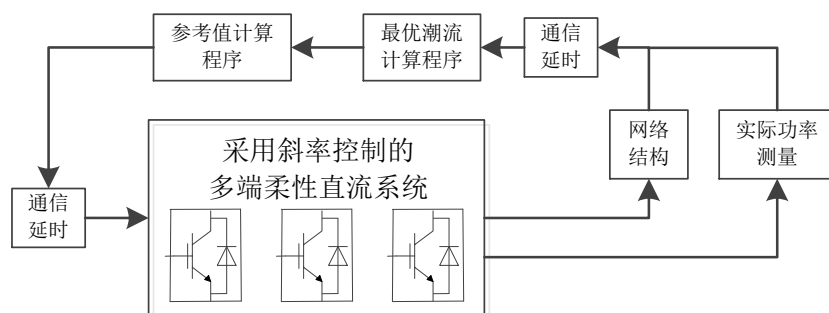


图 4-1 多端柔性直流系统的分层优化控制体系

其中，分层控制体系的下层采用直流电压斜率控制，可以根据系统功率的不平衡自动调整换流器的直流电压和有功功率，且无需通信，负责整个网络的

直流电压稳定和功率平衡；分层控制体系的上层为网损优化运行，负责多端柔性直流系统出现功率波动后网损的优化。上层优化以多端系统运行的网损最小为目标函数，通过周期性的收集测量系统的网络结构、可再生能源的实时出力和负荷数据，计算出在当前系统条件下的最优潮流，进而计算出采用斜率控制的换流站的控制器参考值，并将参考值下发至下层斜率控制系统，实现多端柔性直流系统的最优网损运行。

通过将下层的斜率控制和上层的网损优化运行结合起来，就可以实现在保证系统直流电压稳定和有功功率平衡的前提下，实现系统的最优网损运行。当系统的可再生能源出力或负荷出现变化时，下层的斜率控制首先根据系统的功率缺额自动分配各个换流站的有功功率；在达到参考值更新的时刻时，上层控制计算出当前情况下的最优潮流和换流站的新参考值，经过通信延时后下发给下层控制，使系统调整至最优网损运行。即使分层控制系统的通信出现故障，多端系统也可以按照下层的传统斜率控制策略继续稳定运行，但是不能保证运行过程中系统的网损最小。

## 4.2 下层斜率控制策略

对于多端柔性直流系统来说，下层控制应能不依赖于通信起到控制作用，保证系统稳定可靠运行。本章选择直流电压斜率控制作为系统的下层控制策略，即每一个与交流系统相连的换流站均采用直流电压斜率控制，一起承担对直流电压的控制能力。图 4-2 为直流电压斜率控制的控制特性，采用斜率控制的换流器直流电压随着输出有功功率的增加而线性的下降。多端柔性直流系统采用斜率控制方式时，功率可以在各个换流器之间自动分配，系统不需要上层控制的参与就可以保持稳定运行状态。换流器的斜率控制特性可以写成如下的数学形式：

$$P - P_{ref} + k(U - U_{ref}) = 0 \quad (4-1)$$

式中， $P$  和  $U$  分别是换流器直流侧的有功功率和电压的实际值； $P_{ref}$  和  $U_{ref}$  分别是换流站有功功率和直流电压的参考值，本章中这两个参考值由上层控制通过计算最优潮流后给出； $k$  为控制特性的斜率，本章中该值为提前给定，在运行过程中不发生变化。斜率特性的调整过程如图 4-2 所示，图中控制器的参考值  $P_{ref}$  和  $U_{ref}$  分别变为  $P_{ref}'$  和  $U_{ref}'$ ，斜率特性上移。通过修改斜率控制器的参考值，就可以改变控制器的斜率特性，从而调整换流站的实际出力，使 VSC-MTDC

系统运行于上层优化计算出网损最小的运行点。

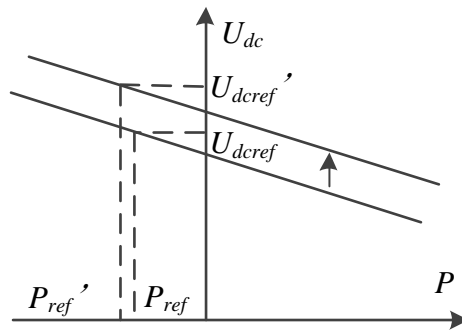


图 4-2 斜率特性的调整过程

### 4.3 上层网损优化运行模型

对多端柔性直流系统运行的优化可以从技术角度和经济角度等方面进行考虑，例如网损，总发电成本，环境成本，供电可靠性等，本章选择系统的网损最小作为运行优化的目标。在下层斜率控制的基础上，通过加入上层的网损优化来控制网侧换流器，就可以实现在保持直流电压稳定的同时，使系统以最优潮流运行，减小网损。上层网损优化通过收集网络结构参数，可再生能源的实时出力以及负荷数据，计算出网络的最优潮流，进而计算出网侧换流站直流电压和有功功率的参考值，再下发至下层的斜率控制器，实现系统的最优网损运行。上层网损优化运行的核心是系统最优潮流的计算，最优潮流计算可以看作是系统各节点电压相关的优化问题，优化问题的目标函数和约束条件如下所示。

#### 4.3.1 目标函数

本章研究的系统网损指的是直流输电线路的损耗，可以用下式表示：

$$f(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n g_{ij} (V_i - V_j)^2 \quad (4-2)$$

式中， $n$  为系统内的节点总数， $g_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的电导， $v_i$  和  $v_j$  分别为节点  $i$  与节点  $j$  的直流电压。

#### 4.3.2 约束条件

多端柔性直流系统的节点可以分为以下三种类型，节点总数为  $n$ ：

(1) 网侧换流站节点，设其个数为  $t$  个；

(2) 负荷侧或者发电侧换流站节点，这种节点的注入功率是已知的，设其个数为  $s$  个；

(3) 只与直流线路相连的节点，其个数为  $n-s-t$  个。

为了保证柔性直流系统的安全稳定运行，对系统的运行进行优化时应满足一定的限制条件。

(1) 系统功率平衡约束

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n G_{ij} V_i V_j = 0, \quad i \in (t+1, n) \quad (4-3)$$

式中， $P_{Gi}$  和  $P_{Li}$  分别为节点  $i$  的注入功率和负荷； $G_{ij}$  为系统节点导纳矩阵的元素。

(2) 节点直流电压约束

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}, \quad i \in (1, n) \quad (4-4)$$

式中， $V_{i\min}$  和  $V_{i\max}$  分别为节点  $i$  直流电压的下限和上限值，本章  $V_{i\min}$  和  $V_{i\max}$  分别取 0.9 和 1.1 倍的额定直流电压。

