



The Study of VSC-HVDC connection of wind farms
to the transmission system

by

Zhang Jie

B.E.(Fuyang Normal College) 2003

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Power electronics and power transmission

in the

Graduate School

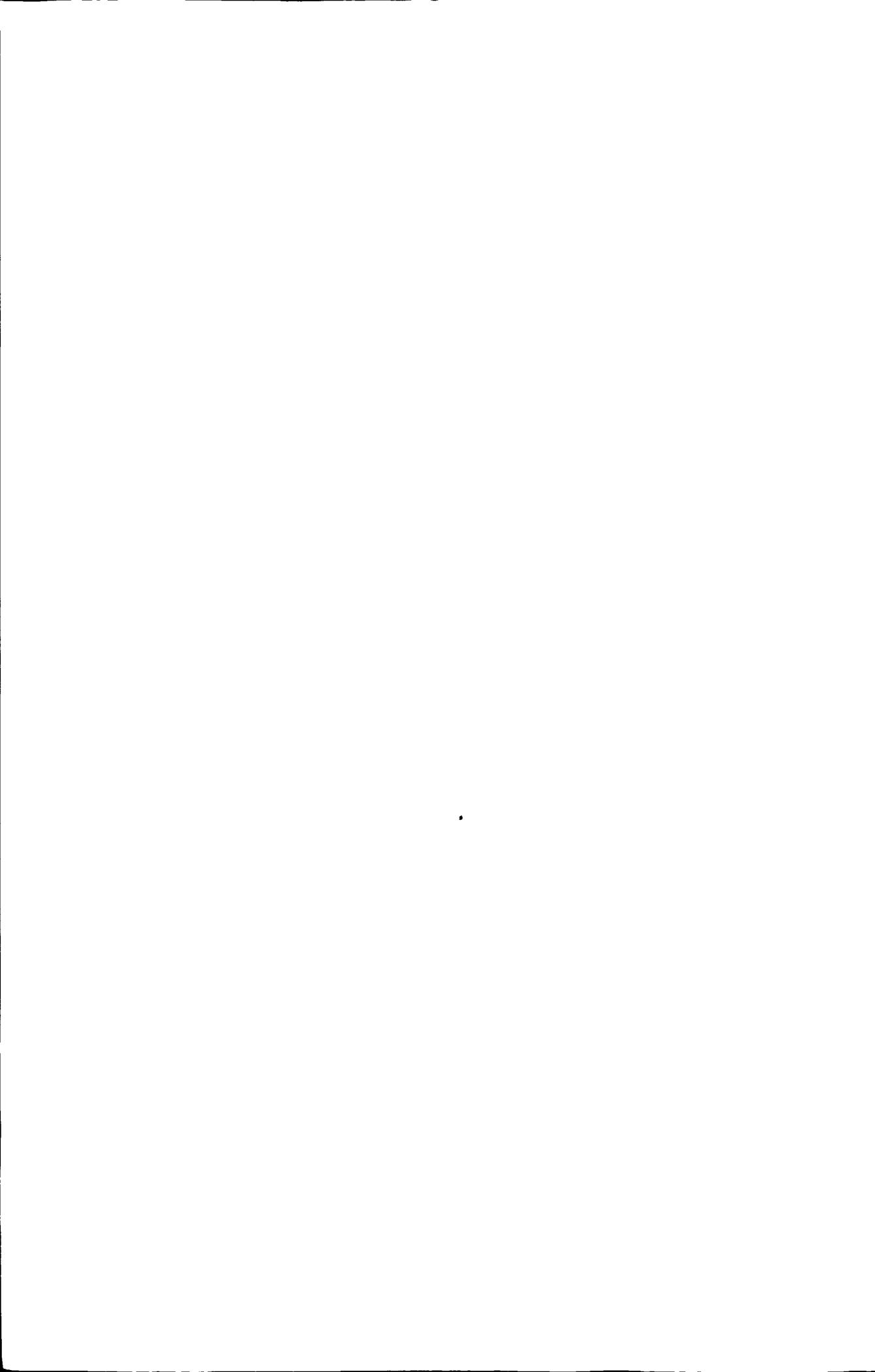
of

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor Bao Guangqing

May, 2011



兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

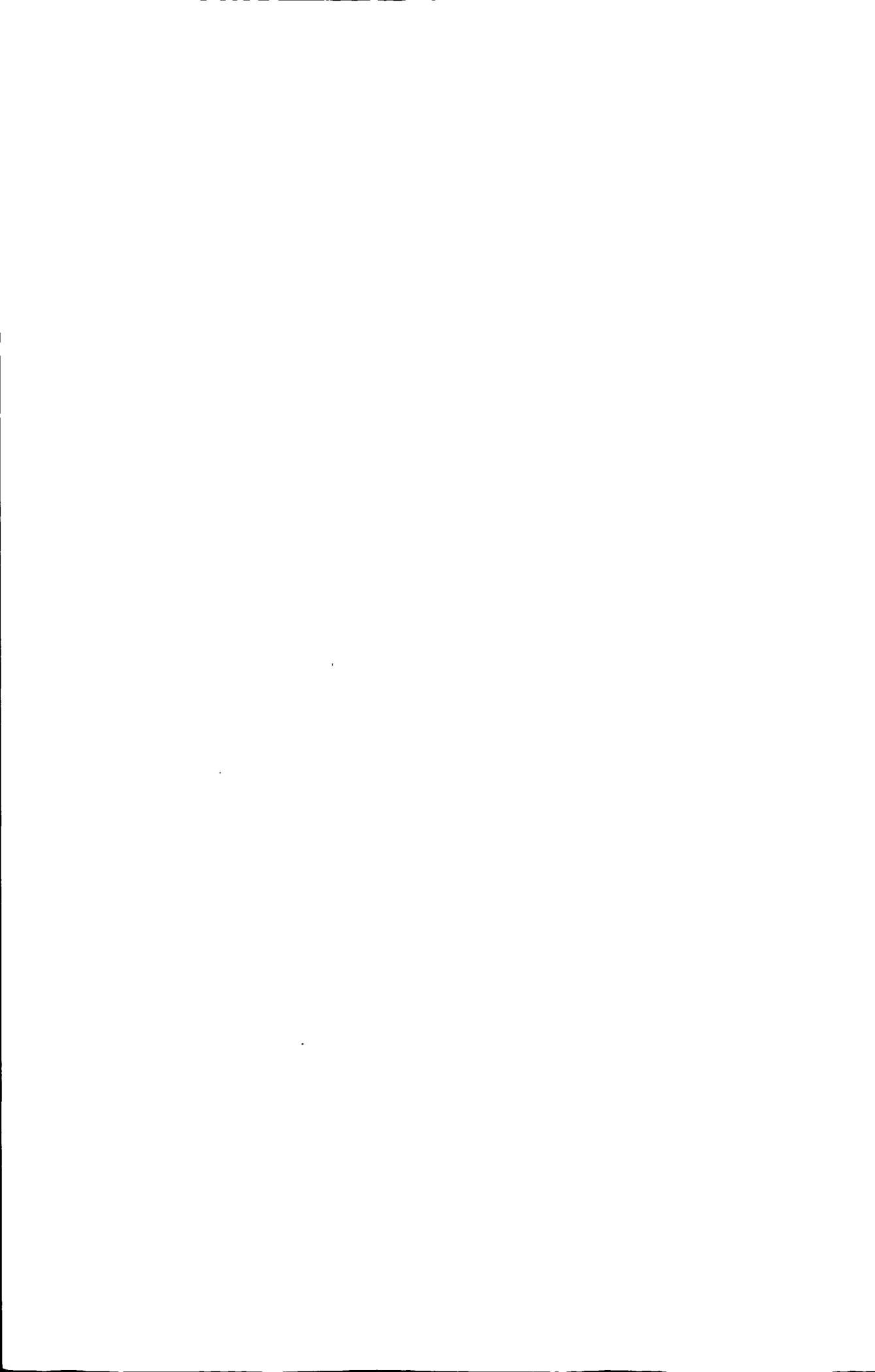
作者签名： 张洁 日期： 2011年 6 月 7 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名： 张洁 日期： 2011年 6 月 7 日

导师签名： 张洁 日期： 2011年 6 月 7 日



目 录

目 录.....	I
摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
插图索引.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 直流输电技术发展历程.....	2
1.3 电压源和电流源换流站结构比较.....	3
1.4 VSC-HVDC 直流输电技术应用.....	5
1.5 基于 VSC-HVDC 的风电场并网技术发展.....	7
1.5.1 并网型风力发电系统的特点及现状.....	7
1.5.2 基于 VSC-HVDC 的风电系统发展现状.....	9
1.6 论文的主要内容.....	11
第 2 章 VSC-HVDC 的建模与控制.....	12
2.1 VSC-HVDC 的工作原理与控制.....	12
2.1.1 拓扑结构.....	12
2.1.2 稳态建模与工作特性.....	16
2.1.3 暂态建模与工作特性.....	18
2.2 VSC-HVDC 控制系统研究.....	21
2.2.1 VSC-HVDC 的基本控制方式.....	21
2.2.2 VSC-HVDC 控制系统.....	22
2.3 并网型风力发电系统分析.....	24
2.3.1 风力发电系统模型.....	24
2.3.2 双馈式风力发电机模型.....	26
2.3.3 并网风电场引起的电压波动及控制.....	27
2.4 基于 VSC-HVDC 风电场并网系统计算机仿真.....	29
2.4.1 仿真软件简介.....	29
2.4.2 仿真分析.....	29
2.5 小结.....	31



第 3 章 VSC-HVDC 的非线性主控制器设计.....	33
3.1 非线性系统的数学描述.....	33
3.2 关系度方法及其稳定性分析.....	33
3.3 基于非线性控制器的 VSC-HVDC 技术研究.....	34
3.3.1 系统的基本模型.....	34
3.3.2 基于 VSC-HVDC 非线性控制系统.....	35
3.4 仿真研究.....	38
3.5 小结.....	42
第 4 章 换流站智能控制器的设计.....	43
4.1 RBF-ANN 的 PID 控制器研究.....	43
4.1.1 RBF 网络的结构.....	43
4.1.2 被控对象 Jacobian 信息的辨识算法.....	44
4.1.3 PID 控制器参数整定.....	45
4.2 换流站控制系统研究仿真.....	46
4.3 小结.....	48
结论与展望.....	49
参考文献.....	50
致 谢.....	54
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录.....	55
附录 B RBF-PID 控制器算法主程序.....	56



摘要

在可再生能源发展中,目前风能以其可开发容量大和造价相对较低等特点,成为电网系统中相对增长最快的新能源,但风电并网存在许多问题亟待解决。本文对基于 VSC-HVDC (Voltage source converter high voltage direct current) 风电场并网控制技术进行了研究分析,解决风力场引起的功率和电压波动问题。

在简要建立基于 VSC-HVDC 稳态数学模型和暂态数学模型后,分析了并网风电场出口电压波动和功率的关系,论证了基于 VSC-HVDC (voltage source converter based HVDC) 换流站的无功功率控制和有功功率控制来抑制电压波动的方法,设计了风电场并网的 VSC-HVDC 换流站功率和电压解耦控制系统,实现了对 VSC 换流站输出量的解耦控制来抑制电压波动。通过电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC (power system computer aided design/electromagnetic transients program including direct current) 建立了并网风电场模型,仿真了系统交流侧单相接地故障对并网系统的电压和功率的影响进行分析,从仿真结果来看,基于 VSC-HVDC 风电场并网系统能有效地将风电场与电网进行了“隔离”,来抑制电压波动,提高系统的稳定性。

针对传统的 PID 控制器在外部扰动影响下极易失稳,很难适应直流输电系统这样的非线性系统,论文分析了风电并网系统的非线性工作特点,在建立 VSC-HVDC 系统的线性模型数学模型的基础上采用关系度和零动态结合的方法设计了直流电压与功率解耦非线性控制器,并使用 PSCAD/EMTDC 软件进行了非线性主控制器的设计和仿真,结果证明该控制器可以有效的提升系统稳定,保证并网系统在安全范围内运行。

最后,在分析电力系统控制的复杂性以及神经网络控制的优点基础上,提出了基于径向基函数的 PID 控制器 (RBF-PID) 的设计,在 PSCAD/EMTDC 环境下建立了直流输电控制仿真系统,使用 S 函数编程实现 RBF-PID 控制器的算法设计,通过接口模块设计实现了在 PSCAD 中调用 S 函数,仿真结果证明,与传统 PID 控制器相比,基于 RBF-PID 智能控制器的 VSC-HVDC 风电场并网系统电压稳定性高,具有更强的鲁棒性和自适应学习能力以及较好的动态性能。

通过本文研究,论证了基于 VSC-HVDC 风电并网系统在改善系统稳定性,以及为系统提供无功电压支撑改善电压稳定性等方面起着重要作用,并为以后 VSC-HVDC 技术在大规模风电场并网中的实际应用提供了良好的理论基础和参考价值。

关键词: 风电场; VSC-HVDC; 非线性控制; RBF-PID 控制;

Abstract

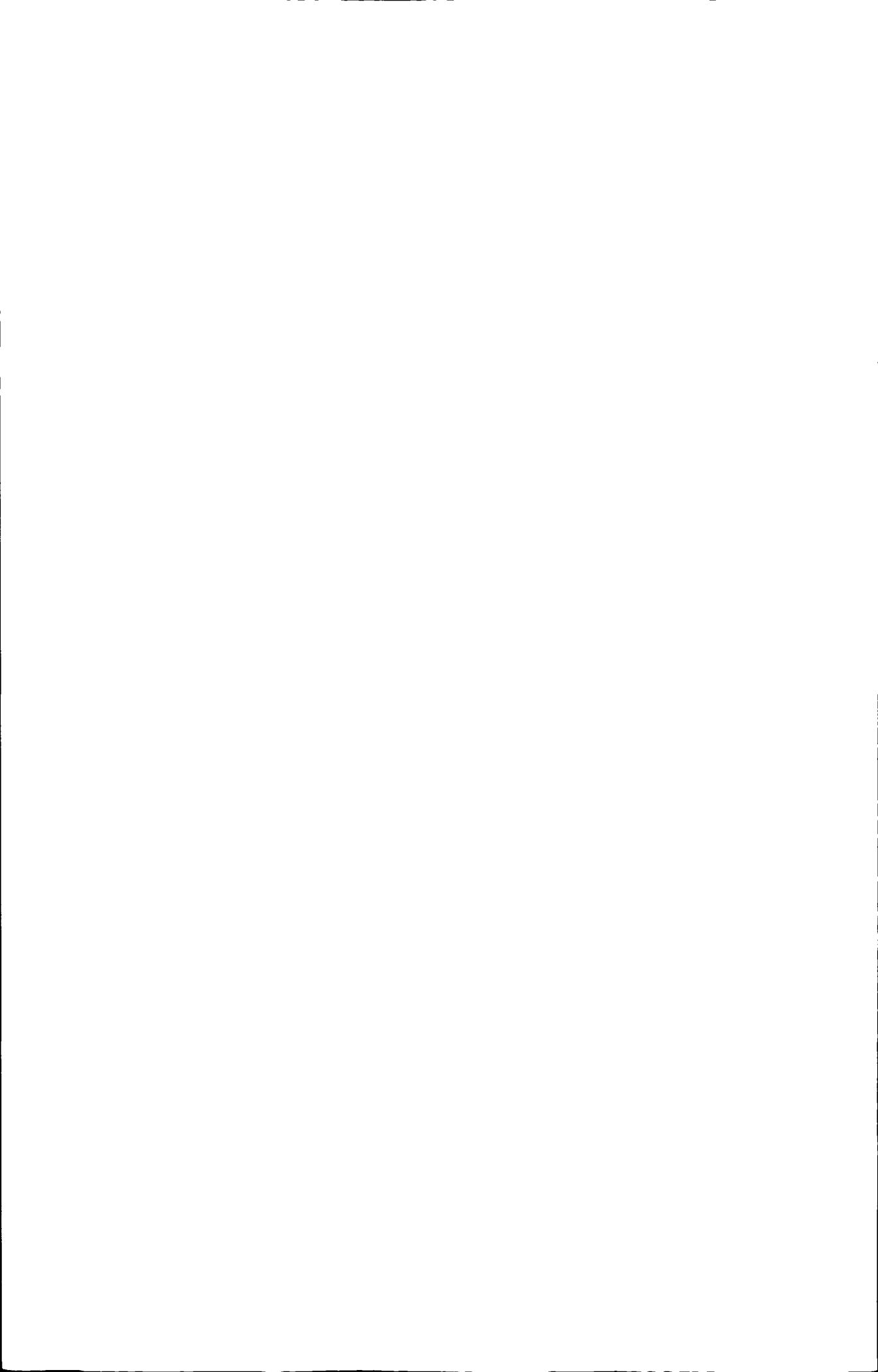
In recent years, with the development of power electronics, VSC (voltage source converter) has become an active player in electricity transmission and distribution. This paper is mainly concerned about a VSC-HVDC (Voltage source converter high voltage direct current) converters to connect a wind farm and also to improve the fault ride-through capability of the wind farm at the expense of the AC fault. Because of a high degree of flexibility and controllable characteristics, VSC-HVDC primarily finds its application in the field of renewable energy distributed generation, supplying of isolated load, asynchronous network interconnection and other fields. In renewable energy, Wind power is one of the fastest growing sustainable energy resources over the past decade. But the integration of wind generation to power grid can bring many power quality problems because of the randomness and intermittence of wind energy, the relevant influences on the host grids need to be carefully investigated.

