



柔性直流换流站 值班员培训教材

广东电网有限责任公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

柔性直流换流站 值班员培训教材



广东电网有限责任公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

目前国内投入商业运行的柔性直流输电系统,尚缺现场运行人员的培训教材。本书站在实习人员的立场,引用大量的现场设备实际图片,讲述柔性换流站运行技术相关的理论和现场的知识,以期加深换流站实习人员对现场设备的了解。

本书分三部分内容:理论基础、设备讲解及识图。每章的编写以设备简介,设备结构及原理说明,典型故障分析以及运行工作三部分为主体。

本书可供从事柔性直流输电技术运行、检修、试验、研究、培训及管理工作的相关技术人员使用,也可作为高校电力相关专业的在校本科生、研究生和教师参考,还可满足社会各界对高压直流输电感兴趣的非电力专业人士的学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

柔性直流换流站值班员培训教材/广东电网有限责任公司组编. —5版. —北京:中国电力出版社,2015.7

ISBN 978-7-5123-7876-6

I. ①柔… II. ①广… III. ①直流换流站-技术培训-教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第126348号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年7月第一版 2015年7月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 21印张 437千字

印数0001—2000册 定价78.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《柔性直流换流站值班员培训教材》

编 委 会

- 主 编 张文峰
- 副 主 编 廖毅强 王素文
- 审 核 组 郭小龙 张松光 李清波 郭曙光
杨世哲 许树楷 魏 伟 陈 俊
林湖生 郑 丰 曹 鸿 陈谱慧
林贝斯 杨跃辉 何晓燕 陈 莉
司 喆 马广福
- 编 写 组 王东鹏 陈 涛 樊道庆 董华梁
林钟楷 曾建兴 黄凯漩 张 板
姚欣烈 邱 栋 陈 楠 林 峰
游 麒 王 愿 陈浩林 郭俊波
林龙涛 金 晶 罗运松

前言

随着国内柔性直流输电工程的相继投运，柔性直流输电将在国内迎来高速发展的阶段。在这样的新形势下，广东电网有限责任公司组织汕头供电局南澳多端柔直运行技术人员，总结运行调试的经验，试图站在学员的立场，引用大量的柔性直流换流站现场设备实际图片，讲述柔性直流换流站运行技术相关的理论和现场的知识，以期加深换流站学员对现场设备的了解，在了解的过程中，找准钻研方向，提高学习效率，成“才”成“家”。

由于柔性直流输电和交流输电各自独有的特性，本书主要设置了三部分内容：理论基础（第一章～第七章）、设备讲解（第八章～第十九章）及识图（第二十章）。

每章的编写以设备简介，设备结构及原理说明，典型故障分析以及运行工作三部分为主线；设备简介可以使学员对要讲解的设备有一个大致了解；设备结构及原理说明会结合现场设备图片讲解；典型故障分析以及运行工作一节会列出设备会出现的典型故障，讲解如何处理及相关规定，即教会读者如何保证设备的安全运行。

本书共三部分二十章，具体内容及编写情况如下。

第一章多端柔性直流输电系统基本原理由陈涛编写；第二章多端柔性直流输电系统运行方式由黄凯漩编写；第三章高压直流输电换流器由樊道庆编写；第四章系统级及站级控制系统由董华梁编写；第五章多端柔性直流换流器控制系统以及阀控系统由曾建兴编写；第六章多端柔性直流保护系统由林钟楷编写；第七章多端柔性直流运行人员控制系统由王东鹏编写；第八章连接变压器由游麒编写；第九章封闭式组合电器由郭俊波编写；第十章交直流场主要设备由曾建兴编写；第十一章测量装置由王愿编写；第十二章站用电系统由陈浩林编写；第十三章测控装置由邱栋编写；第十四章阀冷却系统由林峰编写；第十五章线路保护由林龙涛编写；第十六章断路器保护由姚欣烈编写；第十七章连接变压器保护装置由张板编写；第十八章监视系统与故障诊断设备由陈楠编写；第十九章合并单元装

置由金晶、罗运松编写；第二十章图纸识别由董华梁编写。

在本书的编写过程中得到了南方电网科学研究院直流技术专家、教授级高工许树楷博士，魏伟、陈俊，南方电网超高压输电公司曲靖局变电管理所主任曹鸿，南方电网超高压输电公司天生桥局变电管理所主任郑丰，罗平背靠背生产筹备组杨跃辉，清华大学袁世昌老师，荣信电力电子股份有限公司易荣博士、马广福、刘洋，北京四方继保自动化股份有限公司南澳柔直项目经理司喆的支持和帮助，谨在此表示由衷的感谢。