(3) 换流站有功功率约束

$$|P_i| \leq P_{i\max}, \quad i \in (1, t+s) \quad (4-5)$$

式中， $P_{i\max}$  为换流站  $i$  允许流过的最大有功功率。

(4) 直流线路电流约束

$$|g_{ij}(V_i - V_j)| \leq I_{\max}, \quad i, j \in (1, n) \text{ 且 } i \neq j \quad (4-6)$$

式中， $I_{\max}$  为直流线路上允许流过的最大电流。

(5)  $N-1$  约束

最优潮流计算的目标是减小系统的网损，而在相同的条件下，系统的直流电压越高，网损就越小，因此最优潮流的计算结果是一定会有至少一个换流站的直流电压达到公式(4-4)中直流电压的上限值 1.1pu，其他节点的直流电压和系统潮流再由此决定。这样的缺点是没有给系统留下一定的电压备用来应对可能的暂态过程，一旦线路或网侧换流站发生故障，系统会出现有功功率过剩，

该换流站的直流电压将超过电压上限值，导致保护动作将其切除。

因此在约束条件中加入了  $N-1$  约束的内容。 $N-1$  约束是指，当柔性直流系统中任一换流站退出运行时，在现有参考值下，系统过渡至稳态时剩余换流站的直流电压不会越限，能够继续保证系统的稳定运行。具体  $N-1$  约束的计算方法见下文 4.4.1。

### 4.3.3 求解方法

文献[39]中指出，上层网损优化模型中的等式约束可以近似成线性函数，因此可以认为该优化问题是一个凸优化问题，可以用 MATLAB 中的优化工具箱求解。本章采用内点法对该优化问题进行求解。

## 4.4 稳态计算和结果

将本章提出的分层优化控制体系应用于如图 4-3 所示的五端柔性直流系统中，系统的直流线路长度如表 4-1 所示。系统的直流电压为 10kV，换流站的额定容量均为 10MW。其中 VSC1 和 VSC2 与无穷大交流系统相连，交流系统线电压有效值为 10kV，频率 50Hz，连接变压器变比为 10kV/5 kV，采用斜率控制策略控制系统的直流电压，斜率系数  $k$  取 10；VSC3 和 VSC4 与风电场相连，负责将风电场的有功功率汇入直流电网；VSC5 负责向负荷供电。直流线路的电阻为  $0.01 \Omega/km$ 。

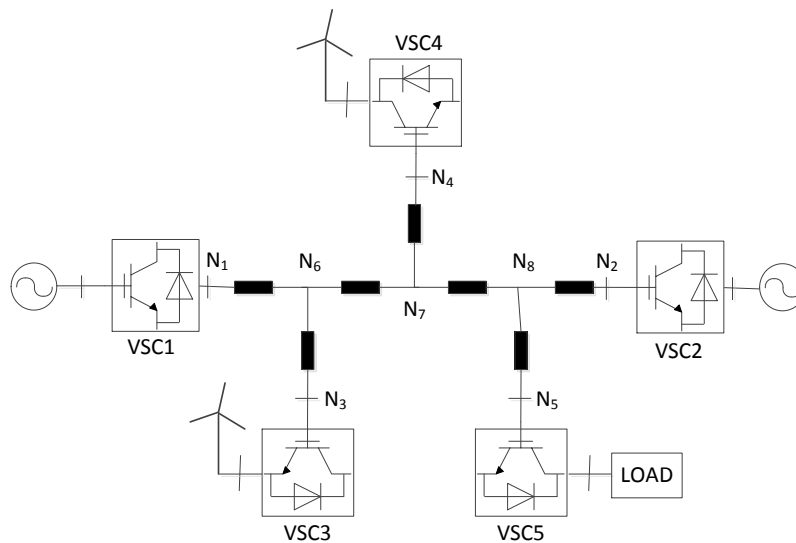


图 4-3 五端柔性直流系统结构图

表 4-1 直流线路的长度

线路编号	$l_{16}$	$l_{36}$	$l_{67}$	$l_{47}$	$l_{78}$	$l_{58}$	$l_{28}$
长度 (km)	15	4	12	6	8	5	15

上层网损优化控制通过收集 VSC3 和 VSC4 侧的风电场出力以及 VSC5 侧的负荷功率，通过最优网损程序计算出系统的最优潮流，进而将直流电压参考值和有功功率参考值分配给 VSC1 和 VSC2，由网侧换流站完成对系统的运行优化，达到系统运行过程中网损最小的目标。

#### 4.4.1 稳态工作点计算

在对系统进行  $N-1$  约束时，需要对系统的稳态工作点进行计算，以 VSC1 退出运行为例对稳态工作点的计算和  $N-1$  约束进行说明。

当 VSC1 出现故障退出运行，而上层控制还没有对参考值进行更新前，应能保证系统稳定后的直流电压在电压限值之内。此时 VSC2 的直流电压和有功功率参考值还没有发生变化，设为  $V_2^*$  和  $P_2^*$ ，根据系统结构列出计算稳态工作点的方程组如式(4-7)所示。通过计算就可以得到 VSC1 退出运行系统稳定后各点的直流电压值，此时各点的直流电压应在直流电压限值  $V_{imin}$  和  $V_{imax}$  之内。

$$\left\{ \begin{array}{l} V_2 g_{28}(V_8 - V_2) = P_2^* \\ V_3 g_{36}(V_3 - V_6) = P_3 \\ V_4 g_{47}(V_4 - V_7) = P_4 \\ V_5 g_{58}(V_5 - V_8) = P_5 \\ g_{36}(V_3 - V_6) + g_{67}(V_6 - V_7) = 0 \\ g_{67}(V_6 - V_7) + g_{47}(V_4 - V_7) + g_{78}(V_8 - V_7) = 0 \\ g_{78}(V_7 - V_8) + g_{58}(V_5 - V_8) + g_{28}(V_2 - V_8) = 0 \\ 10(V_2 - V_2^*) - (P_2 - P_2^*) = 0 \end{array} \right. \quad (4-7)$$

式中，未知量为稳态后剩余节点的直流电压  $V_2, V_3, \dots, V_8$  和 VSC2 的有功功率  $P_2$ ； $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  分别为测量得到的 VSC3，VSC4 和 VSC5 流过的有功功率。

与 VSC1 退出运行类似，其余换流站退出运行时系统也应满足相似的约束条件，此时的系统才是  $N-1$  稳定的。

#### 4.4.2 最优潮流计算结果

采用内点法对多端柔性直流系统最优潮流的计算结果如表 4-2 所示。为了

将本章提出的上层网损优化运行与不包含优化的系统进行比较，表中列举了以下三种不同的算例：第一种为只含传统斜率控制时的潮流；第二种算例对系统的网损进行了优化，但是没有加入  $N-1$  约束；第三种为包含了  $N-1$  约束的最优潮流。算例的 VSC3 和 VSC4 出力分别为 6MW 和 8MW，VSC5 的负荷为 8MW。