In this paper, First, this paper presents the possible improvements of voltage quality in connection of a wind farm to transmission network using VSC-HVDC link. The important influence of voltage fluctuation caused by the wind farm integration is analyzed. The dynamic behavior of the system is verified by simulation analyses using laboratory standard power system software package, PSCAD/EMTDC.

Secondly, this paper presents a nonlinear control scheme for VSC-HVDC transmission system. The design of the proposed nonlinear controller has been performed in a rotating reference frame fixed to the grid voltage vectors. The controller is designed to provide high dynamic performance and complete decouple control of active and reactive power. Steady state and transient performance under various operating conditions have been examined. The nonlinear controller has provided complete decouple control of active and reactive power.

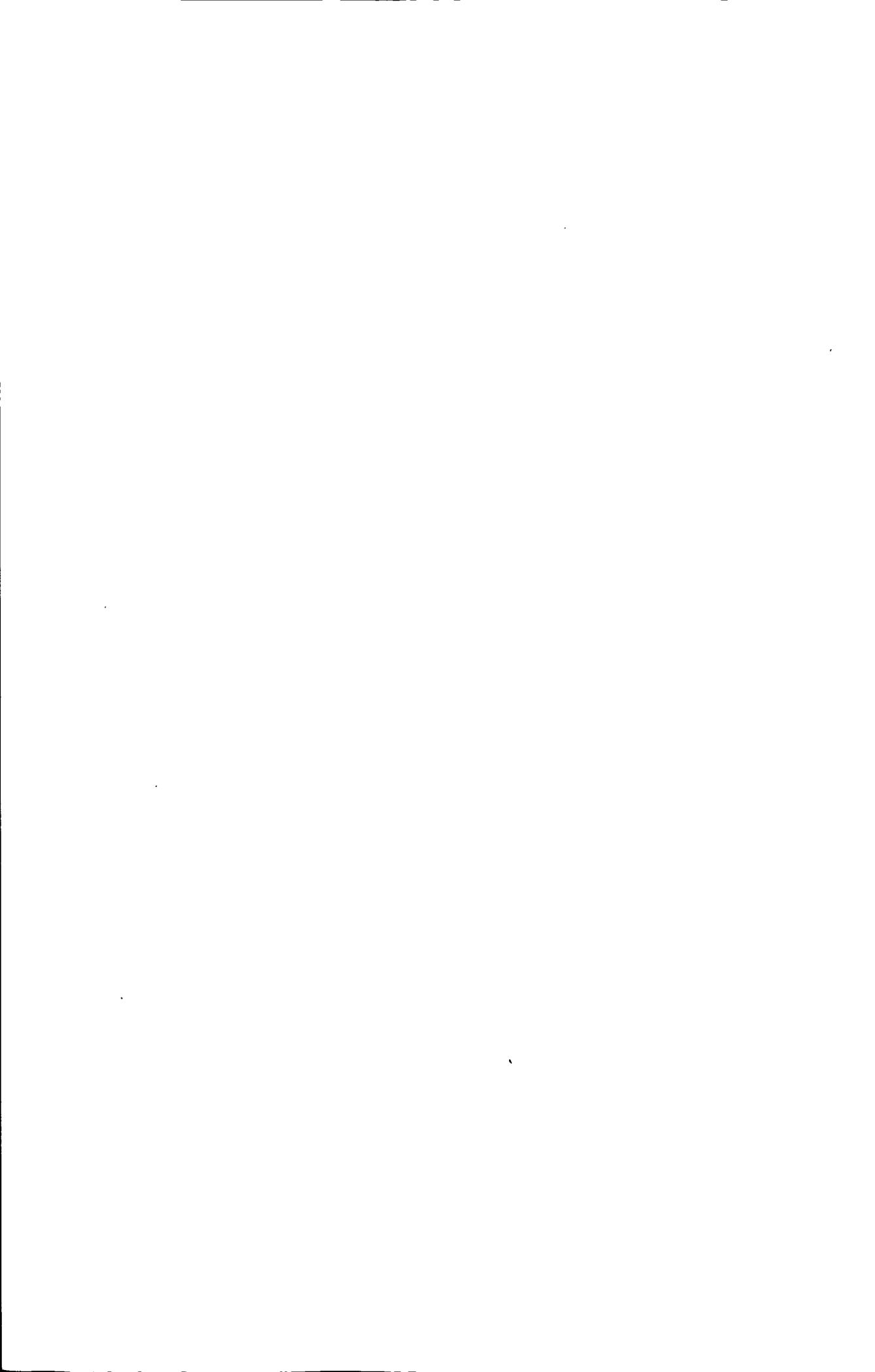
At last, ANN (an artificial neural network) based current controller for a HVDC transmission link is described in this paper. a controller model which based on RBFNN Theory and PID control technology is designed by using S function. Based on this, A HVDC control system is built and simulated in PSCAD and Matlab. Radial basis function neural network is optimized based on gradient descent algorithm, and its model is constructed, then the M language program is written. By adjusting parameters of PID controller, the output approximately tracks the input.

It is proved that the VSC-HVDC has great impact on the wind power system to improve system transient stability and provide the reactive voltage supporting effect in order to improve system voltage stability. The results prove validities of the operation principle and control strategy, which gives very good reference value for the



VSC-HVDC used in the wind system in the future. and show the system posses fault tolerance capability and strong stability.

Key words: Wind farms; VSC-HVDC; Nonlinear Control; RBF-PID



插图索引

图 1-1 电流源与电压源换流器的结构图	4
图 1-2 恒速恒频风力发电机系统	7
图 1-3 风轮机直接驱动同步发电机系统	7
图 1-4 双馈感应发电机系统	8
图 2-1 VSC-HVDC 原理图	12
图 2-2 典型电压源换流器拓扑结构	13
图 2-3 基本滤波器结构图	13
图 2-4 基本直流电缆	14
图 2-5 VSC 单相示意图	14
图 2-6 VSC 正弦脉宽调制原理及输出波形	15
图 2-7 VSC-HVDC 换流器基波向量图	16
图 2-8 VSC 稳态运行典型基波相量图	18
图 2-9 双端 VSC-HVDC 三相电路接线图	18
图 2-10 dq 同步旋转坐标系 0 与 abc 三相静止坐标系之间的关系	19
图 2-11 同步旋转坐标系下的 VSC-HVDC 等效电路图	21
图 2-12 VSC-HVDC 控制系统构成	22
图 2-13 换流站暂态模型框图	23
图 2-15 网侧换流站控制系统结构示意图	24
图 2-16 VSC-HVDC 风电并网典型拓扑结构	27
图 2-17 无功功率控制器	28
图 2-18 送端站侧故障风电场并网仿真波形	30
图 2-19 受端站侧故障风电场并网仿真波形	31
图 3-1 整流器非线性控制结构图	36
图 3-2 逆变器非线性控制结构图	37
图 3-3 传统 PI 控制系统图	38
图 3-4 直流电流阶跃实验仿真	40
图 3-5 风电场侧交流电压闪变	42
图 4-1 RBF 网络结构简图	44
图 4-2 RBF 网络整定 PID 控制框图	46
图 4-3 基本接口模块运行流程	47
图 4-4 建立的 RBF-PID 接口模块图	47



图 4-5 启动特性	47
图 4-6 阶跃响应特性	48

第 1 章 绪论

本章主要介绍课题背景和选题意义。首先分析风力发电的发展趋势和意义，通过对 HVDC 发展过程进行了描述并对各个发展阶段性能进行分析比较，并叙述了基于 VSC-HVDC 风电场并网的特点和研究现状，最后分析了风电场的特点和问题，针对上述问题进一步提出本文研究内容。

1.1 概述

风能作为目前可再生能源开发应用中规模最大，技术最成熟，最具有广阔发展前景的分布式发电方式之一。风力发电是风能利用最重要的形式，在降低环境污染，整合能源结构，解决偏远地区工业和生活用电问题等方面起到主要作用，并逐渐受到人类的重视，世界各国投入大量的人力物力加大对风能开发和利用来减轻能源危机对本国的影响。全球范围内，风能储量非常巨大，理论上仅 1% 的风能就能满足人类能源需要，大规模利用风力发电则是当今世界各国为解决能源紧缺、降低温室气体排放、提高环境质量而采取的一项有效措施^[1, 2]。近年，人类从风能上获得到的新能源年增 30%，是目前增长速度最快的新能源之一，2002 年底世界风力发电装机容量为 32000MW，2004 年底世界风力发电装置容量为 60000MW，2006 年底，全球风电装机容量 74000MW，到 2010 年全世界风力发电装机容量将突破 197517MW^[3, 4]。

我国广阔的地域和地理条件蕴含着比较丰富风能资源，根据能源部风能资料估算预算，我国内陆有容量约 2.5 亿千瓦可开发风力发电资源，7.5 亿千瓦海上风力发电资源可开发容量，总共可开发风力发电容量约 10 亿千瓦。但是我国风电发展相对比较晚，从 2003 年以后，风力发电才引起重视，进入高速发展，仅 2006 年就新增 133.4 万千瓦风电装机容量，占世界总新增装机容量的 8.9%，同比增长 165.83%，全国累计装机容量到 260 万千瓦，占世界风电装机总容量的 35%。到 2008 年底，我国风电装机总容量已达 1324.22 万千瓦，2010 年，更是达到 4527 万千瓦。依据改革委员和国家发展会等有关部门初步规划，到 2020 年力争我国风电装机总容量达到 2.3 亿千瓦，同时使中国的风电设计、制造和管理技术等相关技术达到国际先进水平^[5, 6]。

电力系统中风力发电场容量在所占比例的逐年不断增加，对我国能源优化作出了重要贡献。但是，随机性和间歇性是风电场输出功率一个明显特点，对电力系统的安全、稳定性以及电能质量被风力发电场的影响也越来越明显，风电场的安全并网技术也成为风电应用研究领域一个重要课题。基于电压源换流器 (Voltage source converter, VSC) 结构组成的高压直流输电技术即 VSC-HVDC 输电技术，开关器件全部使用全控型器件，该系统无功功率是快速调整控制，无功

补偿设备和换相电压不需要外部电力电网提供。拥有开关损耗小, 频率高, 高功率因数等优点。目前, 基于 VSC-HVDC 输电技术最大传输容量已达数百兆瓦, 即将成为或取代传统高压直流输电的一个的关键技术。在风力发电、太阳能发电等分布式能源并网以及向特殊场合下(如海岛和边远地区等)无交流电压支撑输送电能等特殊方面, VSC-HVDC 输电技术即将成为电力电网的重要组成部分, 为电网传输提供新的发展方向^[7-9]。

1.2 直流输电技术发展历程

电能传输采用直流输电是电力工业初期主要的输电形式, 由于在电力系统工业发展初期控制技术和电力电子技术比较落后, 直流输电与交流输电相比存在不足; 如变压能力少、传输电压低、线路损耗大、并网能力不足、供电距离短、电力系统发输电结构设备复杂以及维护成本高等, 制约着直流输电的发展。而交流输电由于电力设备简单、传输电压多样性、线路损耗少等优点, 迅速发展起来, 占据了电力系统工业的主导地位。但是, 电力系统的不断发展壮大导致了电网联系逐渐复杂多变, 交流系统也显示了一些本质上的不足, 特别是交流系统同步运行时稳定性受到的限制。世界上首次投运的直流输电工程(瑞典本土至 Gotland 岛的 20MW、100kV 海底直流电缆输电)自 1954 年投入商业化运行以来, 直流输电技术研究重新被重视, 大量研究成果发表和实际工程的运行, 促进了直流输电技术的快速发展。直流输电是电力电子技术应用的最重要、最基础, 同时也是最活跃的领域之一, 直流输电最核心的技术是换流站技术, 直流输电技术的发展体现在换流器件的发展变化上, 直流输电系统的换流元件经历了从汞弧阀到晶闸管阀的变革。根据换流器件的不同可以看出直流输电技术的发展过程^[10-14]。

1、可控汞弧阀换流

汞弧阀是一种具有汞阴极并利用汞蒸汽电离后所形成的等离子体实现单向导电的真空离子器件。运行中可利用栅极对点火相位角进行控制, 借助于交流电网提供的换相电压和电流, 实现阀的开通与关断和换流器的换相。1954 年, 成功投入运行的瑞典大陆连接哥特兰岛(Gotland)的直流输电工程是世界上首次采用汞弧阀换流器的商业化直流输电技术系统, 标志着高压直流输电的诞生。由于汞弧阀在运行中会因其阳极上有阴极斑点形成而暂时失去反向阻断能力, 发生逆弧故障, 相当于汞弧阀反向导通, 发生桥臂短路, 引起交直流系统扰动并使直流输送功率降低。同时, 汞弧阀制造价格高、技术难、运行维护困难等因素, 它很快被新兴的晶闸管换流技术所代替。1977 年后, 新建工程已不再采用汞弧阀, 而且一些较老工程的汞弧阀也逐渐被晶闸管阀所替代。

2、晶闸管换流器

由于, 晶闸管换流器制造、维护比汞弧阀简单, 并且易于控制、启动时间少等优点, 并且, 晶闸管换流器技术的大容量高压可控硅元件组成的研究和推广应用, 晶闸管换流器逐渐代替汞弧阀, 该技术并将 HVDC 输电进入一个高速发展黄金

阶段,即所谓的晶闸管换流时期。1970年,哥特兰岛直流输电系统被增容扩建,在汞弧阀换流器上叠加了世界上首个可控硅换流器,增容部分的电流为200A、直流电压为50kV、送电功率为10MW,扩建成为直流输电系统功率为30MW、电压150kV。1972年新建的加拿大伊尔河非同步联络站是世界上首次采用可控硅换流器的直流工程。目前,晶闸管换流器仍然是多数直流输电工程的基本选择。

3、新型半导体换流元件构成的换流器

晶闸管阀与汞弧阀相比具有一系列的优越性,但换流阀无自关断能力,换相仍需借助外部的换相电压完成,换流器在运行时需要大量的无功,有换相失败的可能性,向弱交流系统送电比较困难。近年新型电力电子器件技术的应用,特别是可关断器件技术的研究发展,其容量和电压等级不断提高,以及高频开关性质,给直流输电技术注入新的技术力量。标志着直流输电技术开始了新的发展时期是1997年在瑞典投入运行直流输电(HVDC Light)工业性试验工程,首次使用IGBT组成的电压源型换流器,输送距离为10km,输送功率3MW,电压 ± 10 kV。并且瑞典于1999年投运了首个商业化HVDC light工程,用于Gotland岛上风力发电厂和Visby市电网并网输电,即Gotland地下电缆送电工程,输送功率50MW。从此新型直流输电的进入了高速发展期。在通常情况下,电力工业初期广泛应用直流输电技术发电、输电和供电技术;19世纪80年代后,电力工业的规模性发展,直流输电不能满足需要,交流输电技术取代直流输电成为电力工业主要应用方式;直到20世纪中期,汞弧阀换流器技术进步和应用推广,特别是新型电力电子变换技术的广泛应用和高速发展,加快了直流输电技术应用。并在远距离、大容量传输和一些特殊的环境(背靠背、地下、海下)中具有明显的应用优势而得到广泛的推广,形成了当前电力系统传输中交流输电技术占主导地位、直流输电作为多样化补充的分布新格局。

1.3 电压源和电流源换流站结构比较

使用门极触发脉冲控制全控型器件的关断来实现器件自换相功能,不需要所接电力系统给换流器提供换相电流,因此这种换流器技术称作自换相换流器。依据直流侧滤波器的不同结构形式,自换相换流器主要分为电流源换流器(CSC)和电压源换流器(VSC)两大类。直流端并联大电容的换流器是电压源换流器,并联大电容是维持直流侧近似为恒压源;直流侧串联大电感换流器是电流源换流器,串联大电感维持直流侧近似为恒流源。CSC的直流电压方向的改变决定了功率传输的方向,同时保持直流侧电流极性不变,而VSC的直流电流方向的改变决定了功率传输的方向,同时保持直流侧电压极性不变[15],如图1-1结构图来表示两种换流器的结构形式:

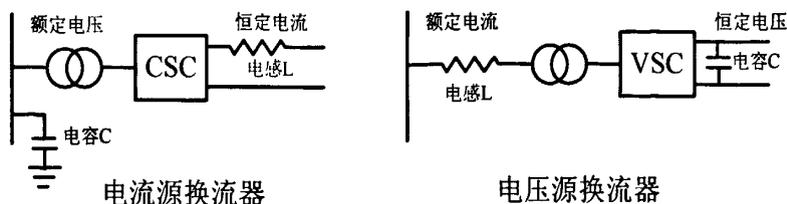


图 1-1 电流源与电压源换流器的结构图

基于 VSC 的 HVDC 输电技术是 20 世纪 90 年代发展起来的新型 HVDC 输电技术，相关的试验工程从 1997 年才开始建设，采用新型全控器件构成换流器，并结合脉宽调制技术 (PWM)，实现有功和无功的独立控制，解决了基于传统 HVDC 输电需要吸收大量无功功率和换相失败等问题 [15]。自换相电压源换流器已在电源和传动等领域得到广泛应用，为了与传统 HVDC 技术区分，采用自换相电压源换流器 VSC-HVDC 称为新型直流输电。国际上,ABB 公司称这种新技术为 HVDC-Light, siemens 公司命名为 HVDC-Plus, 相关国际组织建议使用 VSC-HVDC, 本文统一采用 VSC-HVDC 来表示这种换流技术。