由于时间仓促，本书中疏漏和不足在所难免，恳请读者不吝赐教。

编者

2015年5月

目 录

前言

第一章 多端柔性直流输电系统基本原理	1
第一节 多端柔性直流输电系统概述	1
第二节 电压源换流器	3
第三节 多端柔性直流输电控制系统	6
第二章 多端柔性直流输电系统运行方式	12
第一节 柔性直流输电系统运行方式简介	12
第二节 柔性直流系统运行方式原理	18
第三节 柔性直流系统运行方式典型故障分析及运行工作	23
第三章 高压直流输电换流器	25
第一节 高压直流换流器简介	25
第二节 高压直流换流器结构原理	27
第三节 高压直流换流器典型故障分析及运行工作	47
第四章 系统级及站级控制系统	52
第一节 系统级及站级控制系统简介	52
第二节 系统级及站级控制系统结构原理	53
第三节 系统级及站级控制系统典型故障分析及运行工作	58
第五章 多端柔性直流换流器控制系统以及阀控系统	63
第一节 柔性直流换流器控制系统以及阀控系统简介	63
第二节 柔性直流换流器控制系统以及阀控系统结构原理	64
第三节 柔性直流换流器控制系统以及阀控系统 典型故障分析及运行工作	73
第六章 多端柔性直流保护系统	78
第一节 多端柔性直流保护系统简介	78
第二节 多端柔性直流保护系统结构原理	80
第三节 多端柔性直流保护系统典型故障分析及运行工作	90
第七章 多端柔性直流运行人员控制系统	94
第一节 多端柔性直流运行人员控制系统简介	94

第二节	多端柔性直流运行人员控制系统结构原理	101
第三节	多端柔性直流运行人员控制系统典型故障分析及运行工作	117
第八章	连接变压器	121
第一节	连接变压器简介	121
第二节	连接变压器结构原理	122
第三节	连接变压器典型故障分析及运行工作	126
第九章	封闭式组合电器	133
第一节	封闭式组合电器简介	133
第二节	封闭式组合电器结构原理	135
第三节	封闭式组合电器典型故障分析及运行工作	140
第十章	交直流场主要设备	146
第一节	交直流场主要设备简介	147
第二节	交直流场主要设备结构原理	150
第三节	交直流场主要设备典型故障分析及运行工作	157
第十一章	测量装置	160
第一节	电压测量装置和电流测量装置简介	160
第二节	电压测量装置及电流测量装置结构原理	162
第三节	电压测量装置和电流测量装置典型故障分析及运行工作	170
第十二章	站用电系统	175
第一节	站用电系统简介	175
第二节	站用电系统结构原理	178
第三节	站用电系统典型故障分析及运行工作	180
第十三章	测控装置	184
第一节	测控装置设备简介	184
第二节	测控装置设备结构原理	192
第三节	测控装置设备典型故障分析及运行工作	202
第十四章	阀冷却系统	206
第一节	阀冷却系统简介	206
第二节	阀冷却系统结构原理	206
第三节	阀冷却系统典型故障分析及运行工作	226
第十五章	线路保护	231
第一节	线路保护简介	231
第二节	线路保护结构原理	237
第三节	线路保护典型故障分析及运行工作	242

第十六章 断路器保护	250
第一节 断路器保护简介	250
第二节 断路器保护结构原理与典型事故分析	251
第三节 断路器保护装置典型故障分析及运行工作	257
第十七章 连接变压器保护装置	261
第一节 连接变保护简介	261
第二节 连接变保护结构原理	269
第三节 连接变保护装置典型故障分析及运行工作	274
第十八章 监视系统与故障诊断设备	282
第一节 监视系统与故障诊断设备简介	282
第二节 监视系统与故障诊断设备结构原理	286
第三节 监视系统与故障诊断设备典型故障分析及运行工作	301
第十九章 合并单元装置	306
第一节 合并单元装置简介	306
第二节 合并单元装置结构原理	306
第三节 合并单元装置典型故障及运行工作	309
第二十章 图纸识别	314
第一节 图纸识别简介	314
第二节 图纸识别结构原理	316
第三节 图纸识别实际的运用及运行工作	322