表 4-2 三种算例的系统潮流比较

节点	算例 1: 无优化		算例 2: 有优化, 无 $N-1$		算例 3: 包含 $N-1$ 的优化	
	$V_i$ (pu)	$P_i$ (pu)	$V_i$ (pu)	$P_i$ (pu)	$V_i$ (pu)	$P_i$ (pu)
VSC1	0.936	-0.365	1.078	-0.530	1.006	-0.477
VSC2	0.919	-0.190	1.078	-0.038	1.001	-0.086
VSC3	0.953	0.6	1.097	0.6	1.025	0.6
VSC4	0.952	0.8	1.10	0.8	1.027	0.8
VSC5	0.916	-0.8	1.071	-0.8	0.995	-0.8
节点 6	0.948	0	1.093	0	1.020	0
节点 7	0.942	0	1.091	0	1.017	0
节点 8	0.925	0	1.079	0	1.003	0
总网损	3.22%		2.25%		2.60%	

由表 4-2 可知，在只有下层控制而没有网损优化的算例 1 中，柔性直流系统的网损是最高的，为 3.22%，系统的直流电压较低。在加入了网损优化的算例 2 中，系统的网损是最低的，但是代价是风电场侧换流站 VSC4 的直流电压为 1.1pu，达到了直流电压的上限值。在正常运行过程中，风电场侧换流站的直流电压达到上限值没有问题，但是当系统某一换流站断开运行使得系统功率过剩时，整个系统的直流电压将上升，此时 VSC4 的直流电压会越限，导致保护动作将 VSC4 切除，因此在算例 3 中加入了  $N-1$  约束来解决这一问题。在加入了  $N-1$  约束后，VSC4 的直流电压由 1.10pu 下降到了 1.027pu，但是网损由 2.25% 上升到了 2.60%。即便如此，采用了本章提出的包含  $N-1$  约束的网损优化的算例 3 的总网损比只有下层控制的算例 1 下降了约 19%，并且可以保证整个系统是  $N-1$  稳定的。

在算例 3 中可以看到，最优潮流时系统各个换流站的直流电压值在额定电压附近，这是因为此时风电场的出力和负荷都比较大，当网侧换流站或负荷侧换流站退出时，会给系统带来较大的有功功率过剩，使得系统的直流电压上升较多。此时为了满足  $N-1$  约束，最优潮流时系统的直流电压不会太高。当风电

场的出力和负荷较小时，本章的网损优化算法可以将直流电压维持在更高的水平，此时系统的网损将更小。

采用本章提出的分层优化控制体系的五端柔性直流系统，可以保证系统在电压稳定和功率平衡的同时，优化了系统运行时的网损，而且符合  $N-1$  准则的要求。并且系统中 VSC1 和 VSC2 都采用了斜率控制策略，由两个换流站共同承担对系统直流电压的控制，即使任一网侧换流站故障，另一侧换流站仍然可以控制系统的直流电压稳定，具有更高的可靠性。

## 4.5 动态仿真验证

为了验证提出的分层优化控制体系的正确性和应用于多端柔性直流系统时系统的动态特性，对如图 4-3 所示的系统进行了动态仿真验证。因为对系统进行优化时只需要采集风电场和负荷的有功功率数据，不关心具体的控制方式和内部的电磁、机械过程，所以风电场和负荷及与其相连换流站的建模只考虑其外部特性，采用定有功功率控制的换流站进行简化建模。多端柔性直流系统各换流站的下层控制策略见表 4-3。

其中网侧换流站 VSC1 和 VSC2 采用直流电压斜率控制，斜率系数  $k$  为 10，负责平衡系统有功，控制直流电压，保证系统的稳定运行。控制器具体的斜率特性由上层的网损优化通过计算给出。设定下层斜率控制和上层优化的通信延迟为 100ms，上层网损优化的优化周期为 2s，对系统进行了如下的动态仿真：

表 4-3 多端系统各换流站的控制策略

换流站	VSC1	VSC2	VSC3	VSC4	VSC5
控制方式	斜率控制	斜率控制	定有功功率控制	定有功功率控制	定有功功率控制

### 4.5.1 只有下层斜率控制时的动态仿真

此时 VSC-MTDC 系统只有下层斜率控制，没有包含上层的网损优化。仿真开始时，风电场侧换流站 VSC3 和 VSC4 分别发出 3MW 和 4MW 的有功功率，负荷侧换流站 VSC5 吸收 4MW 的有功功率。当  $t=2s$  时，两个风电场发出的有功功率分别增加至 6MW 和 8MW； $t=4s$  时，负荷吸收的有功功率增加至 8MW，这种情况下各个换流站的直流电压和有功功率波形如图 4-4 和图 4-5 所示。当  $t=2s$  风电场的有功功率出力增大时，系统直流侧出现有功功率过剩。由于系统采用了直流电压斜率控制策略，网侧换流站 1、2 同时进行有功功率的调整，根

据设定好的斜率特性增加吸收的有功功率，系统重新达到功率平衡。同时，由于斜率特性的存在，系统的稳态直流电压有所上升。当  $t=4s$  负荷吸收的有功功率增加时，系统直流侧的有功功率出现缺额，换流站 1、2 可以自动减少从直流侧吸收的有功功率维持功率平衡，系统的稳态直流电压有所下降。三种潮流下系统稳态时的网损分别为 0.0118MW，0.0405MW 和 0.0451MW。

可以看出，当风电场输送的有功功率或负荷需求发生变化时，采用下层斜率控制策略的网侧换流站可以根据系统功率的缺额自动调整有功功率，保证系统的直流电压稳定。但是这种直流电压斜率控制策略的斜率特性是固定的，不会根据系统的实际运行发生变化，不能优化系统运行时的网损，而且在功率发生大幅变化时可能会导致过电压的发生。