目前,应用在静止无功发生装置、直流输电换流器一般都为电压源型。像 SMES (超导储能装置) 等直流侧存在大电感, 可作为电流源的电路多为电流源型换流器。与电网换流式换流器不同, 器件换流式换流器的优点在于他可以与小容量交流系统互联。在这种情况下必须做到快速控制交流电压, 同时, 直流输电通常情况是保持一定的直流电压值, 调整直流电流来运行。而电流源型在通过降低直流电流来进行潮流控制时它的无功功率控制范围更小, 无功功率供给能力低。另外, 目前换流电路研发的主流是电压源型的, 电流源型电路易于出现过电压等问题, 对元件耐压水平提出更高的要求, 还必须对其进行高耐压, 大容量化的研发。所以, 电压源型更适合应用在高压直流输电系统中。

如前所述, VSC-HVDC 输电主要特点是采用可控关断型电力电子器件和 PWM 技术, 与传统直流输电相比主要有以下技术特点 [14-18]:

(1)、VSC-HVDC 直流输电的具有自关断功能, 无需外加的换相电压, 可以在无源逆变方式下工作, 满足孤立负荷送电问题, 解决了传统的 HVDC 受端系统必须是有源网络的根本缺陷。

(2)、VSC-HVDC 直流输电的有功和无功在四个象限运行, 正常运行时, VSC 系统可以独立地控制有功功率和无功功率, VSC 系统发挥着 STATCOM 的作用, 不需要交流侧提供无功功率, 系统的无功功率可以采用交流母线动态补偿方法来保持交流母线电压稳定性, 提高系统的联网电压质量。

(3)、VSC-HVDC 直流输电系统在反向潮流传输中, 可以保持直流电压极性不变仅仅改变直流电流方向, 有利于方便地控制潮流传输方向, 解决了传统并联多端高压直流系统潮流控制不便和系统串联连接时又影响可靠性等缺点。

(4)、由于 VSC 交流侧电流可以被独立解耦控制, 系统短路功率不增加。因此, 电网新增加 VSC-HVDC 系统后, 基本不需改变交流系统的控制参数。

(5)、模块化设计结构占地面积仅为同容量下传统直流输电的 20%左右,更符合建设“环保”和“绿色”电力的需要。同时,换流站的主要设备能够先期在工厂中组装完毕,并预先做完各种试验,从而减轻了现场安装调试时间和劳动强度,建设工期更短,方便了工程的设计、生产、安装和缩短了调试周期。

1.4 VSC-HVDC 直流输电技术应用

电气控制技术和电力电子新技术的发展,采用全控型功率器件构成电压源型换流站(Voltage Source Converter, VSC)技术的广泛应用,这种新技术也促进了新型直流输电技术的发展应用。上世纪九十年代后期,ABB 公司首次使用 VSC-HVDC 输电技术,ABB 公司把 VSC 和聚合物电缆相结合的电能的传输新技术应用并把这种新的电能传输技术称为轻型直流输电,首次 VSC-HVDC 的工业试验是 1997 年 3 月在瑞典中部的赫尔斯杨和格兰斯堡电网之间进行,其后这种新技术并成功应用于多个领域。从其技术特点和实际工程的运行来看,克服了传统 HVDC 的本质缺陷和不足,为直流输电技术的发展开辟了一个新研究方向,扩展了直流输电技术的应用领域。该技术主要适用于可再生能源和分布式发电并网,孤岛供电和异步交流电网互联等领域,其主要应用领域是^[16-18]:

(1)、连接分散的小型发电厂以及非同步运行系统的连接。受自然和地理条件限制,通常新能源发电装机容量分散、电能质量不高并且建设在远离主网的偏远地区,如风电场(含海上风电场)、太阳能电站等,已有的输电系统在经济上和技术上不能满足并网技术指标的要求。

(2)、构筑城市直流输配电网。随着城市的不断推进发展和社会经济的高速增长,原有架空配电网已不能满足日益增长的电力的需求,而线路走廊有限,因此,向城市中心提供大量高质量的电能将面临艰巨的困难。合理的方法是采用高压直流电缆输电,能输送更多的电能,满足用户的需要,并且可以独立快速地控制有功和无功,能够保持配网系统的电压基本不变。因此,VSC-HVDC 技术将是今后一段时间向城市中心区域供电主要形式和改善配网电能质量的有效措施。

(3)、给偏远地区及孤岛提供经济电能。那些负荷轻且负荷波动大远离电网用电区域,由于经济因素及线路输送距离大制约着交流输电线路发展,阻碍了这些地区电力系统和区域经济的发展。采用 VSC-HVDC 进行供电,可使电网线路的单位输送功率大大增强,改善了供电可靠性,减少线路维护工作量,并保护了环境。

总之,VSC-HVDC 系统具有集成化和模块化设计,易于现场安装和调试,易于扩展和实现多端直流输电等独有的技术优点。因此基于 VSC 技术的 HVDC 的诸多优势必将成为未来电力系统中一个不可缺少或重要组成部分。

到目前为止,世界上已有或在建的 VSC-HVDC 工程有^[15]:

(1)、瑞典 1997 年 3 月投入运行的 *Hellsjon* 实验工程,是第一个 VSC-HVDC 工业工程,直流电流 150A,输送功率 3MW,直流电压 $\pm 10\text{KV}$,线路长 10KM。完成了复杂的实验,获得了详细运行的数据。

(2)、瑞典 1999 年 12 月投入运行的 Gotland 的 VSC-HVDC 工程, 为世界上首个商业化运行的 VSC-HVDC 工程, 直流电压 $\pm 80\text{KV}$, 额定容量 54MW , 直流电流 350A , 输电线路长度 70KM 。主要目的是将 Gotland 岛上风电场剩余负荷送至北部负荷中心, 通过对电压源换流器的控制, 补偿异步风力发电机和负荷消耗的无功功率来稳定电压。

(3)、2000 年 6 月, 丹麦投运 Tjæreborg 示范工程投入运行, 主要是将海上风力发电通过 VSC-HVDC 接入到交流电网系统, 额定容量 7.2MW , 直流电流 358A , 直流电压 $\pm 9\text{KV}$, 输电距离 4.3KM 。系统为交直流混合结构, 共有交流输电、直流输电、交直流混合输电三种方式。一般运行在 32Hz - 52Hz 之间来保持风力发电机运行效率达到最高, 解决风力发电引起的无功功率和电压问题。

(4)、澳大利亚 Direct Link 工程通过长 59KM 地下电缆将 New South Wales 和 Queens Land 两个非同步交流电网连接在一起, 该工程为 3 套同规格设备 ($\pm 80\text{KV}$ 、 60MW) 并列运行, 系统总容量达到 180MW , 解决异步联网中电力交易的快速控制问题和满足环境要求, 2000 年投入运行。

(5)、位于美国 Eagle Pass 直流工程, 2000 年投入运行。该工程为利用 VSC-HVDC 实现了美国一侧的 Texas 州电网与墨西哥电网非同步互联, 采用背靠背方式, 最大传输功率为 36MW , 直流电压为 $\pm 15.9\text{KV}$, 直流电流 1130A , 无功功率范围为 $\pm 36\text{MVAR}$ 。实现了美国电网和墨西哥电网的并网互联, 提升了向 Eagle Pass 的输电能力, 该系统可以作为 BTB 方式和 STATCOM 方式两种运行。使用回路切换技术, 可以作为 2 台 36MVA 的 STATCOM 投入到美国侧或者墨西哥侧的电网系统上运行。还可以用于黑启动向无源系统输送功率, 也可实现在单独给负荷供电的同时与主网的并网。

(6)、2002 年 4 月投运的澳大利亚 Murray link 工程: 建设目的是使 South Australia 州与 Victoria 州实现互联, 两端的交流网络电压分别为 132KV 和 220KV , 直流输电线路为两根 180KM 地下电缆, 直流电流和直流电压分别为 739A 和 $\pm 150\text{KV}$, 最大传输功率 220MW 。

(7)、2002 年 5 月正式投运的美国 Cross Sound Cable 工程使位于美国的 Connecticut 电网与纽约长岛电网互联, 是第一个长距离海底电缆输电项目, 直流线路采用两根 42KM 海底电缆, 两端交流电压分别为 345KV 和 138KV , 直流电压为 $\pm 150\text{KV}$, 直流电流 1200A , 传输功率为 330MW , 由于 Cross Sound Cable 工程将 VSC-HVDC 的直流电压和直流电流等级提高到了一个更高的水平, 该工程的商业化运行, VSC-HVDC 技术发展历程中具有重要的意义。

(8)、2005 年投运的挪威 Troll A VSC-HVDC 工程, 两端换流站分别位于 Troll A 和 Kollsnes, 该工程向海上天然气钻井平台上的设备进行供电, 直流电压 $\pm 60\text{KV}$, 直流电流 400A , 传输功率 82MW , 输电线路使用四根 70KM 长的海底电缆。

(9)、爱沙尼亚 Estlink 工程：利用 150KM 的电缆对 Espoo 和 Harku 两电网进行连接实现电能交易，直流电压 $\pm 150\text{KV}$ ，直流电流 1230A，传输功率 350MW，是当今世界上功率最大的 VSC-HVDC 工程。

1.5 基于 VSC-HVDC 的风电场并网技术发展

1.5.1 并网型风力发电系统的特点及现状

恒速恒频风力发电系统和变速恒频风力发电系统是并网型风力发电机组主要类型。恒速恒频风力发电系统如图 1-2 所示，通过风吹动风力机，经齿轮箱变速后带动异步发电机转动将风能转化为电能，恒速运行的风力机转速不变，而风速经常变化，使风力机常常运行于低效状态。恒速恒频发电系统具有结构简单、成本低、过载能力强以及运行可靠性高等优点。但是在恒速恒频风力发电系统中，风电机组直接与电网相耦合，风电的特性将直接对电网产生影响，它的运行需要无功电源的支持，加重了电网的无功负担。

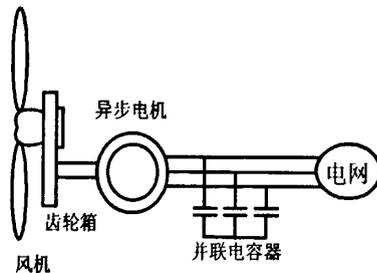


图 1-2 恒速恒频风力发电系统

大容量电力电子技术的成熟发展促进了变速恒频风力发电系统的广泛应用，从结构和运行方面看，变速恒频风力发电系统主要分为直接驱动的同步发电机系统和双馈感应发电机系统两大方式，它们的原理图如图 1-3 和 1-4 所示。在风力机直接连接同步发电机组成的变速恒频发电系统中，发电机输出电压的频率是变化的，可以通过变频器连接电网，输出频率恒定的电压。

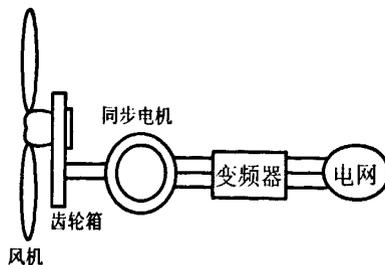


图 1-3 风轮机直接驱动的同步发电机系统

双馈式风力发电机(以下简称双馈式风机)是变速运行风机的一种，其模型如图 1-4 所示，由风机、变速齿轮箱、双馈感应发电机(DFIG)、脉冲宽度调制(PWM)变频器以及直流侧电容器等组成。双馈式风机的定子直接连接电网，其定子绕组

直接与电网相连，转子绕组采用了三相对称绕组，连接电网采用了背靠背的双电压源变频器，为风力发电机提供交流励磁，交流励磁频率就是风力发电机的转差频率。这种风机可以在大范围速度内运行，与电网之间实现能量双向传输。

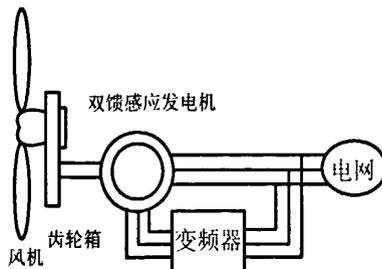


图 1-4 双馈感应发电机系统

变速恒频风力发电机组采用了解耦电网频率与发电机转速的控制技术，实现了独立控制，减少了它们之间相互影响。特别是双馈感应发电机，当风机在次同步速度运行时，功率从定子流向转子；而当风机在超同步速度运行时，功率从转子流向电网。大范围内控制电机转差、有功功率和无功功率必须控制转子电流，来提高系统的稳定性。因此，双馈式风机不需要并联电容器来进行无功补偿，同时还可以追踪最大风能，降低有功输出的波动，降低机组机械应力。在转子侧控制功率因数，改善电能质量，实现安全和方便并网。但是它复杂的结构、高的成本、技术困难限制了它的发展。随着电力电子技术的发展，促进了变速恒频风力发电技术进一步广泛应用，体现出了显著的优越性和广阔的应用前景，将会成为今后风力发电设备的主要选择^[38]。

在风电场建设与接入电网之前，必须进行包含风电场的电力系统仿真分析计算，研究规划它们之间的相互影响，无论是对于风电场还是电网安全经济运行而言，都是非常必要的。有助于找到风电场可能导致相关的问题，分析风电场接入及不同运行方式对电网系统稳定性的影响，同时，采用必要的控制措施增强风电场并网后运行的经济稳定运行，尤其是电网侧发生故障扰动情况下的风电场及电网的安全与稳定性，最大限度的保证风电场的并网发电运行。风力发电使用风能作为唯一动力源是一种清洁能源使用形式，风力随自然条件变化影响，风速与风向发生不断的、随机的变化，本身具有不可控、不可调的特征，造成风力发电出力的随机性和间歇性。此外，即使在同一个风电场内的风电机组，安装不同的地点的风速和风向具有明显的差异，其风力发电机输出功率的也是不同的。随着风电场安装容量的增加，这种不可控的变动的功率注入电网，将对电网的安全和稳定造成不可忽视的影响，这种风电场并网接入电力系统引起的安全、稳定性问题也必将引起高度重视。风电机组在变动的风速作用下，引起功率输出的变动导致所接入系统的并网点的电压波动^[27]，这种连续的电压波动可能会引起相对较严重的闪变问题。电网必须按照发、供、用同时完成的规律连续、安全、可靠、稳定地向客户提供频率、电压合格的优质电力。制约着风电规模的发展，风电场随风速波动的功率输出就会对并网电网电压造成不良影响，引起电压波动和闪变，这

种并网问题也是一个风电并网固有的顽疾，在通常情况下这种电压波动和闪变成为制约风电场发展规模的主要因素^[40-44]。因此，必须高度重视发展风电并网对电网安全经济运行带来的影响进行研究。

1.5.2 基于 VSC-HVDC 的风电系统发展现状

1997 年随着世界上第一条 VSC-HVDC（轻型直流输电）工程的建设应用，在全球范围内关于 VSC-HVDC 直流输电的研究也逐渐成为热点。目前，风电场并网已经建成两套实际研究性工程，分别是瑞典的 Gotland 风电场并网工程和丹麦的 Tjareborg 风电场并网工程。世界上关于 VSC-HVDC 的研究，不管在工程实际应用还是在基本理论都已进行了全面详细的研究。国际上关于这种新技术的研究重点包括如何提高 VSC-HVDC 输电的容量、减少电能输电损耗、降低工程造价，提高 VSC-HVDC 输电的并网安全和可靠性研究，以及对交流电网的支持和它们之间的并网运行相互影响等相关方面。

A 并网工程应用研究

加拿大 McGill 大学的 Boon-Teck Ooi 等研究人员在 1990 年首次提出了使用 PWM 技术来控制的 VSC 进行直流输电的技术概念，但是，当时仅仅研究了系统输出基波电压和交流母线电压间的相位差，则不控制基波的幅值，系统不能实现对有功功率和无功功率的独立解耦控制调节，不能够充分体现 VSC-HVDC 系统的技术优势。ABB 公司在 1997 年成功实施了基于 IGBT 和 PWM 控制技术的 VSC-HVDC 工程，并表现出良好的系统运行特性，这种新技术才逐渐走进人们的视野引起众多电力工作者的高度重视，促进了这种新技术研究发展的黄金阶段。