第一章

多端柔性直流输电系统基本原理

本章在简要介绍多端柔性直流输电系统的基础上，阐述其基本工作原理，以使读者能够掌握多端柔性直流输电系统的特点和运行机理。主要分三个部分进行讲解。

第一节 多端柔性直流输电系统概述；

第二节 电压源换流器；

第三节 多端柔性直流输电控制系统。

本章的学习重点是电压源换流器的工作原理、多端柔性直流输电控制保护系统。

第一节 多端柔性直流输电系统概述

20世纪90年代末，基于可关断器件和脉宽调制（pulse width modulation, PWM）技术的电压源换流器（voltage source converter, VSC）开始应用于直流输电系统，标志着第三代直流输电技术的诞生。对于此新兴技术，国际权威学术组织——CIGRE和IEEE，将其正式命名为VSC-HVDC，即电压源换流器高压直流输电。国内专家一致建议将此技术统一命名为柔性直流输电（HVDC-Flexible）。

柔性直流输电系统也是由换流站和直流输电线路构成，典型双端柔性直流输电系统的结构如图1-1所示，主要器件包括用可关断器件构成的VSC（VSC₁、VSC₂）、连接变压器（T₁、T₂）、桥臂电抗器（L₁、L₂）、直流电容器（C₁、C₂）等，各器件的功能作用见表1-1。两侧的换流站是系统的主要组成部分，主要特点为结构相同；可根据系统需求方便地进行整流/逆变运行状态转换；两侧换流站协调控制运行实现两端交流系统间有功功率的传递，各侧换流站独立控制以实现与接入交流系

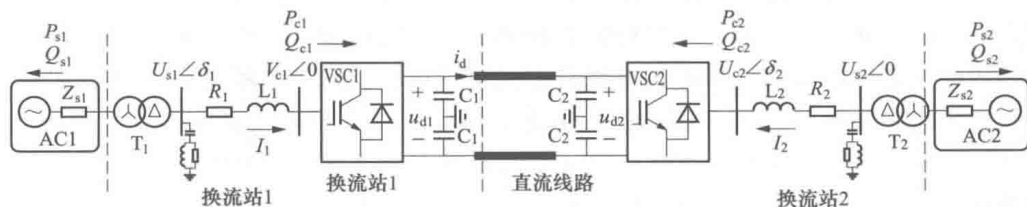


图 1-1 典型两端柔性直流输电系统结构图

统之间无功功率的交换。

表 1-1 柔性直流输电系统各器件的功能作用

器件	功能作用
VSC	完成交直流变换
直流电容器	为 VSC 提供直流电压支撑缓冲桥臂关断时的冲击电流，减少直流侧谐波
连接变压器	抽头可调并为 VSC 提供合适的工作电压，保证 VSC 输出最大的有功功率和无功功率，桥臂电抗器的一部分
桥臂电抗器	VSC 与交流系统进行能量交换的纽带、滤波

与传统直流技术相比，柔性直流输电技术的优点在于：直流电流可双向流动、没有无功补偿和换向失败问题、可为无源系统供电、可同时独立调节有功功率和无功功率、谐波水平低、占地面积小等。缺点在于：损耗大、设备成本高、容量相对较小、不适合长距离架空线路输电。但随着可关断器件的发展，换流阀拓扑结构、控制技术的提升，以及大容量 VSC 国产化的逐步实现，柔性直流输电正向着更大容量、更低损耗、更为经济的方向发展。

另外，柔性直流输电还有一个独特优点是可有效解决风电不稳定问题，因此被目前国内外专家学者认为是实现大型风电场和主网之间稳定连接的最有潜质的电力传输方式，原因如下：

(1) 由于风能、太阳能等新能源具有分散性、小型性、远离负荷中心、本身不稳定性及容易导致送端电网的不稳定（机组互相间的有功功率分布使得系统局部波动大）等因素，因而送端电网需要稳定频率的交流电源作为支撑，柔性直流输电系统可以通过调整控制策略，对送端交流电网的频率进行控制，保障送端电网的频率稳定。