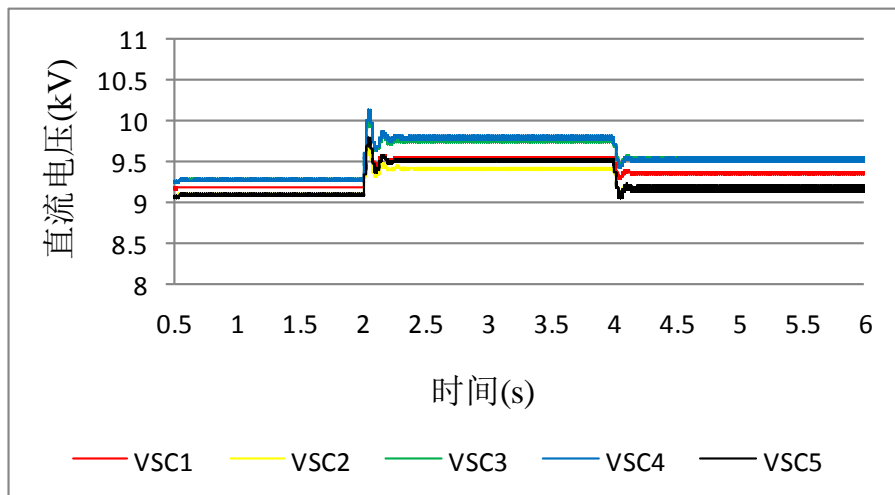


图 4-4 只有下层斜率控制时换流站的直流电压波形

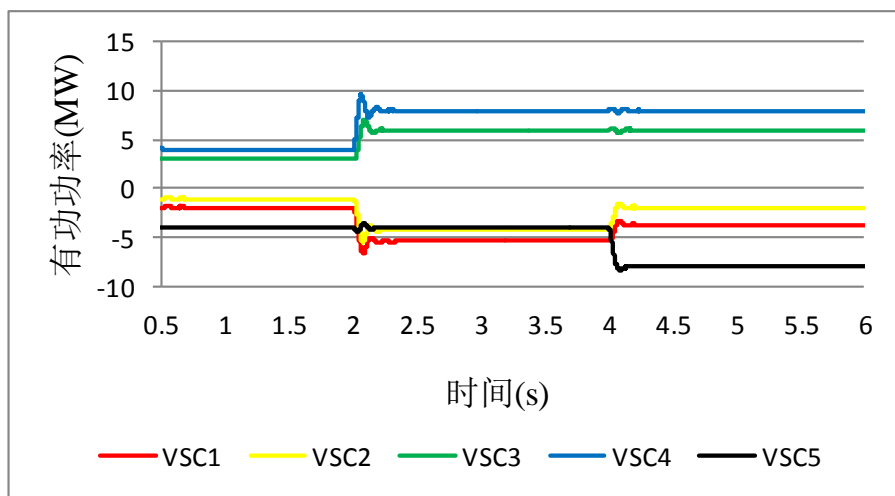


图 4-5 只有下层斜率控制时换流站的有功功率波形

#### 4.5.2 采用分层优化控制体系的系统动态仿真

为了改进传统下层斜率控制策略的缺点，验证所提出分层优化控制体系的有效性，对采用了分层优化控制体系的 VSC-MTDC 系统进行了动态仿真。系统的仿真过程与之前相同，各个换流站的直流电压和有功功率波形如图 4-6 和图 4-7 所示。仿真开始时在斜率控制的作用下，系统功率平衡，电压稳定。在  $t=1\text{s}$  时，上层的网损优化收集系统信息，并于  $t=1.2\text{s}$  时完成新参考值的计算和下发。 $t=1.2\text{s}$  时，网侧换流站 VSC1 和 VSC2 根据上层优化下发的指令值改变了控制器的直流电压参考值和有功功率参考值，系统进行了潮流调整，以计算出的最优潮流运行。由图 4-6 和图 4-7 可知，在这一过程中，VSC1 和 VSC2 的发出的有功功率发生了变化，并且系统的直流电压升高，降低了系统运行时的网损。 $t=2\text{s}$  时两个风电场的出力增加，系统的运行状态发生变化。因为相比之前风电场注入直流网络的有功功率有所增加，使得系统直流电压升高，如果此时网侧换流站退出运行，系统将出现较大的功率缺额，使直流电压进一步升高，系统将出现直流电压越限，所以此次上层优化的主要作用是保证系统的安全运行。 $t=3.2\text{s}$  时，下层的斜率控制器根据上层下发的新的指令值对直流电压参考值和有功功率参考值再一次进行调整，在达到新的稳态运行点后，系统的直流电压下降，提高了运行的可靠性，系统满足  $N-1$  准则。 $t=4\text{s}$  时，负荷由  $4\text{MW}$  上升至  $8\text{MW}$ ，系统的直流电压下降，上层控制在  $t=5\text{s}$  时计算系统的最优潮流， $0.2\text{s}$  后下层控制器更新参考值，完成系统的潮流调整。此时系统的直流电压升高，系统在满足  $N-1$  准则的基础上以最优网损运行。经过上层网损优化后，三种潮流下系统稳态时的网损分别为  $0.0084\text{MW}$ ， $0.0370\text{MW}$  和  $0.0364\text{MW}$ ，与只有下层斜率控制时系统的网损相比有所降低。

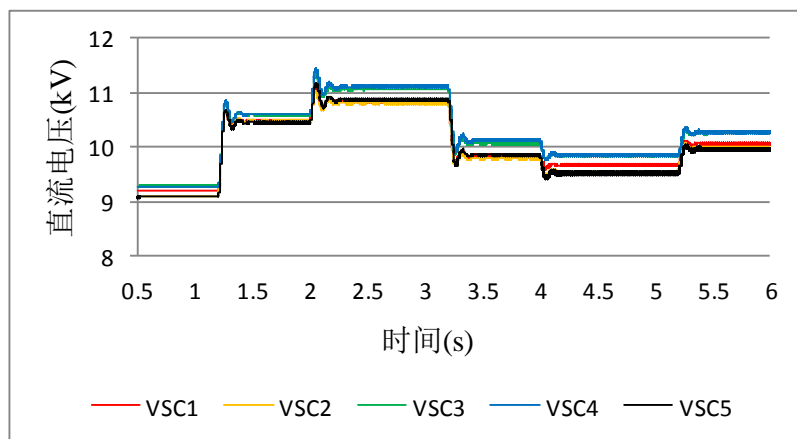


图 4-6 采用分层优化控制体系时换流站的直流电压波形

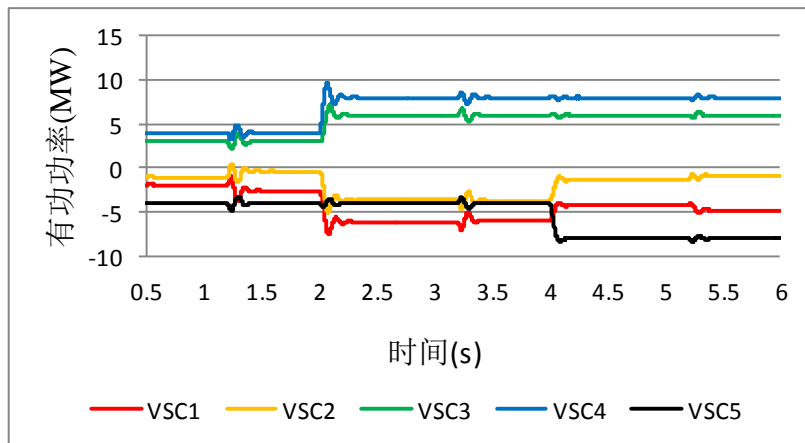


图 4-7 采用分层优化控制体系时换流站的直流电压波形

当在下层斜率控制策略中加入上层的网损优化后，通过采集风电场和负荷的有功功率，系统可以周期性的更新网侧换流站的有功功率参考值和直流电压参考值，优化换流站的斜率控制特性，调整系统的潮流分布，使系统在当前运行状况以最小网损运行，并且满足  $N-1$  的准则。