论文[18]介绍了第一个工业实验 VSC-HVDC 工程——瑞典的 Hellsjn 工程，叙述了 VSC-HVDC 的研究现状，分析了目前研究主要领域和前景。论文[19]叙述了 Gotland 和 Tjareborg 风电场并网工程技术，分析出 VSC-HVDC 能很好地解决风电场输出功率变化影响并网点电压波动问题，提高系统的暂态稳定性，并提升风电场系统并网电能质量。论文[20]对比分析风电场使用交流和直流两种并网的方案特点，论证了基于 VSC-HVDC 并网技术在电网发生故障时能隔离风电场后又能快速恢复风电场的正常运行，验证了 VSC-HVDC 在风电并网的应用中能够有效降低风电场注入电网的谐波和引起的电压闪变，能提高电能质量和电网安全。论文[21-24]介绍了首个商业运行的基于 VSC-HVDC 技术的瑞典 Gotland 工程，分析了不断增加装机容量引起的电能质量和电网安全等问题，制约着风电并网的进一步发展。对比分析研究认为基于 VSC-HVDC 技术的并网风力发电是解决风电场安全并网问题最为有效的方法，甚至是唯一的途径。最后，论文还分析了系统正常与故障情况下的 VSC-HVDC 与交流系统的保护策略以及其协调控制方法，并简要叙述了并联输电的潮流控制和故障保护方法。论文[25, 26]简单的仿真分析了丹麦的 Tjareborg 工程，分析论证了大规模风电场并网可能存在的交流电缆输送功率的极限、故障引起的电压崩溃和并网电能质量等方面的问题的解决方案。论文[27,

28]分析讨论了基于 VSC-HVDC 技术进行海上油气平台与海洋风电场并网研究,分析了基于 VSC-HVDC 的海上输电的经济性问题,论证了两种可能的 VSC-HVDC 连接方式:交-直-交和交-直-直-交的特点。

上述论文主要讨论了基于 VSC-HVDC 技术风电场并网应用工程,并对这些工程进行了较为详细的分析和研究,指出基于 VSC-HVDC 并网的风电场的技术特点与运行特性,论证了 VSC-HVDC 技术可以灵活快速的对功率控制能力来解决风电并网的电能质量、无功电压和安全稳定性等并网问题具有很好的抑制作用。这些研究内容仅仅对工程实际应用方面的简单介绍研究,没有对 VSC-HVDC 进行详细的理论研究。

B 模型和控制技术研究

基于 VSC-HVDC 技术风电场并网国外研究开展比较早,技术也比较成熟,论文[30]论述了基于多端 VSC-HVDC 风电场并网技术,通过控制 VSC 变频功能满足了每台风力发电机的最大功率点寻优控制技术的研究,并分析了该技术特别适用于海上风电场的直流电缆输电并网应用,但该论文没有对网侧换流站和风电场经 VSC-HVDC 并网综合特性进行详细研究。论文[31]分析了基于 VSC-HVDC 的风电场并网方式和其控制策略技术的研究,论证了在电网侧换流站采用直流电流和无功功率相结合的控制技术,风电场侧换流站采用交流电流和频率相结合的控制技术,本论文仅仅停留在控制系统的外环控制器进行研究分析,没有分析出解耦控制功能的内环控制器的设计。论文[32]使用仿真软件 PSCAD/EMTDC 对基于 VSC-HVDC 技术并网海上风电场进行了可行性分析研究,分别仿真了风电场经交、直流两种并网方式下,电网系统故障对电网侧电压和风电场电机组的影响,本论文仅仅对 VSC-HVDC 的控制系统模型进行简单分析,没有提出实际应用解决方案。论文[33]讨论了爱尔兰电网大规模风电场接入引起的低电压穿越问题的影响,通过与交流并网输电方案进行比较分析,论证了只有经 VSC-HVDC 技术并网传输才能实现低电压穿越性能满足当地风电并网标准,没有对基于 VSC-HVDC 并网传输的控制系统模型进行详细分析研究,仅仅论证了技术标准。论文[34]分析研究了基于 VSC-HVDC 传输技术能解决区域内低频振荡,并提高电压稳定性的问题。论文[26]使用电力系统仿真程序 DlgSILENT 建立了 VSC-HVDC 系统模型以及其控制系统模型,并进行了负荷扰动下和风速变化的情况分别仿真验证,但没有对模型的故障情况下和频率控制的动作情况进一步进行论证验证。

国内进行 VSC-HVDC 输电技术的分析研究的比较晚,目前研究工作还仅仅集中在 VSC-HVDC 输电技术的模型仿真和控制技术以及保护策略理论等方面。对基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统的研究就更少见了,大多数的研究过度简化并网风电场特性,仅仅用电压源或者单个风力发电机代替整个风电场,忽略了并网风电场的复杂特性。论文[9]对新型直流输电技术和传统直流输电技术进行了对比研究论证,论证了作为基于新型输电技术技术的优点,有效克服传统直流输电的不足,指出这种新型直流输电技术应用前景。论文[35]讨论了 VSC-HVDC 技术的基本原

理,并详细的介绍该技术优缺点,指出该技术在国外的应用情况及发展前景,对该技术在国内的发展过程和应用前景进行了总结。论文[36]详细叙述了 VSC-HVDC 系统的稳态模型,并在该稳态模型的分析基础上,设计了由控制器和比例积分(PI)调节器构成的非线性控制器技术,提出了非线性补偿环节在控制 VSC 直流电压的 PI 调节器作用。论文[34]使用了 MATLAB 仿真软件建立了双端 VSC-HVDC 无源网络输电的仿真电力模型,分别对两端换流站采用定无功功率、定直流电压和定交流电压等控制方法进行了仿真验证。论文[37]论证了电压源换流器的稳态特性,使用了牛顿法潮流计算的稳态数学模型,同时基于节点电流注入法建立了系统的暂态模型,论述了单极性二值逻辑开关函数原理,并通过该原理建立了 VSC-HVDC 的开关函数模型,并在 PSCAD 仿真软件中搭建了仿真模型,论证了 VSC-HVDC 对交流系统暂态特性的影响。但该论文主要是对 VSC-HVDC 的基本原理及控制策略进行分析,没有考虑其在风电并网实际应用中的独有特点。论文[38]使用了一种基于 VSC-HVDC 技术的交直流混合风电场并网策略,在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立了风电场、输电系统模型和控制系统模型,论证了使用该技术并网的风电场对本地电能质量、电网稳定性解决方案,同时该技术提高风电场的输送容量。论文[39]讨论了 VSC-HVDC 技术的暂态、稳态和离散化三种数学模型的方法,同时设计了相应的控制策略,进行了风电场的交直流混合并网传输技术理论研究,证明了基于 VSC-HVDC 技术的风电场并网可以提高风电场的并网性能和改善低电压穿越能力的结论,但本论文对基于 VSC-HVDC 并网的风电场技术原理和电网故障运行特性研究不够彻底^[38]。

1.6 论文的主要内容

本论文主要从以下几个方面的内容进行分析研究:

(1)、研究了基于基波物理量之间的约束关系建立的 VSC-HVDC 稳态模型,在电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 中实现风电场并网的 VSC-HVDC 控制系统仿真分析,对该控制策略下风电场经 VSC-HVDC 并网的短路接地特性进行了仿真。

(2)、本文使用的非线性控制器能满足系统的动态性能和解耦直流电压和功率,将非线性控制理论领域中的新研究成果与电力系统动态学有机的结合起来,采用关系度方法进行设计一个基于 VSC-HVDC 风电并网系统非线性控制器。在 PSCAD/EMTDC 软件上仿真了这个非线性控制器的性能,并与常规控制器相比较。

(3)、最后使用了一种简单易行神经网络控制器(RBF-PID),不需要有精确的系统动态模型,并进行仿真来证明该策略的可行性和有效性,为风电并网的控制技术探索了一个新的方向。

器的电压高低、额定功率的大小和电力电子开关器件性能决定了其串联器件的个数。

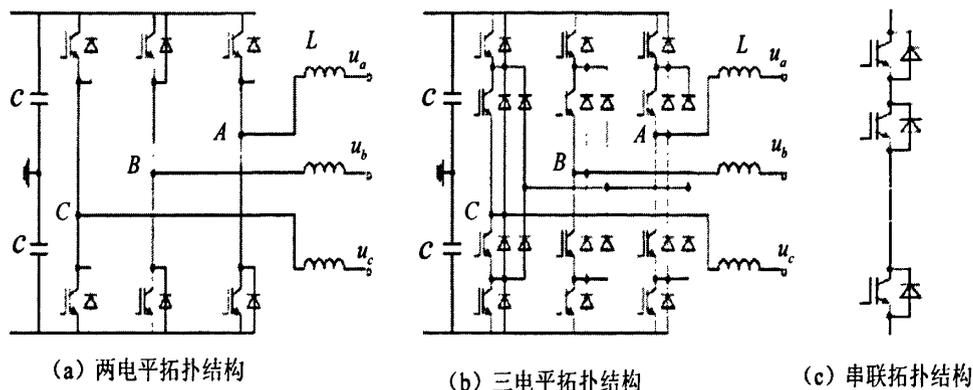


图 2-2 典型电压源换流器拓扑结构

换流变压器：换流变压器可以采用常规的单相或三相变压器，通过调节换流变压器的二次侧绕组分接头开关来调节二次侧的基准电压，获得系统最大的功率输送能力。同时，抑制直流故障电流，有效保护换流阀，减少换流器注入交流系统的谐波。

平波电抗器：在电压源换流站中，平波电抗器是换流站的重要设备之一，防止轻载时直流电流断续，减少直流电流纹波。因此，必须对平波电抗器的参数进行优化来防止直流线路或直流开关站产生的冲击波进入阀厅，保护换流阀电气损坏。

直流侧电容器：直流侧电容是直流侧储能器件，是用来减轻器件开断对桥臂的冲击电流影响，减少电压谐波，提供电压支撑换流站正常运行。同时，直流侧电容量决定其对直流电压波动抑制的能力和对换流站控制系统的响应特性的影响。

滤波器：一般可以分为交流滤波器和直流滤波器两种，分别接于交、直流母线上，抑制换流器产生的注入交流系统或直流系统线路的谐波，其结构如图 2-3 所示。当然，在选择交流滤波器参数大小时，要视系统具体情况而定。

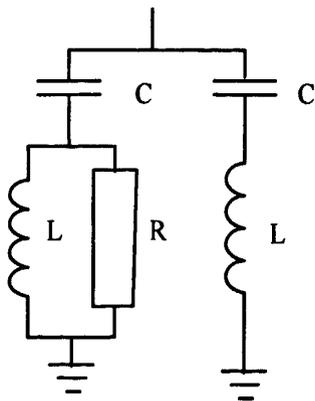


图 2-3 基本滤波器结构图

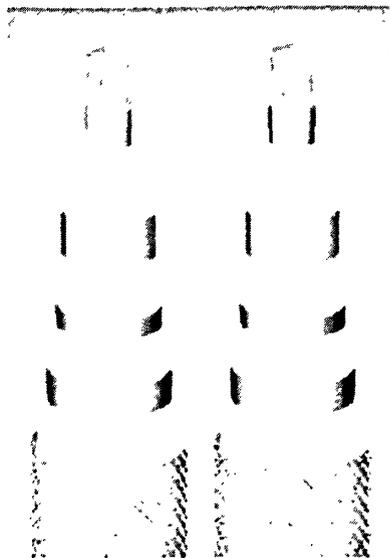


图 2-4 基本直流电缆

输电电缆：为了降低输电线路故障的发生和电力损耗，在 VSC-HVDC 传输系统中通常采用以电缆为输电线路的主要形式。大多使用了由 ABB 公司研制新型的三层聚合材料挤压的电缆，如图 2-4 所示，这种新型电缆重量轻、传输功率密度大，具有强度高和便于电缆掩埋等特点，广泛应用于深海等恶劣环境^[29]。

2、基本工作原理

如前所述，电压源型换流站输电技术与传统直流输电技术不同，VSC-HVDC 采用电压源型换流器和 PWM 技术，其基本工作原理如图 2-5 和图 2-6 所示。由三角载波与调制波相比较产生的触发脉冲，来触发 VSC 上下桥臂的全控型高频器件开通和关断实现换流的，其直流侧并联电容器以保持一定稳定的直流电压，交流侧输出电流由系统侧电压和换流器输出电压的关系决定，桥臂中点电压 u_c 在两个稳定电压 $+U_d$ 和 $-U_d$ 之间进行切换，同时 u_c 经过电抗器滤波后则成为网侧的交流电压 u_s 。^[15]

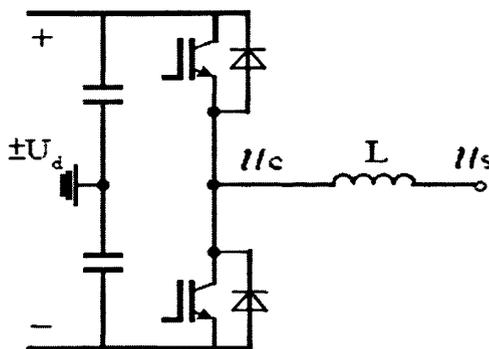


图 2-5 VSC 单相示意图

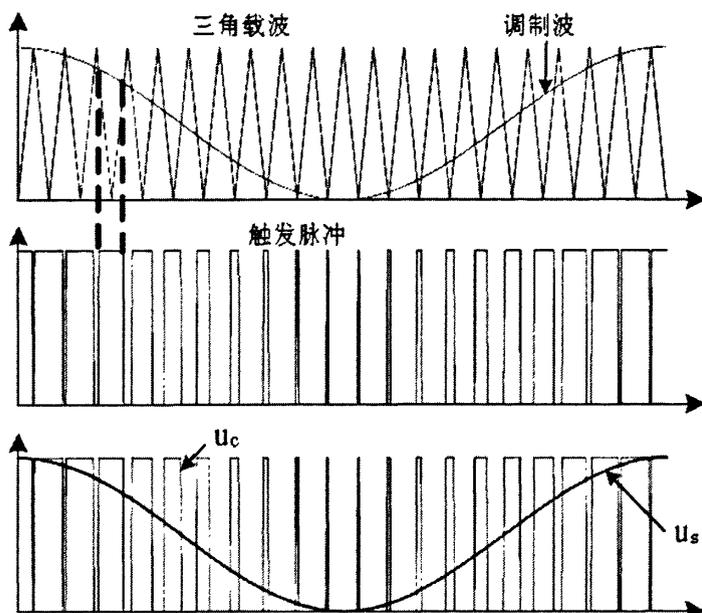


图 2-6 VSC 正弦脉宽调制原理及输出波形

VSC-HVDC 系统可以高频开通和关断来换流,使得 VSC 在一个周波内可以换相多次,采用脉宽调制 (PWM) 技术的 VSC 主要有两个控制变量:调制比 M 和相对于 VSC 交流母线电压 U_s 的移相角度 δ 来控制阀的触发来调制 VSC 输出的电压和电流得到近似正弦波的输出技术,而且控制功率因数来快速改变交流输出电压的相位与幅值,实现有功与无功的独立调节控制。其输出交流母线电压的基波分量为:

$$\dot{U}_c = \frac{\mu M}{\sqrt{2}} \mu_d \angle \delta_s - \delta \quad (2-1)$$

式中: u_d -- 直流侧电压

μ -- PWM 方式相关的直流电压利用率

δ_s -- 交流母线电压 U_s 的相角

通常,为了研究的原因假设换流电抗器为理想元件无损耗且忽略系统谐波分量的产生,换流器和交流电网之间交换的有功功率 P 和无功功率 Q 分别可表示为:

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (2-2)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (2-3)$$

式中: U_c -- 表示系统输出电压的基波分量

U_s -- 表示交流母线电压的基波分量

δ -- 表示 U_s 和 U_c 之间的相角差

X -- 表示换流电抗器电抗

换流器稳态运行时的基波相量图可以由式 (2-2) 和 (2-3) 可以得出,如图 2-7 所示。从图上可以看出,有功功率的传输主要有 δ 决定,无功功率的传输主

要有 U_c 控制。所以控制系统输送有功功率的大小以及系统直流电流的方向必须通过对 δ 大小控制来完成，对 VSC 传输无功功率大小和方向控制必须通过控制 U_c 来实现了。

从式 (2-1) 可以看出，调制比 M 大小决定了 VSC 输出电压 U_c 的幅值，给定正弦调制波的频率与相位决定了 U_c 的频率与相位。VSC 输出电压 U_c 的相位和幅值来控制 VSC 吸收的功率，所以要控制有功功率和无功功率的方向和大小可以通过脉宽调制 (PWM) 控制给定正弦调制波的相位和调制比 M 来实现对有功功率和无功功率的独立调节。从系统角度功能上分析，VSC 系统可以认为是一个理想的电动机或者发电机，能够快速实现功率的四个象限运行和独立调节^[29, 38]。