(2) 柔性直流输电系统可以监测其连接的受端交流电网的电压，并实现快速追踪，使其输出电压的波形与交流电压波形基本相同，保证电能的输入不会对交流系统造成较大的影响。同时，柔性直流系统不仅不需要交流电网提供无功补偿，本身还能起到静止同步补偿器的作用，可以动态补偿交流系统的无功功率，稳定交流母线电压，提高所连接系统的电压稳定性。

与传统高压直流输电系统一样，柔性直流输电系统也可分为两端柔性直流输电系统、多端柔性直流输电系统两种类型。两端柔性直流输电系统的特点是能实现点对点的直流功率传送，无法实现对多个电源点（如风电场）的接入或多个负荷点的同时供电。多端柔性直流输电系统则具有经济、灵活、可靠等特点，适用于分布式发电以及电力市场等领域。例如：对于海上风电或海岛供电而言，多端送（供电）是非常现实的需求，如果每个海上风电场以及孤立海岛都依靠与大陆的点对点直流来连接，无论工程造价，还是海域面积占用，都是巨大的；而多端柔性直流输电系统可有效解决这个问题，将邻近的海上风电场，邻近的孤立海岛连接起来，构成直

流网络，再与大陆连接，在既节省投资与海域资源占用的同时，也可实现运行方式的灵活多样。

如图 1-2 所示为一多端柔性直流输电系统结构，其为四端系统，其中，换流站 1 接入 A 岛交流电网并与地方网相连；换流站 2 接入 B 岛交流电网；换流站 3 接入 C 岛交流电网；换流站 4 接入 D 岛交流电网；A 岛电网与 B 岛电网有一条 220kV 的交流联络线；B 岛电网与 D 岛电网有一条 110kV 的交流联络线。与两端柔性直流输电相比，多端柔性直流输电技术的难点主要在于其控制保护技术。并且在多端化后，系统的运行方式组合十分灵活与多样（即保持功率平衡的方式组合多样化，而不是两端系统的唯一性），如何保证多端系统各端在正常运行时的功率平衡与直流电压稳定，在故障扰动情况下各端的快速调整、模式切换与重新平衡是多端柔性直流输电技术需要解决的关键问题。

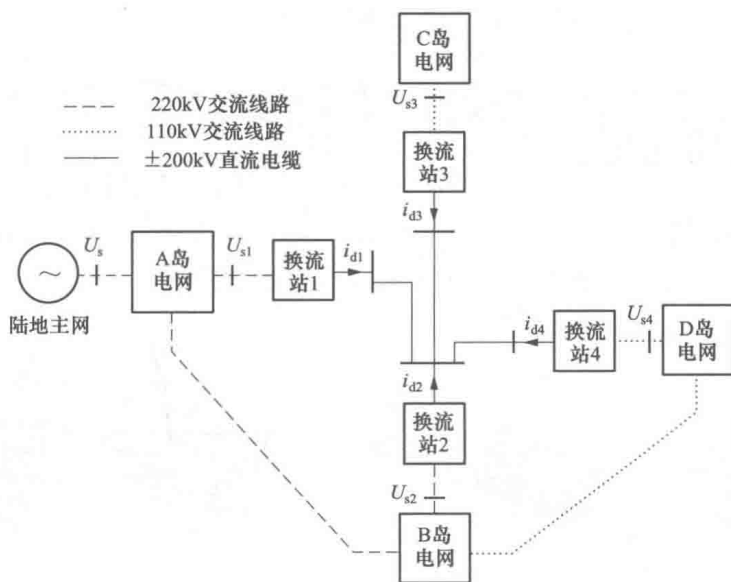


图 1-2 多端柔性直流输电系统结构

第二节 电压源换流器

电压源换流器是柔性直流输电换流站的核心器，对于接入电网的 VSC，其结构特征如下：桥臂由大功率可控关断型器件、反并联二极管和直流电容器组成。电压源换流器的特点如下：不需要强大的交流电网支撑；能独立控制有功和无功功率；滤波设备容量小或者不需要。

一、电压源换流器简介

VSC 的主电路拓扑结构可为二电平、三电平和多电平 3 种（几种典型的主电路

拓扑如图 1-3 所示), 本教材将在第三章对其作具体的介绍。无论何种主电路拓扑结构, 核心器件均为可控关断型器件, 即开通、关断都可控制的功率器件, 其按内部结构的不同分类如下: 晶闸管类, 如可关断晶闸管 (gate turn off thyristor, GTO)、集成门极换向晶闸管 (integrated gate commutated thyristor, IGCT); 晶体管类, 如绝缘门极双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、电子注入增强门极晶体管 (injection enhanced gate transistor, IEGT)。本教材不对可关断器件的构造和性能作深入的介绍, 有兴趣的读者可查询相关的书籍, 几种典型可关断器件外形结构如图 1-4 所示。