### 4.5.3 系统某一换流站退出时的动态仿真

#### 4.5.3.1 网侧换流站退出运行

仿真开始时，风电场侧换流站 VSC3 和 VSC4 分别发出 3MW 和 4MW 的有功功率，负荷侧换流站 VSC5 吸收 4MW 的有功功率。 $t=2s$  时，换流站 1 由于故障退出运行，当  $t=2.5s$  时故障排除，换流站 1 重新接入多端系统中。这种情况下各个换流站的直流电压和有功功率波形如图 4-8 和图 4-9 所示。仿真开始时在斜率控制的作用下，系统功率平衡，电压稳定， $t=1.2s$  时，系统进行了潮流调整，以计算出的最优潮流运行，这一阶段的波形跟 4.5.2 节中相同。当  $t=2s$  换流站 1 退出运行时，VSC1 吸收的有功功率骤降为 0，此时系统出现功率过剩，将由 VSC2 增加从系统中吸收的有功功率，维持系统功率平衡。由于斜率特性的存在，系统的直流电压上升。此时，VSC3 的直流电压是各个换流站直流电压中最高的，达到了直流电压的上限值 1.1pu，其他换流站的直流电压均在直流电压限值以内，验证了所提出  $N-1$  约束的正确性。由此可见，在网侧换流站突然退出的情况下系统仍然可以稳定运行，系统满足  $N-1$  准则。 $t=2.5s$  时，VCS1 重新连入系统，系统恢复到原来的运行状态。

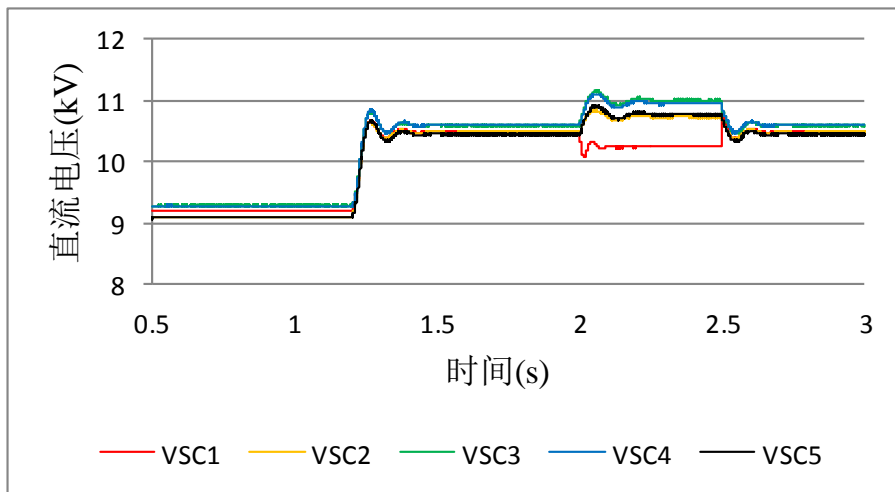


图 4-8 VSC1 退出运行时换流站的直流电压波形

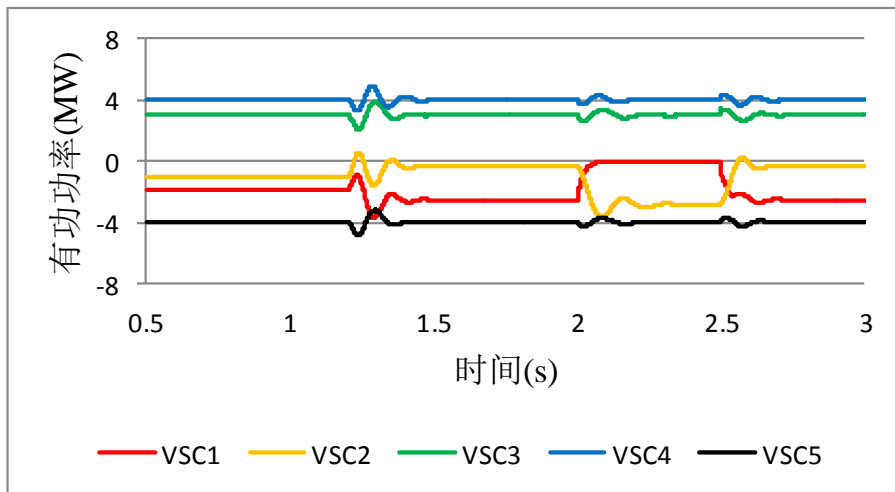


图 4-9 VSC1 退出运行时换流站的有功功率波形

#### 4.5.3.2 风电场侧换流站退出运行

仿真开始时，风电场侧换流站 VSC3 和 VSC4 分别发出 3MW 和 4MW 的有功功率，负荷侧换流站 VSC5 吸收 4MW 的有功功率。t=2s 时，VSC3 由于故障退出运行。这种情况下各个换流站的直流电压和有功功率波形如图 4-10 和图 4-11 所示。仿真开始时在斜率控制的作用下，系统功率平衡，电压稳定，t=1.2s 时，系统进行了潮流调整，以计算出的最优潮流运行，这一阶段的波形跟之前相同。当 t=2s 换流站 3 退出运行时，VSC3 注入系统的有功功率骤降为 0，此时系统出现功率缺额，将由网侧换流站 VSC1 和 VSC2 一起调整有功功率，维持系统功率平衡。由图 4-11 可以看出，VSC2 由吸收功率变成发出功率，进行了一次功率反转，因为此时风电场侧换流站 VSC4 发出的有功功率等于负荷需