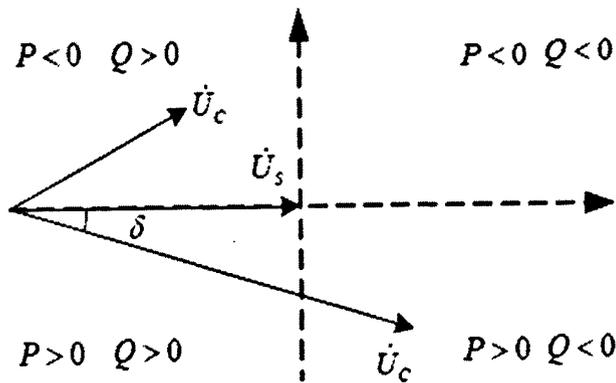


图 2-7 VSC-HVDC 换流器基波向量图

2.1.2 稳态建模与工作特性

本节在基于的 VSC-HVDC 其稳态运行特性进行分析的基础上，建立了稳态模型系统^[38]。图 2-1 所示为两端 VSC-HVDC 稳态物理模型。这里为了分析的原因，假设左右分别为送端站和受端站， X_1 、 X_2 和 R_1 、 R_2 分别为两个换流站电抗器的电抗和电阻， X_d 和 R_d 为直流输电线路的等效电抗和电阻，可得注入送端站的基波电流为：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{s1} - \dot{U}_{c1}}{R_1 + jX_1} = (U_{s1} - U_{c1} \angle \delta_1) Y_1 \angle -\alpha_1 \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} \bar{S}_{s1} = P_{s1} + jQ_{s1} = U_{s1} \cdot (-\dot{I}_1)^* = U_{s1} \cdot \left[\frac{(-U_{s1} + U_{c1} \angle \delta_1)}{Z_1 \angle \alpha_1} \right]^* \\ \bar{S}_{c1} = P_{c1} + jQ_{c1} = U_{c1} \cdot (-\dot{I}_1)^* = U_{c1} \angle \delta_1 \cdot \left[\frac{(U_{s1} - U_{c1} \angle \delta_1)}{Z_1 \angle \alpha_1} \right]^* \end{cases} \quad (2-5)$$

忽略换流电抗器电阻 R_1 ，可推出：

$$\begin{cases} P_{s1} = \frac{U_{s1}U_{c1}}{X_1} \sin \delta_1 \\ Q_{s1} = \frac{U_{s1}}{X_1} (U_{c1} \cos \delta_1 - U_{s1}) \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\begin{cases} P_{c1} = -\frac{U_{s1}U_{c1}}{X_1} \sin \delta_1 \\ Q_{c1} = \frac{U_{c1}}{X_1} (U_{c1} - U_{s1} \cos \delta_1) \end{cases} \quad (2-7)$$

忽略直流线路电抗 X_d ，可推出：

$$\begin{cases} P_{d1} = U_{d1} \cdot I_{d1} \\ P_{d2} = U_{d2} \cdot I_{d2} \\ I_{d1} = -I_{d2} = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_d} \end{cases} \quad (2-8)$$

同样的分析方法在受端站也可以得到类似的公式，这里不再论述。

对 (2-6)和(2-7)两式分析可以得出，VSC 输出电压 U_{s1} 的相位主要控制着系统传输的有功功率， U_{c1} 的幅值主要控制着系统传输的无功功率。改变 VSC 与交流系统间无功功率和有功功率的传输的大小和方向主要取决于 VSC 输出电压 U_{c1} 的幅值和相位改变，因此通过不同的控制方法可以实现系统在功率 PQ 平面上任一象限内运行。图 2-9 为 VSC 稳态运行基波相量分析图，其中：

(1) $\delta > 0$ 且 $\cos \delta = U_s / U_c$ 时，与交流系统间的无功功率交换为 0，向交流系统输入有功功率，换流站工作逆变状态，如图 2-8(a)所示；

(2) $\delta > 0$ 且 $U_c \cos \delta > U_s$ 时，向交流系统输入容性无功功率和有功功率，换流站工作逆变状态，如图 2-8(b)所示；

(3) $\delta > 0$ 且 $U_c \cos \delta < U_s$ 时，吸收容性无功功率，向交流系统输入有功功率，换流站工作逆变状态，如图 2-8(c)所示；

(4) $\delta < 0$ 且 $\cos \delta = U_s / U_c$ 时，与交流系统间的无功功率交换，从交流系统吸收有功功率，换流站工作整流状态，如图 2-8(d)所示；

(5) $\delta < 0$ 且 $U_c \cos \delta > U_s$ 时，提供容性无功功率，从交流系统吸收有功功率，换流站工作整流状态，如图 2-8(e)所示；

(6) $\delta < 0$ 且 $U_c \cos \delta < U_s$ 时，吸收容性无功功率，从交流系统吸收有功功率，换流站工作整流状态，如图 2-8(f)所示。

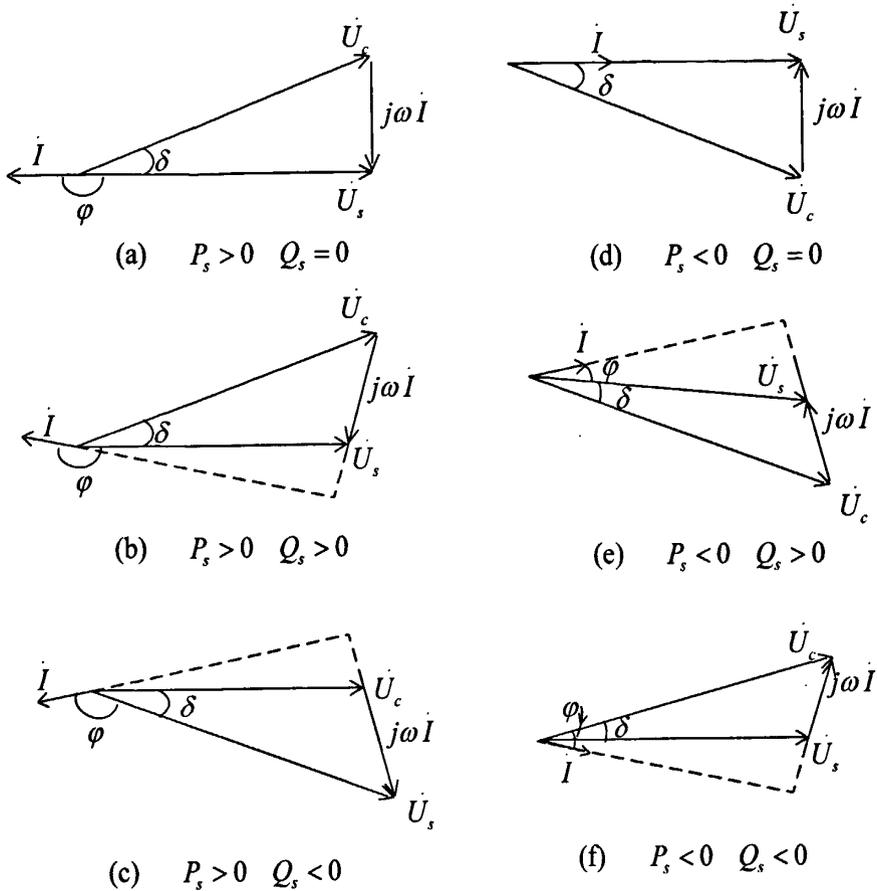


图 2-8 VSC 稳态运行典型基波相量图

2.1.3 暂态建模与工作特性

本节建立了 VSC-HVDC 暂态数学分析模型^[54]，通过该模型能够精确度来分析 VSC-HVDC 的运行特性和研究该系统的控制策略。

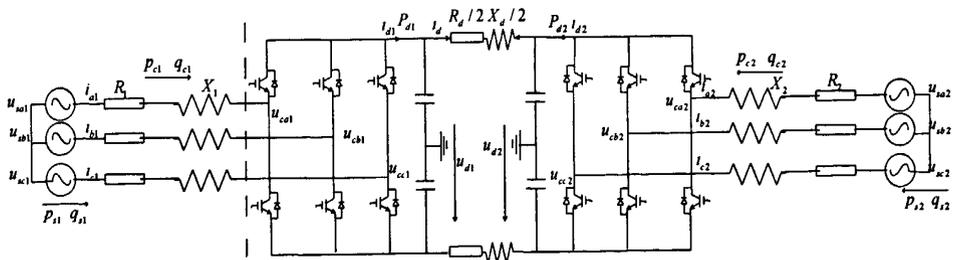


图 2-9 双端 VSC-HVDC 三相电路接线图

三相拓扑图及各物理量的参考方向如图 2-9 所示的双端结构图。并假设左侧换流站为送端站，相应的物理量用下标“1”；右侧换流站为受端站，相应的物理量用下标“2”表示。假设系统为理想情况下，忽略电气元件的漏抗和损耗，并认为主电路三相对称相等，等效电抗为 L ，等效电阻为 R 。直流输电线用 π 型等效

电路形式来表示，其等效电感为 L_d ，等效电阻为 R_d 。

建立理想状况下 VSC-HVDC 系统的 dq 旋转坐标输出电压的基波分量，假设系统电压 abc，可得在在内同步旋转坐标中与三相静止坐标系中的关系如图 2-10 所示。

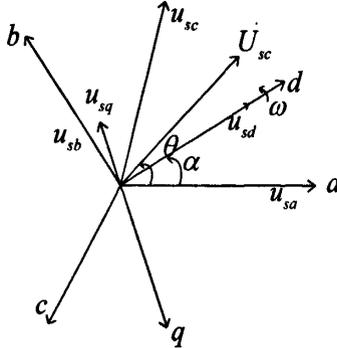


图 2-10 dq 同步旋转坐标系 0 与 abc 三相静止坐标系之间的关系

可得变微分方程的矩阵矢量方程式如下：

$$L_k \frac{dI_{kabc}}{dt} = -R_x I_{kabc} + (U_{skabc} - U_{ckabc}) \quad (2-9)$$

$$\text{式中, } I_{kabc} = \begin{bmatrix} i_{ak} \\ i_{bk} \\ i_{ck} \end{bmatrix}, U_{skabc} = \begin{bmatrix} U_{sk} \cos \omega_k t \\ U_{sk}(\omega_k t - 120^\circ) \\ U_{sk}(\omega_k t + 120^\circ) \end{bmatrix}, U_{ckabc} = \begin{bmatrix} k_k u_{dk} \cos(\omega_k t - \delta_k) \\ k_k u_{dk}(\omega_k t - 120^\circ - \delta_k) \\ k_k u_{dk}(\omega_k t + 120^\circ - \delta_k) \end{bmatrix},$$

换流站输出电压与系统电压的夹角和直流电压利用系数分别为 δ_k 和 K_k ，其中 δ_k 为可控量； ω_k 为交流系统的基波角频率；送端站物理量用 $k=1$ 代表，送端站物理量使用 $k=2$ 代表。

Park 变换矩阵和变换逆矩阵分别表示如下：

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos a & \cos(a-120^\circ) & \cos(a+120^\circ) \\ \sin a & \sin(a-120^\circ) & \sin(a+120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 1 \\ \cos(a-120^\circ) & \sin(a-120^\circ) & 1 \\ \cos(a+120^\circ) & \sin(a+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

把式 (2-10)、式 (2-11) 代入式 (2-9)，并令 $a = \omega_k t$ ，可得：

$$\frac{dI_{kdq0}}{dt} = -\frac{R_k}{L_k} I_{kdq0} + \frac{1}{L_k} (U_{skdq0} - U_{ckdq0}) - P \frac{dP^{-1}}{dt} I_{kdq0} \quad (2-12)$$

三相对称交流系统中无零序分量，去除零序分量后，上式可写为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_k} \begin{bmatrix} -R_k & -\omega_k L_k \\ \omega_k L_k & -R_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_k} \begin{bmatrix} U_{sdk} \\ U_{sqk} \end{bmatrix} - \frac{u_{dk}}{L_k} \begin{bmatrix} k_{kd} \\ k_{kq} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

式中, 换流站交流矢量 I_{kdq0} 的 d、q 轴分量分别使用 i_{kd} 、 i_{kq} 表示; 当 U_{sk} 以 d 轴定位, 且 α 轴与 d 轴的初相角等于 0 时, 换流站交流输出电压 d、q 轴直流电压分别表示为 $k_{kd} = k_d \cos \delta_k$ 、 $k_{kq} = k_d \sin \delta_k$; U_{skd} 、 U_{skq} 分别可表示电网电压矢量 U_{skdq0} 的 d、q 轴分量。

换流器注入的有功功率 p_{ck} 和无功功率 q_{ck} 为:

$$\begin{cases} p_{ck} = \frac{3}{2}(U_{ckd}i_{kd} + U_{ckq}i_{kq}) = \frac{3K_k u_{dk}}{2}(i_{kd} \cos \delta_k + i_{kq} \sin \delta_k) \\ q_{ck} = \frac{3}{2}(U_{ckd}i_{kq} - U_{ckq}i_{kd}) = \frac{3K_k u_{dk}}{2}(i_{kq} \cos \delta_k - i_{kd} \sin \delta_k) \end{cases} \quad (2-15)$$

VSC-HVDC 直流侧功率方程为:

$$\begin{cases} p_{d1} = u_{d1}(C \cdot du_{d1} / dt + i_d) \\ p_{d2} = u_{d2}(C \cdot du_{d2} / dt - i_d) \end{cases} \quad (2-16)$$

假设 VSC-HVDC 换流站为理想状态下, 忽略了元件损耗。依据能量守恒定律, 换流站注入的功率应该等于其输出的功率, 由此得到该系统的功率约束方程如下:

$$p_k = p_{dk} \quad (2-17)$$

当以 d 轴为电网电压相量定位, 联立方程 (2-12) ~ (2-17), 并代入 $U_{sq} = 0$ 、 $k_{kd} = k_d \cos \delta_k$ 、 $k_{kq} = k_d \sin \delta_k$, 可得 dq 旋转坐标系下的 VSC-HVDC 数学模型:

$$\begin{cases} L_k \frac{di_{kd}}{dt} = -R_k i_{kd} - \omega_k L_k i_{kq} + U_{sdk} - K_k u_{dk} \cos \delta_1 \\ L_k \frac{di_{kq}}{dt} = \omega_k L_k i_{kd} - R_k i_{kq} - K_k u_{dk} \sin \delta_1 \\ C \frac{du_{d1}}{dt} = \frac{3K_1}{2}(i_{1d} \cos \delta_1 + i_{1q} \sin \delta_1) - i_d \\ C \frac{du_{d2}}{dt} = \frac{3K_2}{2}(i_{2d} \cos \delta_2 + i_{2q} \sin \delta_2) + i_d \\ L_d \frac{di_d}{dt} = u_{d1} - u_{d2} - i_d R_d \end{cases} \quad (2-18)$$

式 (2-18) 的微分方程组是多阶常系数方程组, 为便于理论分析, 依据 dq 同步旋转坐标系下的两端 VSC-HVDC 数学模型可以得出等效电路图, 见图 2-11 所示:

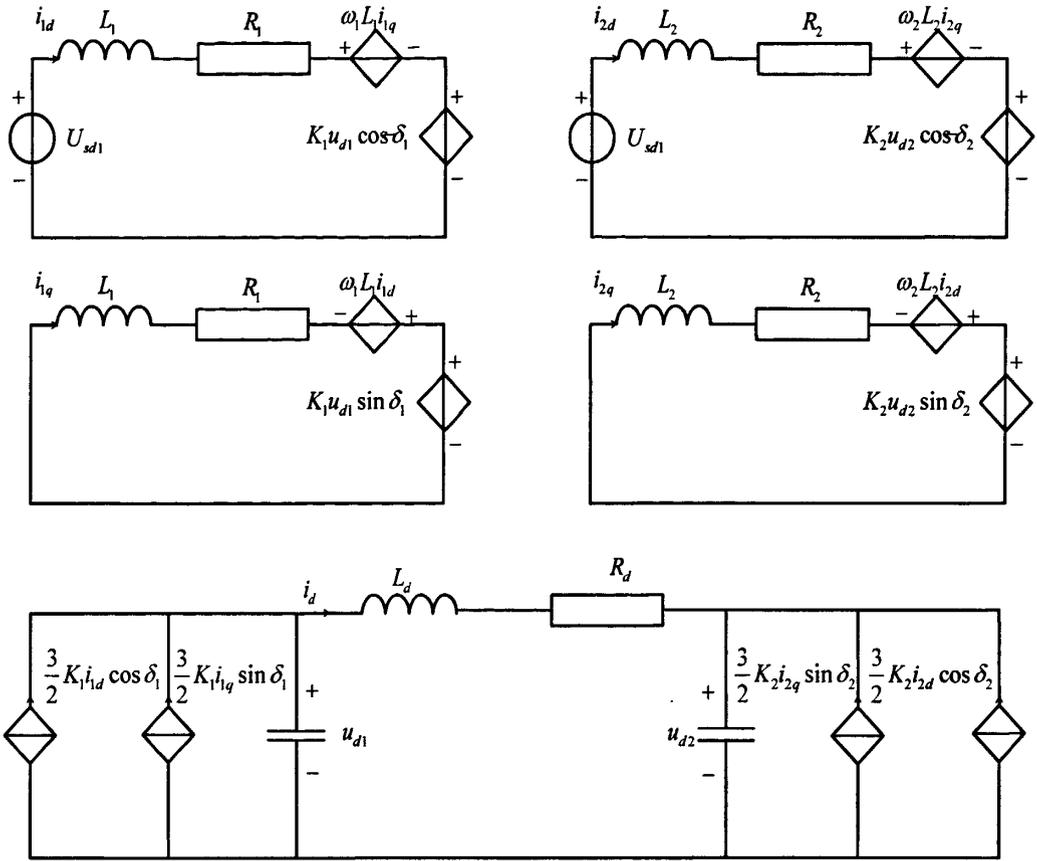


图 2-11 同步旋转坐标系下的 VSC-HVDC 等效电路图

由图可知送端交流系统的 dq 轴子电路形式，呈现为受控电压源特性，直流电压 u_{d1} 的受控电压源 $K_1 u_{d1} \cos \delta_1$ (K_1 和 δ_1 通过 PWM 调制可控) 和 q 轴电流 i_q 的受控电压源 $\omega_1 L_1 i_q$ 构成 d 轴子电路，直流电压 u_{d1} 的受控电压源 $K_1 u_{d1} \sin \delta_1$ 和 d 轴电流 i_d 的受控电压源 $\omega_1 L_1 i_d$ 构成 q 轴子电路；同样的原理推到，送端系统也可以等效为 dq 轴子电路。这样 VSC-HVDC 电路就可以等效为受控电流源电路，包括送端站的 i_d 的受控电流源 $3K_1 i_d \cos \delta_1 / 2$ 、 i_q 的受控电流源 $3K_1 i_q \sin \delta_1 / 2$ 和受端站的 i_{2d} 的受控电流源 $3K_2 i_{2d} \cos \delta_2 / 2$ 、 i_{2q} 的受控电流源 $3K_2 i_{2q} \sin \delta_2 / 2$ 。