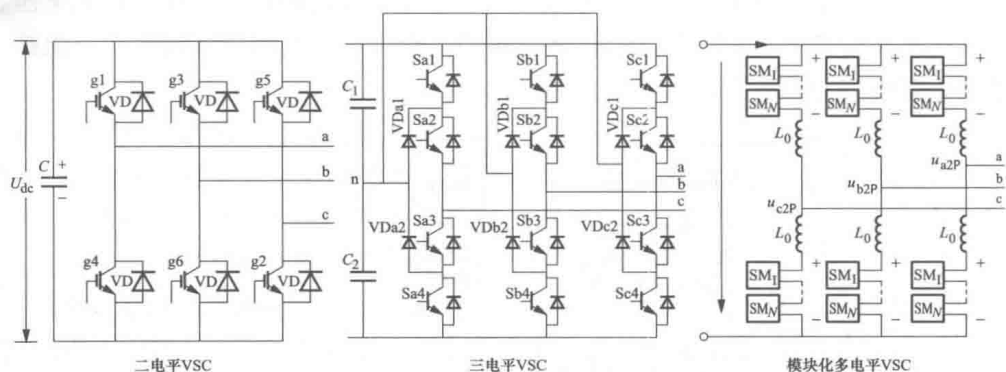


图 1-3 几种典型的 VSC 主电路拓扑

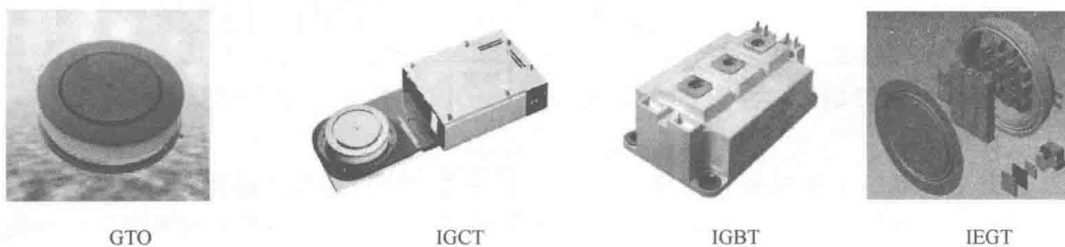


图 1-4 几种典型的可关断器件外形结构

电压源换流器具有高频全控的特点, 在一个工频周期内可实现多次对开关施加开通和关断信号, 从而在交流侧产生交流电压波形。这种控制换流阀开通、关断的方法称为调制方式。调制方式对电压源换流器的性能有着关键的影响, 因此针对特定的电压源换流器, 需要选择一种简单、高效、合适的调制方式。

主电路拓扑与选用的调制控制方式配合, 即可输出期望的电压波形。目前, 常用的调制方式可以分为 PWM 方式和阶梯波方式 (stepped waveform modulation, SWM) 两大类。其中, PWM 方式跟踪调制波性能好, 实现简单, 能够明显改善低电平换流器的输出特性, 因此在低电平换流器中得到了广泛的应用。但是, 由于 PWM 方式是利用器件的高频开、关来减少谐波含量, 因此导致其开关损耗较大。而

且随着电平数的增加，PWM 方式算法变得越来越复杂；SWM 与 PWM 相比，其器件开关频率低，开关损耗小，由于不需控制脉冲宽度，实现起来更简单而且当电平数足够多时，波形质量很高，几乎没有谐波存在，无需增加滤波装置。因此，两电平和三电平换流器通常采用的是 PWM 调制方式，而多电平换流器则采用的是 SWM 方式。

PWM 的具体实现方式有空间矢量调制 (space vector modulation, SVM)、正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 等。SWM 具体实现方式有消谐波调制 (selective harmonic elimination modulation, SHEM)、电压逼近调制等。在多电平 VSC 应用场合：SHEM 适合于电平数不多的场合；电压逼近调制实现的方式有空间矢量调制 (space vector control, SVC) 和最近电平逼近调制 (nearest level modulation, NLM)，其原理为使用最近的电压矢量或电平瞬时逼近调制波，适用于电平数较多的场合。由于电平数太多，SVC 的电平矢量会很多，实现起来复杂，NLM 在多电平 VSC 应用更为广泛。SPWM 调制和 NLM 调制波形如图 1-5 所示。