要的有功功率，所以 VSC2 吸收的有功功率基本等于 VSC1 发出的有功功率，系统最终达到功率平衡稳定运行。由于斜率特性的存在，系统的直流电压下降。

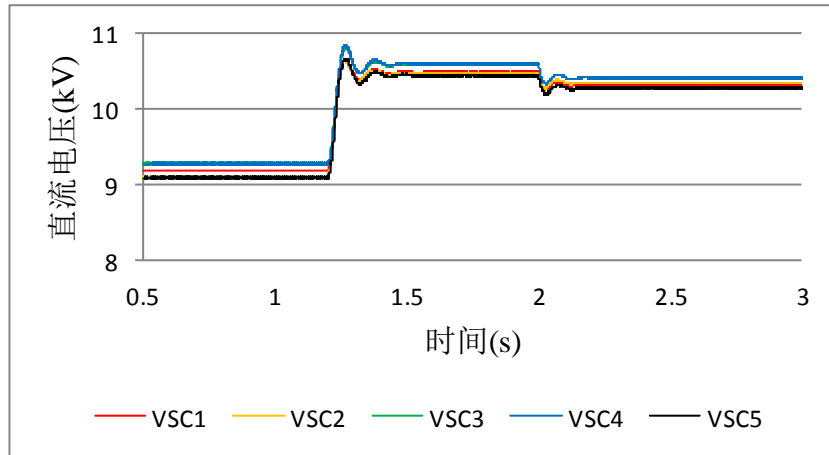


图 4-10 VSC3 退出运行时换流站的直流电压波形

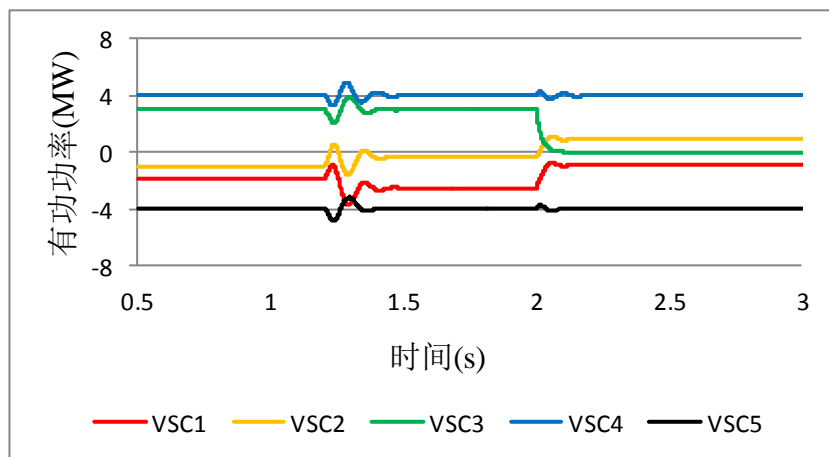


图 4-11 VSC3 退出运行时换流站的有功功率波形

通过对系统中某一换流站退出运行进行仿真可知，当多端柔性直流系统采用本章提出的分层优化控制体系时，即使在出现某一换流站退出的情况下，剩余的网侧换流站仍然可以根据本站的斜率特性自动调整换流站的有功功率，维持功率平衡，保持系统的稳定运行。且在加入了  $N-1$  约束后，这种情况下各个换流站的直流电压仍然可以维持在限值之内，不会因为某一换流站的退出而导致整个系统崩溃。在下一次优化的周期到来后，上层优化环节采集到系统新的结构数据和换流站功率数据，可以对剩余换流站组成的多端系统进行优化，减小运行时的网损，并且使其满足  $N-1$  准则的约束。

#### 4.5.4 通信中断时系统的动态仿真

仿真开始时，风电场侧换流站 VSC3 和 VSC4 分别发出 3MW 和 4MW 的有功功率，负荷侧换流站 VSC5 吸收 4MW 的有功功率。当  $t=2s$  时，VSC4 发出的有功功率增加至 8MW，下层控制与上层优化的通信中断； $t=4s$  时，VSC3 发出的有功功率增加至 6MW，同时 VSC5 吸收的有功功率增加至 8MW；上下层的通信在  $t=5s$  时恢复。各个换流站的直流电压和有功功率波形如图 4-12 和图 4-13 所示。仿真开始阶段的波形与之前相同。由于通信中断，所以在  $t=3s$  时 VSC1 和 VSC2 接收不到新的参考值，继续按照  $t=1.2s$  时下发的参考值对系统进行控制。直到  $t=5s$  时通信恢复，下层控制器在  $t=5.2s$  时接收到新的直流电压参考值和有功功率参考值，系统按照上层计算出此时的最优潮流运行。

即使 VSC-MTDC 系统在运行过程中出现了通信故障，由于网侧换流站采用的是直流电压斜率控制策略，可以根据系统的功率缺额自动调整换流站的功率，所以依然可以按照前一周期时上层优化下发的参考值对系统进行控制，即使风电场或负荷的功率发生变化依然可以保证系统的稳定运行，只是此时系统运行时的网损不是最优，而且不一定满足  $N-1$  准则的约束。