由 VSC-HVDC 交流 dq 分量等效电路图可知，系统在动态调节过程中由于 dq 轴电流之间存在耦合关系 dq 轴分量将相互作用，给控制器设计运行带来不利的影响。等效电路是建立在“Park 变换”的基础上的，能真实的表现出直流系统中电压和电流之间的物理量关系 [3, 36]。

2.2 VSC-HVDC 控制系统研究

2.2.1 VSC-HVDC 的基本控制方式

两端 VSC-HVDC 系统在正常运行方式下，每个站的控制都不受另一个站的影响而独立地控制其无功潮流，但是直流电网的有功潮流必须保持平衡，否则会引起系统直流电压的快速波动变化，危害设备安全。为了保持功率平衡，两个换

流站中一个作为直流电压调节器来调节直流电压，直流电压调节器可以调整其功率信号来保持系统的功率平衡。另一个作为功率调节器，用于控制系统中传输的有功功率恒定。因此，站与站之间可以通过测量直流电压实现系统平衡控制，可以不需站与站之间的通信系统^[17]。

目前常用的控制方法是功率控制，电压源型器件换流式换流器可以通过直流电压直接输出交流电压，交流系统与逆变器交换的有功、无功功率通过分别控制输出电压的幅值和相角，来独立控制功率。由系统主控制层和换流控制层两部分构成了 VSC-HVDC 控制系统图，如图 2-12 所示。其中，在换流控制层主要完成功率和直流电压的控制，并起着协调各换流端子运行的基本功能。由于换流控制层之间不需要直接的通信，因此也减少了对通信系统的依赖。同时，有关自动频率控制 (AFC) /故障紧急支援 (EPPS) 等功能，必要时可以添加到系统控制层中。其中 主控制部分包括：起动、停止指令、潮流反转指令、直流送电电力设定，端子控制部分包括：有功功率控制 (APR)、无功功率控制 (AQR)、直流电压控制 (DC-AVR)、交流电压控制 (AC-AVR)、电流控制 (ACR)、锁相 (PLL)、触发控制 (PWM)。

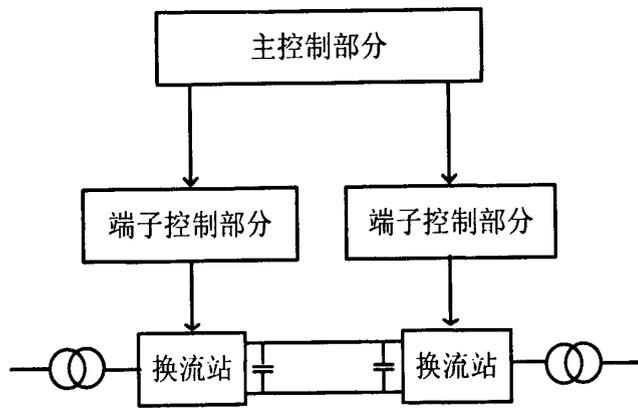


图 2-12 VSC-HVDC 控制系统构成

2.2.2 VSC-HVDC 控制系统

由式 (2-13) 可得：

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c + L_{cs} & \omega L_c \\ \omega L_c & R_c + L_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{cd} \\ U_{cq} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

式中：s 称为微分算子。

当以电网电压相量以 q 轴定位时，即 $U_{sd} = 0$ ，则 dq0 坐标系下的有功和无功分别表示如下：

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(U_{sq}I_{sq} + U_{sd}I_{sd}) = \frac{3}{2}U_{sq}I_{sq} \\ Q_s = \frac{3}{2}(U_{sq}I_{sd} - U_{sd}I_{sq}) = \frac{3}{2}U_{sq}I_{sd} \end{cases} \quad (2-20)$$

通常是通过改变调制波的调制比 M 和移相角 δ 来实现的 SPWM 的控制，当调制比 M 和移相角 δ 可以依据式 (2-21) 由已知的 U_{cd} 和 U_{cq} 来计算：

$$\begin{cases} M = 2 \left[(U_{cd})^2 + (U_{cq})^2 \right]^{1/2} / u_d \\ \delta = \arctan(U_{cq} / U_{cd}) \end{cases} \quad (2-21)$$

由式(2-19)可得到 VSC 暂态模型方框图，如图 2-13 示。由图分析可以知道，对 VSC 换流变压器一次侧电流 I_{sd} 、 I_{sq} 的控制由 VSC 输出电压 U_{cd} 和 U_{cq} 控制实现，而输出电压 U_{cd} 和 U_{cq} 又可以通过控制 PWM 的控制量 M 和 δ 来调节控制，最后由式(2-20)最终实现对功率 P_s 和 Q_s 的控制。由图还可以知道，由于 dq 轴电流之间相互耦合关系，因此在系统动态调节过程中 dq 轴变量将相互作用，制约着控制系统的动态调节性能。因此，必须对解耦 dq 轴电流变量的，设计出解耦控制器来提高 VSC 动态调节性能。

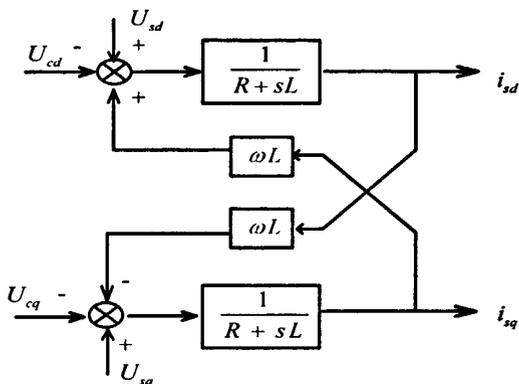


图 2-13 换流站暂态模型框图

在实际风电场并网应用中，网侧通常使用交流电压/直流电压控制或者直流电压/无功功率控制，风电场侧换流站通常应用交流电压/频率控制^[45、46]。用于风电场并网的 VSC-HVDC 两侧换流站控制系统结构图如图 2-14 和图 2-15 所示。

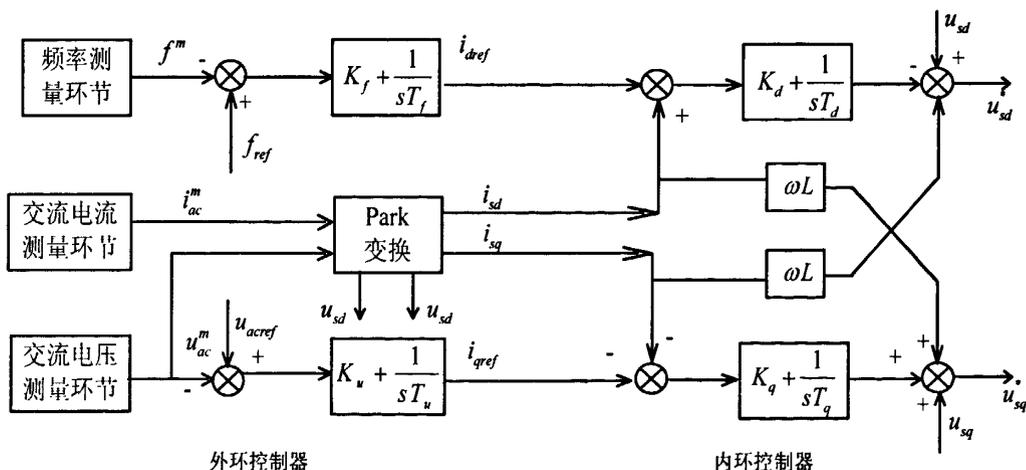


图 2-14 风电场换流站控制系统结构示意图

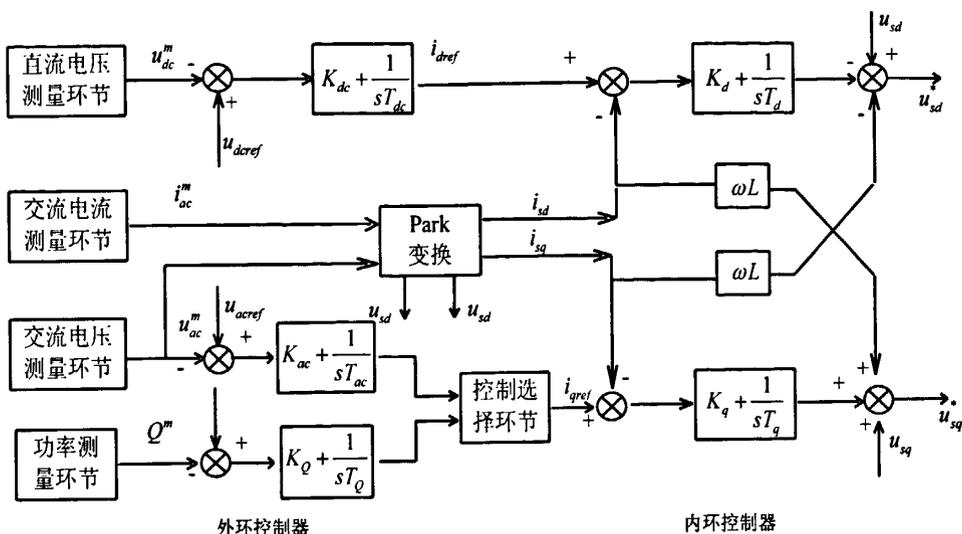


图 2-15 网侧换流站控制系统结构示意图

通过外环控制器控制有功电流和无功电流分量来控制交流系统与换流站的有功功率和无功功率的交换控制，电流内环控制器的有功电流输入值由有功功率类外环控制器的输出信号决定的，无功功率类外环控制器的输出信号是电流内环控制器的无功电流输入值；换流站的动态响应指标的功能由内环控制器的优劣决定，通过前馈补偿解耦控制，系统可以实现独立解耦控制 dq 轴两个通路；控制选择环节主要实现无功功率控制和交流电压控制之间的变换。

2.3 并网型风力发电系统分析

2.3.1 风力发电系统模型

A 风速模型

作用风力机叶片上的风速是风力机的原动力，风力机感受到的风速主要是轮毂高度 H 处的风速 V_w ，风速从测风高度 H_0 到风力机轮毂高度 H 必须进行修正。这在风速数据的处理和分析过程中是应该考虑的因素，修正公式为：

$$V_w = V_{w0} \left[\frac{H}{H_0} \right]^a \quad (2-22)$$

其中： a 为高度修正系数，一般工程应用取 $1/7$ 。

本文使用了目前通常的风力模型：基本风 V_A ，阵风 V_B ，渐变风 V_C 以及随机风 V_D 来准确地描述风的随机性和间歇性的独有特点。

a.基本风：可以由威布尔分布参数近似确定，通过威布分布的数学期望值得：

$$V_A = A \cdot \Gamma(1+1/K) \quad (2-23)$$

威布尔分布的形状参数和尺度参数分别为 K 和 A ，基本风速(m/s)为 V_A ，伽马函数表示为 $\Gamma(1+1/K)$ 。

b. 阵风: 阵风是表示风速突然变化的性质, 函数如下:

$$V_B = \begin{cases} 0(t < T_{IG}) \\ V_s(T_{IG} < t < T_{IG} + T_G) \\ 0(t > T_{IG} + T_G) \end{cases} \quad (2-24)$$

其中 $V_s = (\max G / 2) \{1 - \cos[2\pi(t/T_G) - (T_{IG}/T_G)]\}$;

起动时间表示为 T_{IG} (s), 周期表示为 T_G (s), 阵风风速表示为 V_B (m/s) 和最大值表示为 $\max G$ (m/s)。

c. 渐变风: 描述风速的渐变特性, 函数如下:

$$V_C = \begin{cases} 0(t < T_{IR}) \\ V_r(T_{IR} \leq t < T_{2R}) \\ \max R(T_{2R} \leq t < T_R + T_{2R}) \\ 0(t \geq T_R + T_{2R}) \end{cases} \quad (2-25)$$

其中 $V_r = \max R [1 - (t/T_{2R}) / (T_{IR} - T_{2R})]$;

式中: 渐变风风速表示为 V_C (m/s), T_{IR} (s) 表示起动时间, $\max R$ (m/s) 表示最大值, T_R (s) 表示保持时间和 T_{2R} (s) 表示终止时间。

d. 随机风: 一般用随机噪声风分量来表示风速的随机性, 函数可表示如下:

$$V_D = 2 \sum_{i=1}^N [S_r(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i + \varphi_i) \quad (2-26)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} \omega_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta \omega \\ S_r(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu\pi)^2]^{4/3}} \end{cases}$$

式中: φ_i 指 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量, F 指扰动范围 (m^2); μ 指相对高度的平均风速 (m/s); K_N 指地表粗糙系数; N 指频谱取样点数, ω_i 指各个频率段的频率。

综合上述四种风速成分, 模拟实际作用在风力机上的风速为:

$$V = V_A + V_B + V_C + V_D。$$

由以上分析, 阵风和随机风是电压波动与闪变的主要影响因素, 仿真建模中应精确描述这两种分量的风。

B 风力机特性

为了分析风机系统的电控特性, 一般使用简化的气动力模型来描述风力机的吸收到的功率, 根据贝兹(Betz)理论, 风力机单位时间内捕获的风能为:

$$P_m = 0.5 \rho A v^3 C_p(\lambda) \quad (2-27)$$

式中: P_m —风力机吸收的功率(W)

ρ —空气密度 (Kg/m^3)

v —风速 (m/s)

A—风力机扫掠面积 (m^2)

ω_i —风力机转速

C_p —风能利用系数,反映了风轮机利用风能的效率,它是叶尖速比 λ 的函数:

$$\lambda = \frac{w \cdot r}{v}$$

其中: w --风轮旋转机械角速度, r --风轮叶片半径。

因此,当节距角和风速一定时,风力机只有运行在对应于最佳 λ 的转速下才能捕获到最大的风能。风力机与发电机轴之间通过一增速比为 1:N 的变速齿轮箱相互连接,通过控制双馈电机的转速即可以实现最大风能的捕获^[53]。

2.3.2 双馈式风力发电机模型

本文对目前风电场主要采用的双馈式风力发电机系统进行分析。双馈异步发电机在两相同步旋转坐标系上的数学模型为(q轴超前d轴90°,同步旋转角频率等于定子磁链矢量旋转角频率):

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s(-I_{sd}) + \omega_1 L_s(-I_{sq}) + E_d \\ U_{sq} = R_s(-I_{sq}) + \omega_1 L_s(-I_{sd}) + E_q \\ U_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_1 \psi_{rq} \\ U_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + s\omega_1 \psi_{rd} \end{cases} \quad (2-28)$$

$$\frac{T_j}{N_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (2-29)$$

式中 U_{sd} 、 U_{sq} —定子电压矢量的d、q轴分量

U_{rd} 、 U_{rq} —转子电压矢量的d、q轴分量

R_s 、 R_r —定、转子绕组电阻

ω_1 —同步旋转角速度

ω_r —转子旋转角速度

s —转子转差, $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$

T_j —机组转动惯量

N_p —极对数

T_m —机械转矩

T_e —电磁转矩

因为双馈异步风电机组定子与电网直接连接来维持电压波动相对平缓,通常忽略了定子绕组回路的动态过程在研究并网运行的双馈异步风电机组机电暂态问题时。此时,定子电压方程变为:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s(-I_{sd}) + \omega_1 L'_s(-I_{sq}) + E_d \\ U_{sq} = R_s(-I_{sq}) + \omega_1 L'_s(-I_{sd}) + E_q \end{cases} \quad (2-30)$$

式中 L'_s 一定子绕组暂态电感, $L'_s = L_s - L_m^2 / L_r$

E_d 、 E_q 为双馈异步发电机组定子内电动势, 表达式为:

$$\begin{cases} E_d = -\frac{L_m}{L_r} \omega_1 \psi_{rq} \\ E_q = -\frac{L_m}{L_r} \omega_1 \psi_{rd} \end{cases} \quad (2-31)$$

把转子磁链方程代入转子电压方程, 消去转子电压方程中的转子电流, 可得内电动势的变化规律为:

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} [E_d - \omega_1(L_s - L'_s)I_{sq}] + s\omega_1 E_q - \frac{L_m}{L_r} \omega_1 U_{rq} \\ \frac{dE_q}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} [E_q - \omega_1(L_s - L'_s)I_{sd}] + s\omega_1 E_d - \frac{L_m}{L_r} \omega_1 U_{rd} \end{cases} \quad (2-32)$$