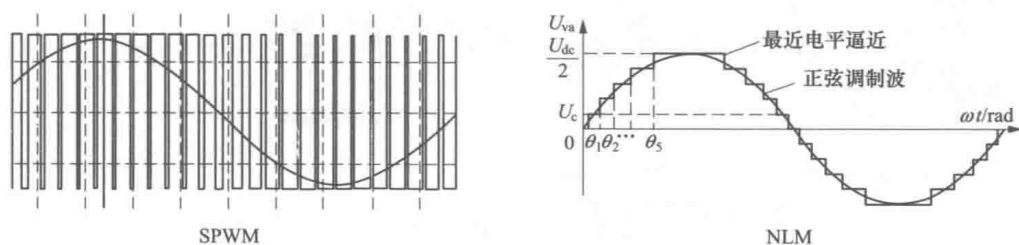


图 1-5 SPWM 调制和 NLM 调制波形

当前，VSC 为适用于在电力网中的应用，在可关断型器件发展的推动下，朝着高压、大容量及多电平的方向发展。

二、电压源换流器的工作原理

VSC 接入交流系统的结构简图和基波等效电路如图 1-6 所示。从能量传输的角度来看，换流器与交流系统之间是通过电抗器 X (包括连接变压器) 来进行能量传输的。

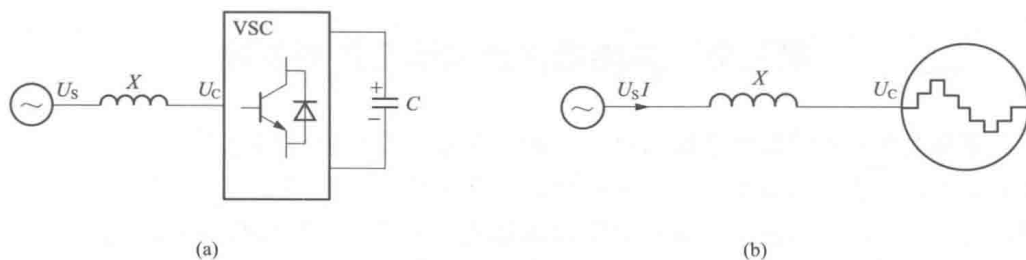


图 1-6 VSC 接入交流系统的结构简图和基波等效电路

(a) VSC 接入系统结构简图；(b) VSC 基波等效电路

其中，交流系统交流侧电压基波分量为 U_s ，换流器交流侧电压基波分量为 U_c ， U_c 落后 U_s 的角度为 δ 。则从交流系统输入到换流器的有功功率和无功功率分别为

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (1-1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (1-2)$$

由式 (1-1)、式 (1-2) 可以看出，有功功率的传输主要取决于 δ ，当 $\delta > 0$ 时，VSC 吸收有功功率，作为整流站运行；当 $\delta < 0$ 时，VSC 发出有功功率，作为逆变站运行。因此，通过控制 δ 角就可以控制输送功率的大小和方向；无功功率主要取决于 U_c 的大小，通过控制 U_c 的大小就可以控制输送功率的大小和方向。VSC 四象限运行相量图如图 1-7 所示，从系统的角度来看，VSC 可以等效成一个无转动惯量的电动机或发电机。

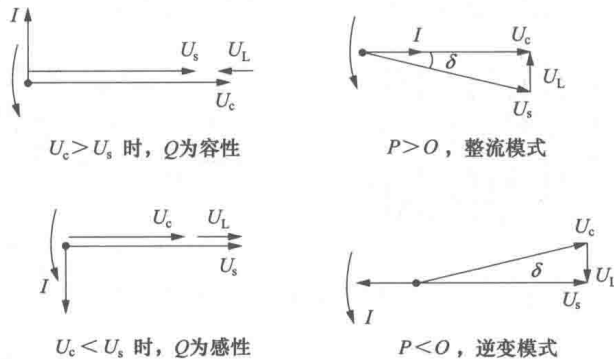


图 1-7 VSC 四象限运行相量图

综上所述，有功功率的传输主要由换流器交流侧电压相角与交流系统交流侧电压相角的差值控制，而无功功率的传输则主要由两个电压幅值的差值控制，并且可以灵活实现 PQ 四象限独立控制。VSC 的基本特性就是几乎可以瞬时实现对有功和无功的独立控制。