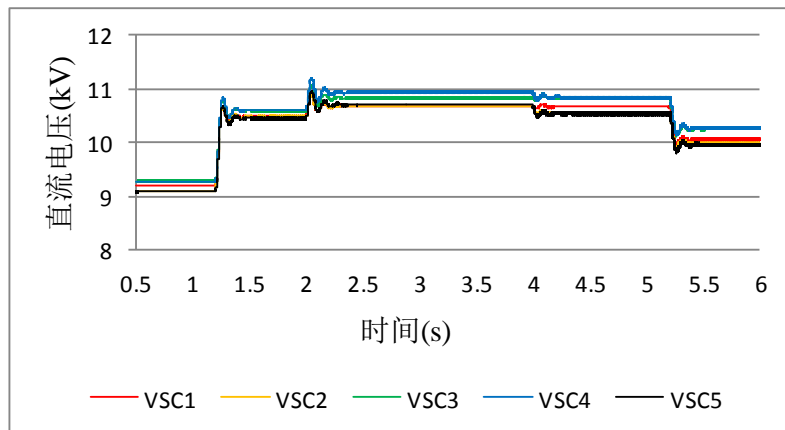


图 4-12 通信中断时换流站的直流电压波形

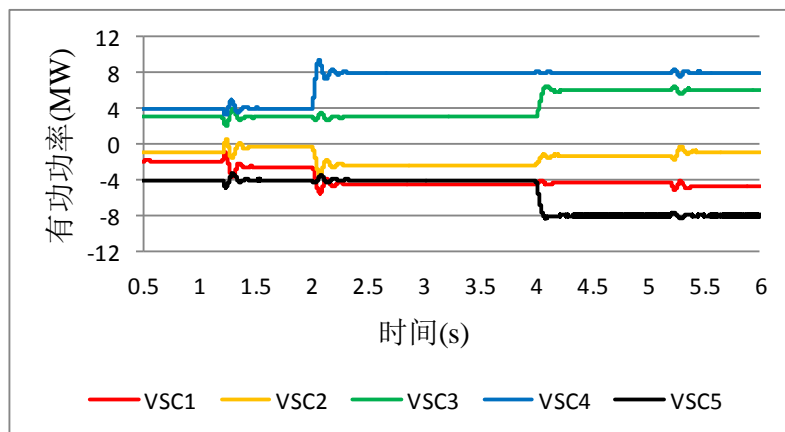


图 4-13 通信中断时换流站的有功功率波形

## 4.6 本章小结

本章提出了一种 VSC-MTDC 系统的分层优化控制体系,在保证系统直流电压稳定和有功功率平衡的前提下,可以对系统运行时的网损进行优化。其中,控制体系的下层采用直流电压斜率控制策略,是控制系统的基础,负责系统的直流电压稳定和功率分配;上层网损优化通过采集各换流站的有功功率,以系统运行时的网损最小为目标计算出系统的最优潮流,进而给下层的斜率控制器下发新的直流电压参考值和有功功率参考值。下层控制器根据上层下发的参考值对系统进行控制,从而优化系统潮流,实现多端柔性直流系统的最优网损运行。为了避免加入上层网损优化后使某一换流站的直流电压达到直流电压上限值,在上层优化的约束条件中加入了  $N-1$  约束的内容。虽然这样会使网损略有上升,但是可以保证某一换流站退出运行时剩余换流站的直流电压不会越限。

为了验证所提出分层优化控制体系的正确性,在五端柔性直流系统上进行了动态仿真验证。对只有下层斜率控制时的系统和采用分层优化控制体系的系统进行了比较,仿真结果表明上层优化可以根据风电场侧和负荷侧有功功率的变化调整网侧换流站的控制特性,降低柔性直流系统运行时的网损。对系统中某一换流站退出运行的情况也进行了仿真,结果表明即使出现换流站退出运行的情况,剩余换流站仍然可以继续维持稳定运行,并且各个换流站的直流电压仍在电压限值之内,系统是  $N-1$  稳定的。仿真结果验证了所提出分层优化体系的正确性和有效性,以及多端柔性直流系统良好的暂态性能。

即使在运行过程中下层和上层之间出现了通信故障,多端柔性直流系统仍然可以在下层斜率控制的作用下继续保持稳定运行,只是此时系统运行时的网损不是最优,而且不一定满足  $N-1$  准则的约束。

## 第5章 结论与展望

### 5.1 结论

随着电力电子技术的发展，VSC-HVDC 技术在电网建设的各个领域都有着广阔的应用前景，受到了各国科研人员的广泛关注。本文系统阐述了 VSC-HVDC 的研究背景、技术特点、应用现状和国内外研究现状，建立了 VSC 在 abc 和 dq0 坐标系下的数学模型，研究了 VSC-HVDC 的双闭环控制结构和 VSC-MTDC 的电压协同控制策略。提出了采用偏差控制策略的 VSC-MTDC 系统适用的控制器参数初始化和优化方法。提出了 VSC-MTDC 系统的分层优化控制体系，可以保证系统稳定运行的同时对系统运行的网损进行优化。本文的主要工作和创新点总结如下：

(1) 以单个电压源换流器为基础，建立了 VSC 在 dq0 旋转坐标系下的数学模型，推导出了 VSC-HVDC 的双闭环直接电流控制控制结构。其中，外环根据换流站所连接系统类型的不同选择直流电压、有功功率、无功功率或交流电压作为控制量，内环采用前馈补偿的结构实现有功功率和无功功率的解耦。在 VSC-HVDC 控制策略的基础上，研究了 VSC-MTDC 适用的直流电压主从控制、直流电压偏差控制和直流电压斜率控制这三种多端系统的控制策略，分析了每种控制策略的优点和不足，并设计了控制器的结构。

(2) 针对工程上整定柔性直流系统的控制器参数时具有很大主观性的问题，本文提出了一种确定 VSC-MTDC 控制参数的方法。首先以控制器外环控制量的稳态误差为目标函数，选择各控制器控制参数的初始值，保证对系统稳态运行时的准确控制。在得到的初始参数的基础上，根据系统过渡过程中控制特性区域的不同划分时间区间，构造了 VSC-MTDC 控制特性的评价指标，以此为目标函数采用单纯形算法对初始控制参数进行了进一步的优化，改善了系统的控制精度和响应特性，优化了系统的动态过程。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中对采用偏差控制策略的三端 VSC-MTDC 进行了动态仿真验证，对比了优化前后的控制效果，验证了所提出控制参数优化方法的正确性和可行性，并对得到的最优参数的鲁棒性进行了验证。

(3) 针对直流电压斜率控制的缺点，本文提出了一种 VSC-MTDC 适用的

分层优化控制体系，可以在保证系统稳定运行的同时对系统运行的网损进行优化。其中，控制体系的下层采用直流电压斜率控制策略，负责系统的直流电压稳定和有功功率平衡；控制体系的上层通过采集各换流站的有功功率，以系统运行时的网损最小为目标函数，考虑系统功率平衡约束，换流站直流电压约束，有功功率约束，直流线路电流约束和  $N-1$  约束，计算出系统的最优潮流，进而给下层的斜率控制器下发新的参考值，优化系统的运行状况，实现 VSC-MTDC 的最优网损运行。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建了五端 VSC-MTDC 系统进行了仿真验证，仿真结果表明提出的分层优化控制体系可以根据风电场侧和负荷侧有功功率的变化调整换流站的斜率控制特性，降低系统运行时的网损。并且即使在系统中某一换流站突然退出运行的极端情况下，剩余换流站仍然可以继续维持稳定运行，系统是  $N-1$  稳定的。VSC-MTDC 采用本文提出的分层优化控制体系时，即使出现了通信故障，系统仍然可以在下层斜率控制的作用下继续保持稳定运行，只是此时系统运行时的网损不是最优，而且不一定满足  $N-1$  准则的约束。

## 5.2 展望

(1) 本文在对 VSC-MTDC 系统的控制参数进行优化时，考虑的是控制量参考值与实际值误差程度，采用了 ITAE 指标来构造优化的目标函数。对于柔性直流系统来说，有没有一个更为适合的优化目标还需要继续深入的研究。并且，当系统端数进一步增加，待优化的参数更多时，需要改进或选择新的算法来完成对系统控制参数的优化。

(2) 本文在对 VSC-MTDC 系统的运行进行优化时，采用的目标是优化系统运行时的网损，而实际工程中考虑的可能不只是网损这一目标，要按照系统实际运行过程中的需求对目标函数进行选择 and 构造。

(3) 本文所进行的研究主要是针对采用两电平拓扑结构的 VSC-HVDC 和 VSC-MTDC 系统，当换流器采用 MMC 拓扑时，本文提出的理论还需要进一步的完善。