式(2-29)、式(2-30)和式(2-32)构成了双馈异步发电机组的三阶动态模型^[47]。

2.3.3 并网风电场引起的电压波动及控制

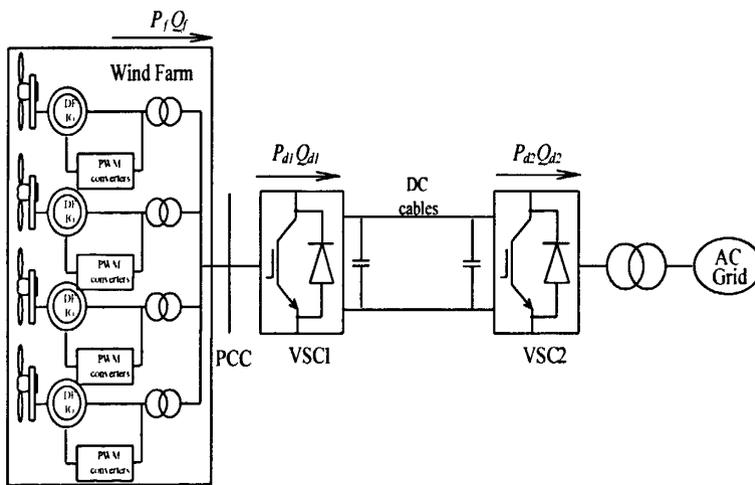


图 2-16 VSC-HVDC 风电并网典型拓扑结构

VSC-HVDC 风电并网典型拓扑结构如图 2-16 所示, 风电场通过升压变压器连接直流输电系统传输并网, 风能的随机性和波动性导致风电场输出有功、无功功率波动。如图 2-16 所示, 当并网系统公共连接点 (PCC) 没有连接 VSC-HVDC 系统时, 交流输电线路上的电压降为:

$$u_{pcc} - u_s \approx \frac{P_f R_s + Q_f X_s}{u_{pcc}} \quad (2-33)$$

式中： u_{pcc} ——PCC点电压。

R_s 、 X_s ——交流输电线路的等效阻抗和电抗。

假设保持恒定的系统电压 u_s ，则由式 (2-33) 可知，PCC 电压波动通常由风电场输出功率 P_f 和 Q_f 的波动导致，有功功率和无功功率可以通过其送端站进行同时输送，考虑到实际并网系统中 $X_s \gg R_s$ ，由有功潮流变化引起的电压波动可以忽略，由 (2-33) 可得：

$$u_{pcc} - u_s \approx \frac{(P_f - P_{d1})R_s + (Q_f - Q_{d1})X_s}{u_{pcc}} \quad (2-34)$$

根据 Q_f 变化来控制送端站无功功率 Q_{d1} 就可以直接控制PCC点电压波动。假设点PCC电压参考值为 u_{pcc}^* ，注入到送端站的参考无功功率为 Q_{d1}^* ，通过 (2-34) 式可得电压与无功功率之间的关系式如下：

$$u_{pcc}^* - u_s \approx \frac{(Q_f - Q_{d1}^*)X_s}{u_{pcc}} \quad (2-35)$$

$$\text{令 } \Delta u_{pcc} = u_{pcc}^* - u_{pcc}$$

$$\Delta Q_{d1} = Q_{d1} - Q_{d1}^* \quad (2-36)$$

由式 (11)、(12) 得

$$\Delta Q_{d1} = \frac{[u_{pcc}^* u_{pcc} + (Q_f - Q_{d1})X_s]}{X_s u_{pcc}} \Delta u_{pcc} \quad (2-37)$$

即已知PCC点电压 u_{pcc} ，风电场输出无功和送端站吸收的无功分别为 Q_f 和 Q_{d1} ，PCC点电压波动 Δu_{pcc} 以及电抗 X_s 后^[3, 7]。送端站无功变化量 ΔQ_{d1} 可以由式 (2-37) 得到，参考无功电流 i_q^* 可由外环控制器得到，参考电压 u_{pcc}^* 可由内环控制器得到，系统实现无功功率控制来调节并网点电压。VSC-HVDC无功功率控制器如图2-17所示，采用比例积分 (PI) 控制器来完成系统的控制调节，其中 K_p 和 K_i 分别是控制系统的比例系数和积分系数。

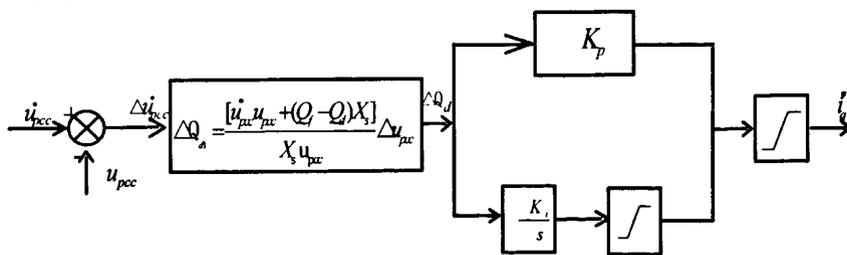


图 2-17 无功功率控制器

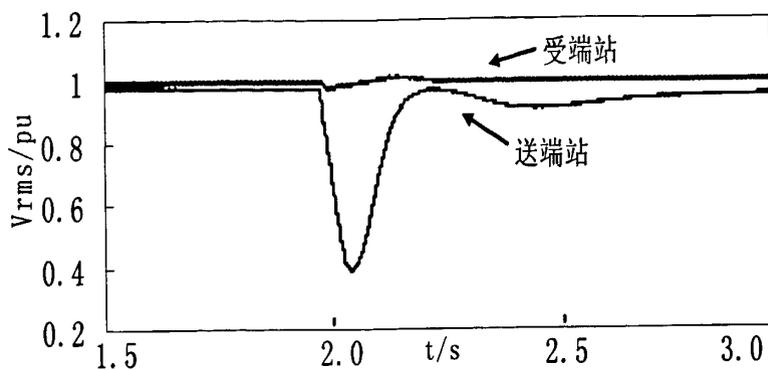
2.4 基于 VSC-HVDC 风电场并网系统计算机仿真

2.4.1 仿真软件简介

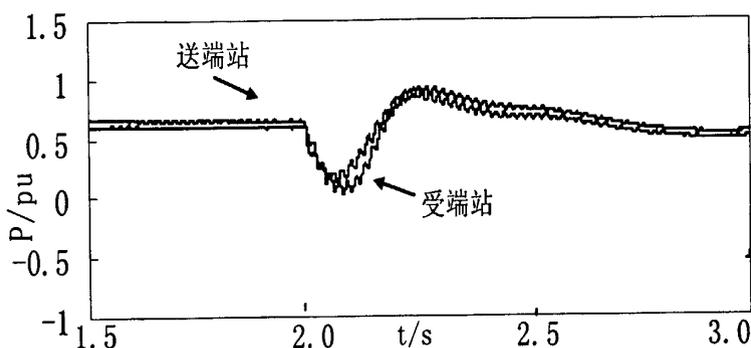
PSCAD / EMTDC 的是一套广泛应用于世界各地的电力系统电磁暂态仿真优秀软件。Dennis Woodford 博士 1976 年在加拿大 Manitoba 水电局完成了 PSCAD/EMTDC 软件的首次开发工作, PSCADE/MTDC 的开发成功, 使复杂的电力系统建模和仿真的变得非常简单, 只须要程序提供的标准模块就能够快速的建模。用户可以方便地使用 EMTDC 进行电力系统分析研究, 使电力系统复杂部分可视化成为可能。此程序可作为实时数字仿真器的前置端, 还提供与 Matlab 等通用仿真程序以及 C 语言的接口, 增强了程序的扩展功能。PSCAD / EMTDC 仿真软件由两个主要部分组成, 其中是 PSCAD/EMTDC 仿真的核心是 EMTDC(Electro-Magnetic Transient program for DC), 离线的电磁暂态计算程序, 可以进行精确的进行仿真系统元件建模、方便的人机交互输入模式和强大的数据分析功能, 满足电力系统分析和工程研究。自问世以来, 完善的性能和不断发展的新功能得到广泛的推广;另一部分是 PSCAD, 即软件的图形用户界面, 能够完成需要的研究系统网络图的构建、系统精确仿真运行和结果分析等任务。PSCAD 和 EMTDC 完美结合, 简化了电力工程系统建模的过程, 并且修改、纠错都十分方便, 使用户可以在一个图形环境下构造自己仿真系统, 简化了处理运行仿真和数据分析研究时间, 提高了系统仿真工作的质量和效率。进行电力系统频域和时域的系统建模仿真是软件 PSCAD/EMTDC 的基本应用方向, 通常该软件应用在计算电力系统参数变化或遭受扰动时仿真分析电气参数随时间变化的规律。同时 PSCAD/EMTDC 软件能方便应用于直流输电仿真研究, FACTS 控制器的设计仿真, 电力系统谐波分析研究以及电力电子领域的仿真计算等。以 PSCAD/MTDC 程序为平台的直流输电数字仿真系统是分析是研究直流输电系统和交直流相互影响等问题的有力工具。

2.4.2 仿真分析

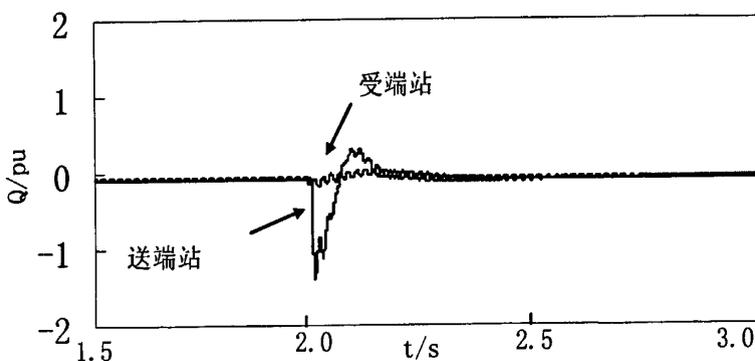
为验证上述并网拓扑结构及其控制方案的有效性, 利用 PSCAD/EMTC 仿真平台建立一个采用如图 2-16 所示, 基于 VSC-HVDC 风电场并网仿真系统, 其中, VSC-HVDC 系统的参数依照 CIGRE 基准的 HVDC 系统建立, 受端站使用了定无功功率和电流电压解耦控制, 送端站使用了功率解耦控制。为了研究仿真的目的, 4 台双馈式感应发电机组成风电场系统仿真^[49], 交流系统基准电压为 10kV, 基准容量为 80MVA。VSC-HVDC 参数为: 换流站的额定容量设定为 100MVA, 换流变压器容量设定为 100MVA, 直流额定电压设定 24kV, 换流变压器漏电抗设定为 0.1pu, 交流侧电阻设定为 0.02pu, 交流滤波器容量设定为 0.6Mvar, 交流系统额定频率设定为 50Hz, SPWM 载波频率设定为 1650Hz。



(a) 两端交流系统的有效电压



(b) 两端交流系统的有功



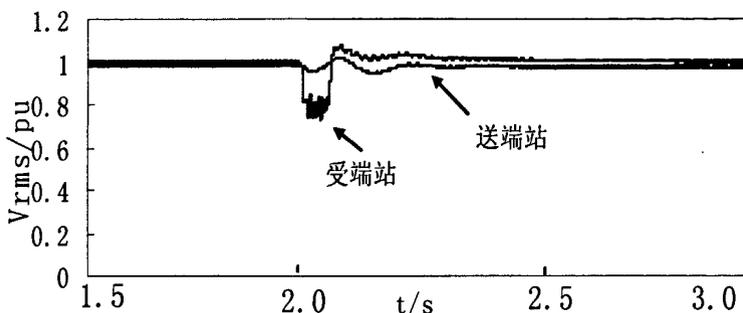
(c) 两端交流系统的无功

图 2-18 送端站侧故障风电场并网仿真波形

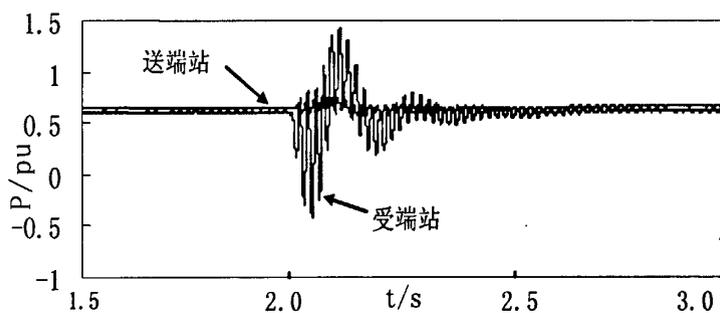
系统在 $t=2s$ 时刻送端站侧设置单相接地故障，且持续时间为 $0.05s$ 。由图 2-18 可见，当风电场输出有功功率大幅下降时，要从电网系统吸收大量的无功来维持系统的稳定，由式 (2-37) 可知，电压和无功的变化成正比，电压和无功功率在送端站有很大的变动，因 VSC-HVDC 有交直流故障隔离功能，在受端站侧的波动很小。同时，在电网系统中有功功率保持平衡，两端输入、输出有功功率的变动几乎相等。故障清除后，经过 $0.35s$ 后，系统基本达到稳定。

同样，在受端站侧设置同样接地故障。仿真如图 2-19 所示，并且受端站侧输

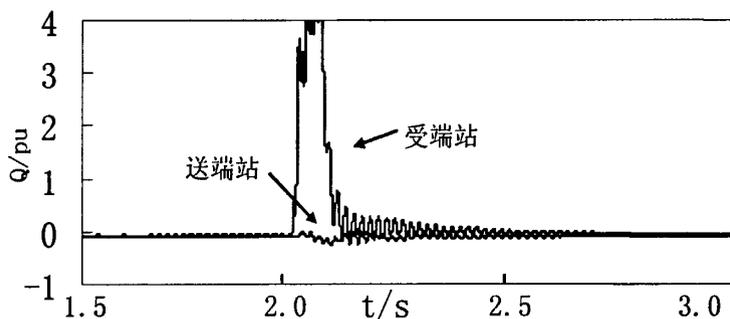
出数据的变化由电网系统补充, 对送端站侧也几乎没有影响。



(a) 两端交流系统的有效电压



(b) 两端交流系统的有功



(c) 两端交流系统的无功

图 2-19 受端站侧故障风电场并网仿真波形

由以上分析可知, 风电场的 VSC-HVDC 并网系统具有良好的抗干扰性能和动态响应速度。因 VSC-HVDC 连接并网可以隔离交直流系统, 有助于保护克服风电波动及故障对电网供电的不利影响, 甚至跨越电网短时短路等故障。

2.5 小结

本章给出了基于的 VSC-HVDC 稳态模型和暂态模型, 并设计了用于风电场并网的 VSC-HVDC 控制系统, 并在电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 中进行了实现仿真验证。并分别验证了换流站附近发生短路故障时。从仿真结果来看, 基于 VSC-HVDC 风电场并网系统能较好地抑制电压波动, 能有效地将风电场与电网进行了“隔离”,

对于提高电网稳定性也有重要意义。为大型风电场的并网传输提供灵活的解决方案，改善了风电场并网的电压质量问题，将在风电并网传输方面发挥越来越重要的作用。

第 3 章 VSC-HVDC 的非线性主控制器设计

在外部扰动影响下传统的 PID 控制器极易失稳, 很难适应直流输电系统这样的复杂的非线性系统。本文采用关系度数学方法进行了一个非线性控制器控制设计, 该控制器能满足系统的动态性能, 将非线性控制理论领域中的新研究成果与电力系统动态学有机系统的结合起来, 建立基于 VSC-HVDC 风电并网系统非线性控制器。该控制器包括对两个电压源换流站, 一个应用在风力发电场一侧对电能进行整流, 主要控制直流电压和风电场输出或吸收的无功功率来调整控制器, 另一个电网侧换流站按照电网系统要求对电能进行逆变, 主要采用有功功率和无功功率控制。在 PSCAD/EMTDC 软件上仿真了这个非线性控制器的性能, 并与常规控制器相比较。

3.1 非线性系统的数学描述

一般一个非线性系统能够采用如下微分方程描述:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u, t) \\ y(t) = h(x, u, t) \end{cases} \quad (3-1)$$

式中: $y \in R^q$ 为输出向量; $u \in R^p$ 为输入向量; $x \in R^n$ 为状态向量; 相应维数的向量函数为 $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$, 式 (3-1) 中两个式子分别称为系统的状态方程和系统的输出方程。这里整数个系统的实际输出并不仅仅指输出 y , 经常包含一部分状态的测量信号。在讨论输出反馈控制时更是如此。如式 (3-1) 描述的非线性系统 H , 我们总假定系统的状态 $x(t)$ 可由初值 x_0 和输入函数 $u(t)$ 唯一地确定。至于何时系统满足这一假定, 现有的文献讨论较多, 这里就不再多说了。