第三节 多端柔性直流输电控制系统

多端柔性直流输电系统是相对于两端点对点的柔性直流输电系统而言，即三端及以上的柔性直流输电系统。无论多端柔性直流输电系统还是两端柔性直流输电系统，基本工作原理的相同之处在于系统都是基于电压源型换流器四象限运行，区别则在于多端柔性直流输电系统的运行方式灵活、控制更为复杂，因此控制系统是决定多端柔性直流输电系统运行的关键。本节以南澳多端柔性直流输电系统来阐述多端柔性直流输电系统控制系统。

一、南澳多端柔性直流输电系统概述

南澳多端柔性直流输电示范工程是中国南方电网有限责任公司承担的国家高技术研究发展计划（863 计划）“大型风电场柔性直流输电接入技术与开发”项目的依托工程，并于 2013 年 12 月建成投产，是世界第一个多端柔性直流输电系统。本期南澳风电场多端柔性直流输电示范工程为三端柔性直流输电系统，包括 3 个采用模块化多电平拓扑结构（MMC）换流站，直流电压为 $\pm 160\text{kV}$ ，接入方案如图 1-8 所示。项目建成后，实现风电场通过柔性直流输电系统与南澳电网及汕头主网的连接，将风电场电力安全输出，保障南澳岛供电安全，减少风电功率波动对当地薄弱电网的影响。

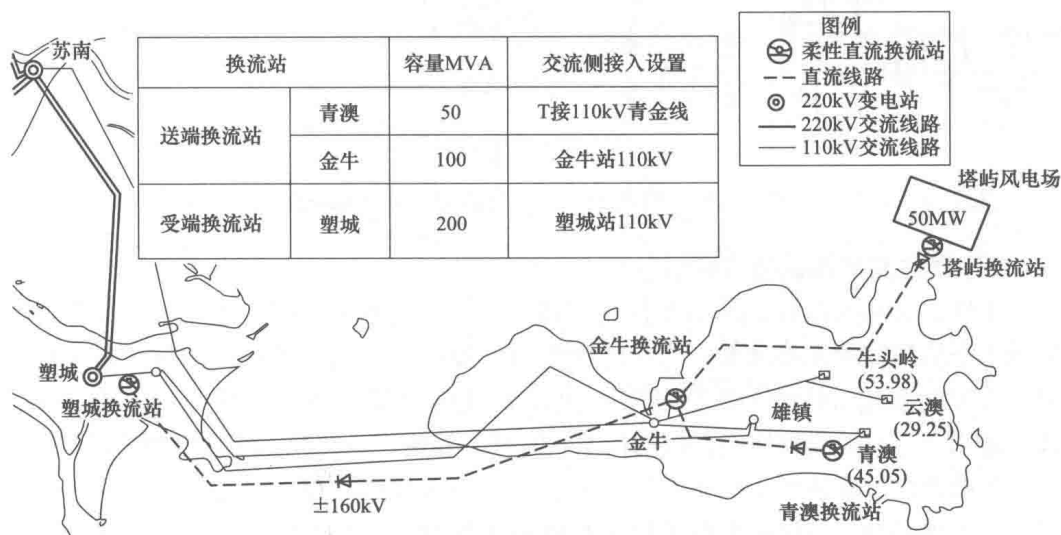
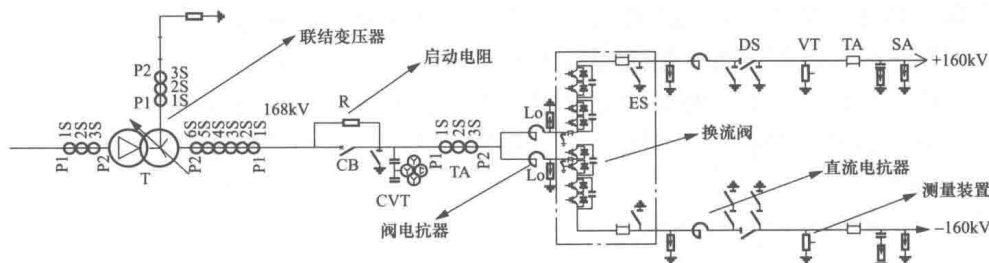