## 参考文献

- [1] 孔明. 模块化多电平 VSC-HVDC 换流器的优化控制研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- [3] 郑超. 基于电压源换流器的高压直流输电系统数学建模与仿真分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [4] 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.
- [5] 乐波, 梅念, 刘思源, et al. 柔性直流输电技术综述[J]. 中国电业(技术版), 2014, (05): 43-47.
- [6] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, et al. VSC-MTDC 系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(04): 63-68.
- [7] 王伟, 石新春, 付超, et al. 海上多端直流输电系统协调控制研究[J]. 电网技术, 2014, 38(01): 8-15.
- [8] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, et al. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(03): 397-404.
- [9] 吕金历, 王毅, 王纯, et al. 多端柔性直流输电系统的直流电压优化控制策略[J]. 现代电力, 2014, 31(06): 15-21.
- [10] 王国强. 基于 VSC-HVDC 海上风电场并网控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [11] 张静. VSC-HVDC 控制策略研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2009.
- [12] 李广凯, 江政昕, 赵昕, et al. 电压源换流器高压直流输电的特点与前景[J]. 南方电网技术, 2011, 5(05): 13-17.
- [13] 白古月. VSC-HVDC 技术及其在风电并网中的应用研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.
- [14] 任敬国. VSC-HVDC 输电系统的协调控制与稳态分析方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [15] 李金丰, 李广凯, 赵成勇, et al. 三相电压不对称时带有电压源换流器的 HVDC 系统的控制策略[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 16-20.
- [16] 赵成勇, 李金丰, 李广凯. 基于有功和无功独立调节的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(09): 20-24+30.
- [17] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(01): 18-23.
- [18] 史建立, 梁小冰, 李树卿, et al. dq0 坐标下轻型直流输电系统控制策略与仿真的研究[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会. 中国北京, 2008.4

- [19] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, et al. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
- [20] Jian Wu, Shen Zhang, Dianguo Xu. Modeling and control of multi-terminal HVDC with offshore wind farm integration and DC chopper based protection strategies[C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE. 2013.1013-1018
- [21] 化雨. 柔性多端直流输电系统直流电压控制与直流断路器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [22] 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, 30(19): 28-33.
- [23] Padiyar K. R., Prabhu N. Modelling, control design and analysis of VSC based HVDC transmission systems[C]. Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on. 2004.774-779 Vol.1
- [24] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [25] 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, 29(08): 45-50.
- [26] 赵成勇, 马国鹏, 李广凯. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 调节特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(06): 39-43.
- [27] 陈谦, 唐国庆, 潘诗锋. 采用多点直流电压控制方式的 VSC 多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(05): 10-15.
- [28] Lasseter R. H., Paigi P. Microgrid: a conceptual solution[C]. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. 2004.4285-4290 Vol.6
- [29] 唐庚, 徐政, 刘昇, et al. 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.
- [30] 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, 39(06): 1593-1599.
- [31] 吕金历. 用于风电并网的多端柔性直流输电系统的控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [32] 杨汾艳. 直流输电系统主回路和控制器参数优化选择研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
- [33] Filizadeh S., Gole A. M., Woodford D. A., et al. An Optimization-Enabled Electromagnetic Transient Simulation-Based Methodology for HVDC Controller Design[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2007, 22(4): 2559-2566.
- [34] 喻锋, 王西田, 杨煜, et al. 一种混合遗传算法在 HVDC 定电流控制器参数优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(09): 126-131.
- [35] 卫志农, 缪新民, 王华伟, et al. 基于 PSCAD-MATLAB 联合调用的高压直流

- 控制系统参数优化[J]. 高电压技术, 2014, 40(08): 2449-2455.
- [36] Chengyong Zhao, Xiangdong Lu, Guangkai Li. Parameters Optimization of VSC-HVDC Control System Based on Simplex Algorithm[C]. Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE. 2007.1-7
- [37] 郭春义, 赵成勇, 李广凯, et al. 基于 Simplex 算法的 VSC-HVDC 控制参数优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(09): 13-17.
- [38] 王松, 李庚银, 周明. VSC-MTDC 控制系统的参数优化及柔性调整策略[J]. 电网技术, 2015, 39(02): 380-386.
- [39] Aragüés-Peñalba Mònica, Egea-Àlvarez Agustí Gomis-Bellmunt Oriol, et al. Optimum voltage control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 89(4): 54-63.
- [40] Rouzbehi K., Miranlan 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.
- [41] 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.
- [42] Pinto R. Teixeira, Bauer P., Rodrigues S. F., et al. A Novel Distributed Direct-Voltage Control Strategy for Grid Integration of Offshore Wind Energy Systems Through MTDC Network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2429-2441.
- [43] 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(02): 17-22+29.
- [44] 任敬国, 李可军, 刘合金, et al. 基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 133-139.
- [45] 刘合金. VSC-MTDC 系统协调控制及模拟实验系统设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [46] 李梅航. 多端柔性直流输电的关键技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [47] 胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [48] 梁盟. 柔性多端直流输电系统的控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [49] 韩帮华. PID 控制器参数整定方法及应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.
- [50] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [51] 耿忠娟. 对非线性规划单纯形算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

## 攻读硕士学位期间参加的科研工作

作为科研人员参与国家高技术研究发展计划（863 计划）项目“保障直流配网可靠性的多端柔性直流控制保护关键技术”，项目编号：2015AA050101。

## 致 谢

时光飞逝，岁月荏苒，转眼之间研究生生涯已临近结束。回顾近三年的研究生生活和七年在华北电力大学的学习生涯，我感触颇深，谨表达谢意如下：

首先要感谢我的导师李庚银教授以及刘崇茹教授，本论文和我的研究都是在两位老师的悉心指导下完成。三年以来，两位老师在学习、生活等各方面都给予了我无微不至的关怀和帮助，令我获益匪浅。两位老师渊博的知识、严谨的治学态度、正直的为人处事给我树立了榜样，留下了深刻的印象。值此论文完成之际，谨向两位老师表达最崇高的敬意和最衷心的感谢！

其次，要感谢课题组的师兄弟姐妹和实验室的同门们。感谢索之闻师兄、刘思伟师兄、王丹师兄、王宇师弟在科研方面对我的指导和帮助，感谢刘永庆、郭尊、于梦琪、刘畅、夏妍、王敬、王大玮、欧阳婷、李冰、周钦君、何凌云、王嘉钰、李越等 D301 实验室成员在学习生活上给予我的帮助。

此外，还要感谢国家高技术研究发展计划（863 计划）项目“保障直流配网可靠性的多端柔性直流控制保护关键技术”的资助和支持。

最后，要感谢我的父亲和母亲，感谢他们几十年如一日养育我成长，感谢他们一直以来的默默支持和无私奉献，他们的理解和支持是我前进的最大动力。

史卓

2016 年 11 月 北京