图 1-8 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入方案

南澳多端柔性直流输电系统 3 个换流站主接线相同，换流站采用单换流器双极接线，采用 MMC 拓扑结构，主要由换流阀、阀电抗器、启动电阻、连接变压器（连接变）、开关装置、直流电抗器、测量装置等设备构成（如图 1-9 所示），其中，MMC 拓扑结构采用子模块的级联方式（参考图 1-3 中模块化多电平 VSC），所包含的 6 个桥臂均是由多个子模块（包括冗余，塑城 147，金牛、青澳 220）和一个串联电抗器 L_0 组成，每一相的上下两个桥臂合在一起称为一个相单元。



南澳多端柔性直流输电系统接线如图 1-10 所示。

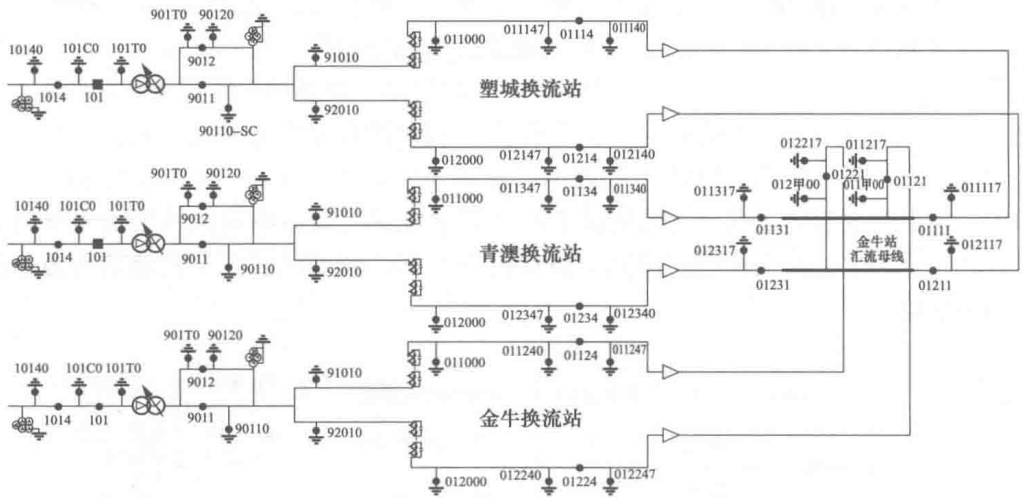


图 1-10 南澳多端柔性直流输电系统接线图

二、柔性直流换流站的控制方式

柔性直流换流站有 3 种基本控制方式：①定直流电压控制，即控制直流极电压和接入交流系统的无功功率；②定功率控制，即控制接入交流系统的有功和无功功率；③定交流电压控制，即控制接入交流系统的电压和频率。其中，方式①、方式②适用于与有源交流网络连接的情况，方式③适用于给无源网络供电的情况。

多端柔性直流输电系统各换流站控制方式的选择原则如下：为保持系统的有功平衡，系统必须有一端换流器采用定直流电压控制，而其他换流站可采用其他有功类控制方式；每个换流站只能同时采用有功类和无功类控制器各一种。另外，为保证在任一换流站故障切除后，健全换流站工况允许情况下系统能够稳定运行，多端柔性直流输电系统还需考虑多点直流电压的控制方式。

南澳多端柔性直流输电系统为一个受端、两个送端系统，不考虑直流电压控制的切换，而采用单点直流电压控制策略，即选取其中一端换流站定直流电压控制。若定直流电压控制的换流站交流侧发生故障等暂态扰动，采用定功率控制的换流站仍将跟踪故障前有功功率指令，向直流系统注入（或汲取）有功功率，此时功率的不平衡导致直流侧电容器快速充放电，从而使直流电压在很大范围内波动，因此要求尽可能选择容量较大换流站采用定直流电压控制。基于以上考虑，南澳多端柔性直流系统的控制方式为：塑城站定直流电压，金牛站和青澳站定功率（若南澳为孤岛运行时，采用定交流电压控制），在此控制方式下，塑城站故障或停运则整个系统必须停运。

三、电压源换流器的控制方式

目前，对于电压源换流器的控制方式主要可分为间接电流控制和直接电流控制