3.2 关系度方法及其稳定性分析

对于一个系统输出 $y(t)$, 假设它的某一阶导数 $y^{(k)}(t)$ (k 为非负整数) 可以被控制量 μ 进行直接控制, 即:

$$y^{(k)}(t) = f(u, M, t) \quad (3-2)$$

式中: M 是可以测量的向量。

假设函数 f 满足以下条件: 如 μ 能取遍 $(-\infty, \infty)$, 则 f 也能同时取遍 $(-\infty, \infty)$, 则 μ 可以间接控制 $y^{(i)}(t)$ ($i=0, 1, 2, \dots, k-1$), 称输出 $y(t)$ 与控制量 μ 的关系度记为 k , 即 $R(y, u) = k$ 。如果记:

$$Z = [z_0 \ z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{k-1}]^T = [y(t) \ y^{(1)}(t) \ y^{(2)}(t) \ \dots \ y^{(k-1)}(t)]^T,$$

$$\text{则有: } \begin{cases} \dot{z}_0 = z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_{k-1} = v \end{cases} \quad (3-3)$$

$$v = f(M, u, t) \quad (3-4)$$

式(3-3)称为近似线性系统(伪线性系统),应用线性系统理论加以分析论证,可以求出 Z 渐近稳定的虚拟控制量 v , 真实控制量 u 可以通过式(3-4)解出。两个量的关系度可以使用李导数法求出^[49]。若 $R(y, u) = 0$, 即 $y(t) = f(M, u, t)$, 那么令 $f(M, u, t) = 0$, 可以求出 $y(t)$ 在任一时刻等于 0 的控制规律 u 。若 $R(y, u) > 0$ 则不可能求出使 $y(t)$ 在任意时刻等于 0 的控制规律, 因为 $R(y, u) > 0$ 显示有延迟环节存在, 这样只能找出使 $y(t)$ 渐近趋近于 0 的控制规律 u 。同微分几何和逆系统等分析方法相对比, 关系度分析方法推导过程明晰, 同时物理意义简单。

系统的稳定性是实现任何控制目标的前提。不要求 Z 的维数和原非线性系统的维数相同是非线性坐标变换方法和关系度方法的主要区别。根据理论上分析应用, 当原非线性系统的维数和 Z 的维数不相同, 采用的变换不在是一个同胚变换, 所得出控制规律使变换后 Z 的系统渐近稳定, 也表示原非线性系统中有 k (k 为 Z 的维数)个渐近稳定的状态变量, 一般状况下, 其余状态变量的稳定又由这 k 个渐近稳定的状态变量来决定^[50]。为了保持设计的严密性和可行性, 本章采用零动态^[51]方法进行了稳定性分析来完成。

3.3 基于非线性控制器的 VSC-HVDC 技术研究

3.3.1 系统的基本模型

如图2-1所示, 设左侧换流站为送端站, 右侧换流站为受端站, 相应的物理量分别用下标“1”和“2”表示。三相VSC模型可用dq0坐标系下的如下方程来描述:

$$\begin{cases} \dot{i}_{dq1} = -(R_1 / L_1) i_{dq1} + \omega_1 i_{qg1} + u_{d1} \\ \dot{i}_{qg1} = -(R_1 / L_1) i_{qg1} - \omega_1 i_{dg1} + u_{q1} \\ P_{g1} = \frac{3}{2} (u_{dg1} i_{dg1} + u_{qg1} i_{qg1}) \\ Q_{g1} = \frac{3}{2} (u_{qg1} i_{dg1} - u_{dg1} i_{qg1}) \\ P_{c1} = \frac{3}{2} (u_{dc1} i_{dg1} + u_{qc1} i_{qg1}) \end{cases} \quad (3-5)$$

$$\text{式中: } u_{d1} = \frac{u_{dg1} - u_{dc1}}{L_1}, u_{q1} = \frac{u_{dq1} - u_{dc1}}{L_1}, \omega_1 = \frac{d\theta_{v1}}{dt}$$

其中, d_g 和 q_g 分别为电网变量是正交分量。 dc 和 qc 控制是直接的转换器的正交分量变量。 ω_1 整流器电压矢量角速度。 θ_v 为电压矢量位置。 R_1 和 L_1 是整流器等效电阻和电抗。下标 g 和 c 分别表示电网侧, 换流器侧。下标 1 表示整流器。

在三相电网电压平衡条件下, 取电网电压矢量 U (U_s 为电网电压空间矢量的模值) 的方向为 d 轴方向, $u_{dg1} = U_{g1}, u_{qg1} = 0$ 。则同样可以得到逆变器侧方程式如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_{dg2} = -(R_2/L_2)i_{dg2} + \omega_2 i_{qg2} + u_{d2} \\ \dot{i}_{qg2} = -(R_2/L_2)i_{qg2} - \omega_1 i_{dg2} + u_{q2} \\ P_{g2} = \frac{3}{2}(u_{dg2}i_{dg2} + u_{qg2}i_{qg2}) \\ Q_{g2} = \frac{3}{2}(u_{qg2}i_{dg2} - u_{dg2}i_{qg2}) \\ P_{c2} = \frac{3}{2}(u_{dc2}i_{dg2} + u_{qc2}i_{qg2}) \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\text{式中: } u_{d2} = \frac{u_{dg2} - u_{dc1}}{L_2}, u_{q2} = \frac{u_{dq2} - u_{dc2}}{L_2}, \omega_2 = \frac{d\theta_{v2}}{dt}$$

3.3.2 基于 VSC-HVDC 非线性控制系统

A 整流站的非线性控制器的设计

传统的 PI 型控制方案, 通过控制 U_{DC1} 和 Q_{g1} 来改变有功无功功率电流成分 i_{dg1} 和 i_{qg1} 实现控制功能。然而, 任何 i_{dg1} 瞬态变化将导致不需要的在 i_{qg1} 同时发生变化, 反之亦然。这是它们之间现有的耦合关系, 该模型方程(式(3-5))。该耦合使控制回路的控制方案的 PI 控制是高度互动性。因此, 本节对整流站采用 U_{DC1}^2 和 Q_{g1} 的解耦控制器的设计来保证 U_{DC1}^2 和 Q_{g1} 独立控制。一个非线性状态向量的定义是:

$$[z_1 \ z_2 \ z_3]^T = [U_{DC1}^2 \ U_{DC1}^2/dt \ Q_{g1}]^T \quad (3-7)$$

式中 z_1 、 z_2 和 z_3 有下式得, 有式 (3-5) 代入 (3-7) 得下式:

$$\begin{cases} z_1 = U_{DC1}^2 \\ z_2 = \frac{3}{C_1} [(U_{g1} - R_1 i_{dg1}) i_{dg1} - R_1 i_{qg1}^2] - \frac{2}{C_1} U_{g1} i_{dc1} \\ z_3 = Q_{g1} \end{cases} \quad (3-8)$$

该控制系统的输入 u_{dc1} 和 u_{qc1} 有公式 (3-8) 得到, 对式 (3-8) 进行变换运算可以推导出:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = k_v u_{dc1} + T_v \\ \dot{z}_3 = k_{Q1} u_{qc1} + T_{Q1} \end{cases} \quad (3-9)$$

式中：

$$\begin{aligned} k_v &= \frac{6R_1}{L_1 C_1} i_{dg1} - \frac{3}{L_1 C_1} U_{g1} \\ T_v &= \frac{6R_1^2}{L_1 C_1} i_{dg1}^2 + \frac{2}{C_1} \omega_1 i_{dg1} i_{qg1} + \frac{3}{L_1 C_1} U_{g1}^2 \\ &\quad - \frac{6R_1}{L_1 C_1} P_{g1} - \frac{6R_1}{C_1} i_{qg1} i_{qg1} - \frac{2}{C_1} (U_{DC1} i_{DC1} + U_{DC1} + i_{DC1}) \\ k_{Q1} &= -\frac{3}{2L_1} U_{g1} \\ T_{Q1} &= -\omega_1 P_{g1} - \frac{R_1}{L_1} Q_{g1} + \frac{3}{2} U_{g1} i_{qg1} \end{aligned}$$

为了实现控制系统解耦，整流器参考电压 u_{dc1} 和 u_{qc1} 可由如下公式得到：

$$\begin{cases} u_{dc1} = \frac{1}{k_v} \left(k_1 e_1 + k_2 e_1 + z_2 - T_v \right) \\ u_{qc1} = \frac{1}{k_{Q1}} \left(k_3 e_3 + z_3 - T_{Q1} \right) \end{cases} \quad (3-10)$$

式中： $e_1 = z_1^* - z_1, e_3 = z_3^* - z_3$

*表示参考值， k_1, k_2 和 k_3 为控制系统系数

把式 (3-10) 代入式 (3-9)，整理可得整流侧误差模型如下表示：

$$\ddot{e}_1 + k_2 \dot{e}_1 + k_1 e_1 = 0; \ddot{e}_3 + k_3 e_3 = 0 \quad (3-11)$$

由式 中可以看到该系统误差模型有两个解耦的子系统组成。 k_1, k_2 和 k_3 为整流器动态性能的控制参数。整流器非线性控制器的详细结构图如图 3-1 所示：

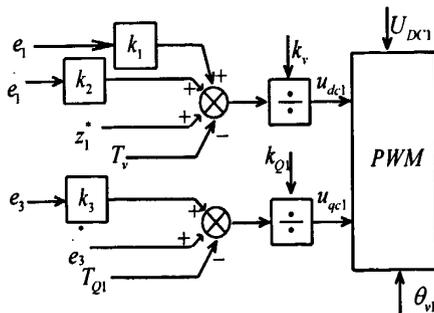


图 3-1 整流器非线性控制结构图

B 逆变器非线性控制器设计

在逆变器侧使用有功功率 P_{g2} 和无功功率 Q_{g2} 控制策略。同整流站控制器设计相类似，非线性状态向量被选择为：

$$[y_1 \ y_2]^T = [P_{g2} \ Q_{g2}]^T \quad (3-12)$$

式中： y_1 和 y_2 是状态函数。

把式 (3-6) 代入 (3-12) 并求导可得公式如下：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = k_{P2} u_{dc2} + T_{P2} \\ \dot{y}_2 = k_{Q2} u_{qc2} + T_{Q2} \end{cases} \quad (3-13)$$

式中：

$$\begin{aligned} k_{P2} &= -\frac{3}{2L_2} U_{g2} \\ T_{P2} &= \omega_2 Q_{g2} - \frac{R_2}{L_2} P_{g2} + \frac{3}{2L_2} U_{g2}^2 + \frac{3}{2} U_{g2} i_{dg2} \\ k_{Q2} &= -\frac{2}{2L_2} U_{g2} \\ T_{Q2} &= -\omega_2 P_{g2} - \frac{R_2}{L_2} Q_{g2} + \frac{3}{2} U_{g2} i_{qg2} \end{aligned}$$

逆变器参考电压 u_{dc2} 和 u_{qc2} 可由如下公式得到：

$$\begin{cases} u_{dc2} = \frac{1}{k_{P2}} (k_4 e_4 + \dot{y}_1 - T_{P2}) \\ u_{qc2} = \frac{1}{k_{Q2}} (k_5 e_5 + \dot{y}_2 - T_{Q2}) \end{cases} \quad (3-15)$$

式中： $e_4 = y_1^* - y_1, e_5 = y_2^* - y_2$ ， k_4 和 k_5 为控制系统系数。

把式 (3-15) 代入式 (3-14) 可得：

$$e_4 + k_4 e_4 = 0; e_5 + k_5 e_5 = 0 \quad (3-16)$$

可见此系统是线性和一阶，可得以下控制系统图。

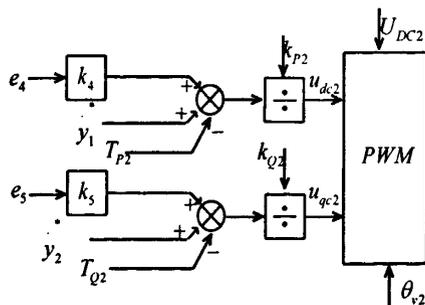


图 3-2 逆变器非线性控制结构图

从以上叙述可以看到在换流站控制策略设计中同时可以实现过电流保护。这种设计可以限制电流的突变。当测量电流值变动超过一定的数值时,参考电压就设置的一个相反的改变速度保证系统的稳定运行。

C 传统 PI 控制系统

由第 2 章分析,很容易写出传统 PI 控制应用在变流器控制图,如图 3-3 所示,对系统过流保护通常采用电流和功率相结合的控制类型,图 3-3.a 为整流侧换流站的直流电压和无功功率控制系统图,图 3-3.b 为逆变侧换流站的有功功率和无功功率控制系统图。

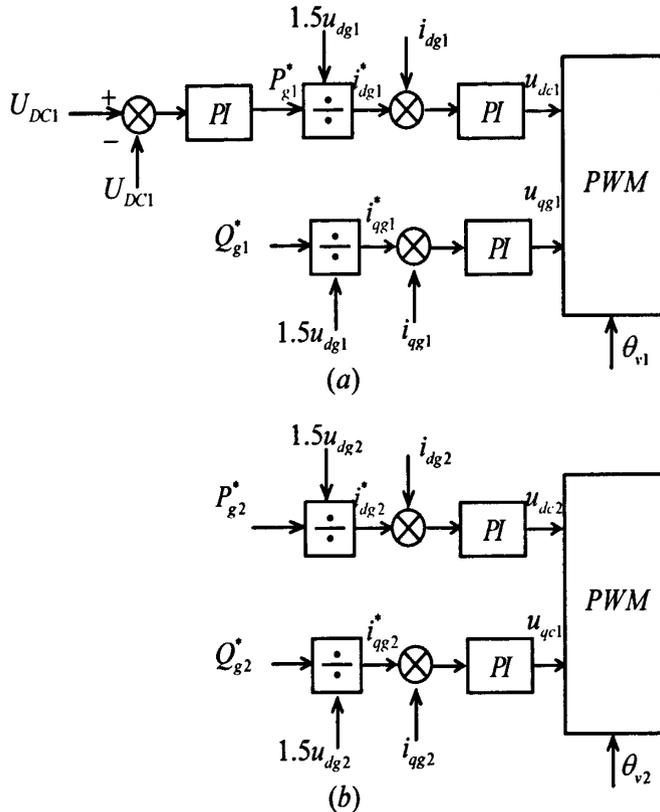


图 3-3 传统 PI 控制系统图

3.4 仿真研究

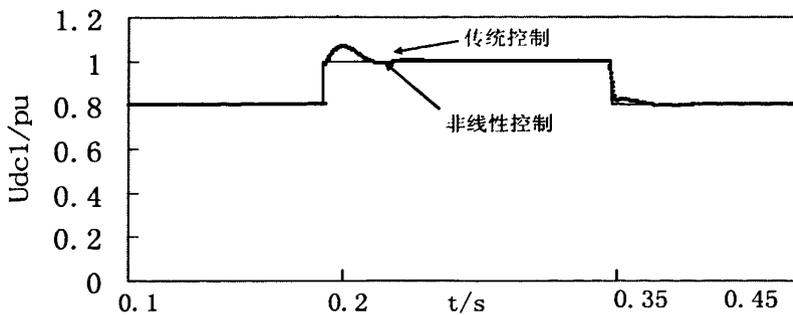
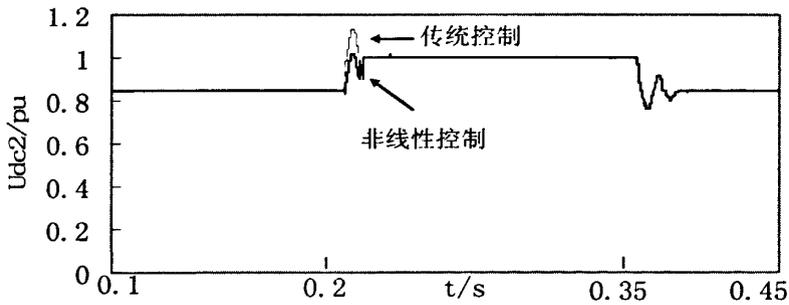
VSC-HVDC 系统的仿真,系统依照图 2-15 所示,按照以上讨论的控制系统策略在 PSCAD/EMTDE 软件中建立模型和仿真,在 VSC 使用全控 IGBT/Diode 通用整流桥,正弦型 PWM 调制控制输出电压依据着控制系统的输入 u_{dc1} 和 u_{qc1} 以及 u_{dc2} 和 u_{qc2} ,详细控制方法见图 3-1、3-2。系统的参数和控制器增益列于表 1,系统研究了不同的条件下系统的动态响应,并且把非线性系统仿真曲线与常规 PI 控制器仿真曲线进行对比。

表 3-1 系统参数

电网电压	10kv
$R_1=R_2$, 阻抗	0.002 Ω
$L_1=L_2$ 感抗	2mH
$C_1=C_2$, 直流线路电容	200 μF
R_c , 直流线路阻值	3.7 Ω
L_c 直流线路电感	27mH
C_c 直流线路电容	34 μF
换流器容量	10MVA
非线性控制参数 $k_1=1200, k_2=5000, k_3=5000,$ $k_4=3000, k_5=6000$	

A 直流电流阶跃实验

对于此系统的直流线路电流阶跃实验如图所示，并给了非线性控制和常规控制两种进行比较。在实验中，整流器和逆变器的输入的参考值分别为： $U_{DC1}^* = 10KV, Q_{g1}^* = -1MVAR, Q_{g2}^* = -1MVAR$ 和 $P_{g2}^* = -10MW$ 。在时间为 0.2s 是，参考直流电压 U_{DC1}^* 上升到 24KV，持续时间为 0.15s 后，在时间为 0.35s 恢复原有的状态。有仿真图可以看到，非线性控制优于普通控制，减少了直流电压的波动，解耦了有功功率和无功功率。



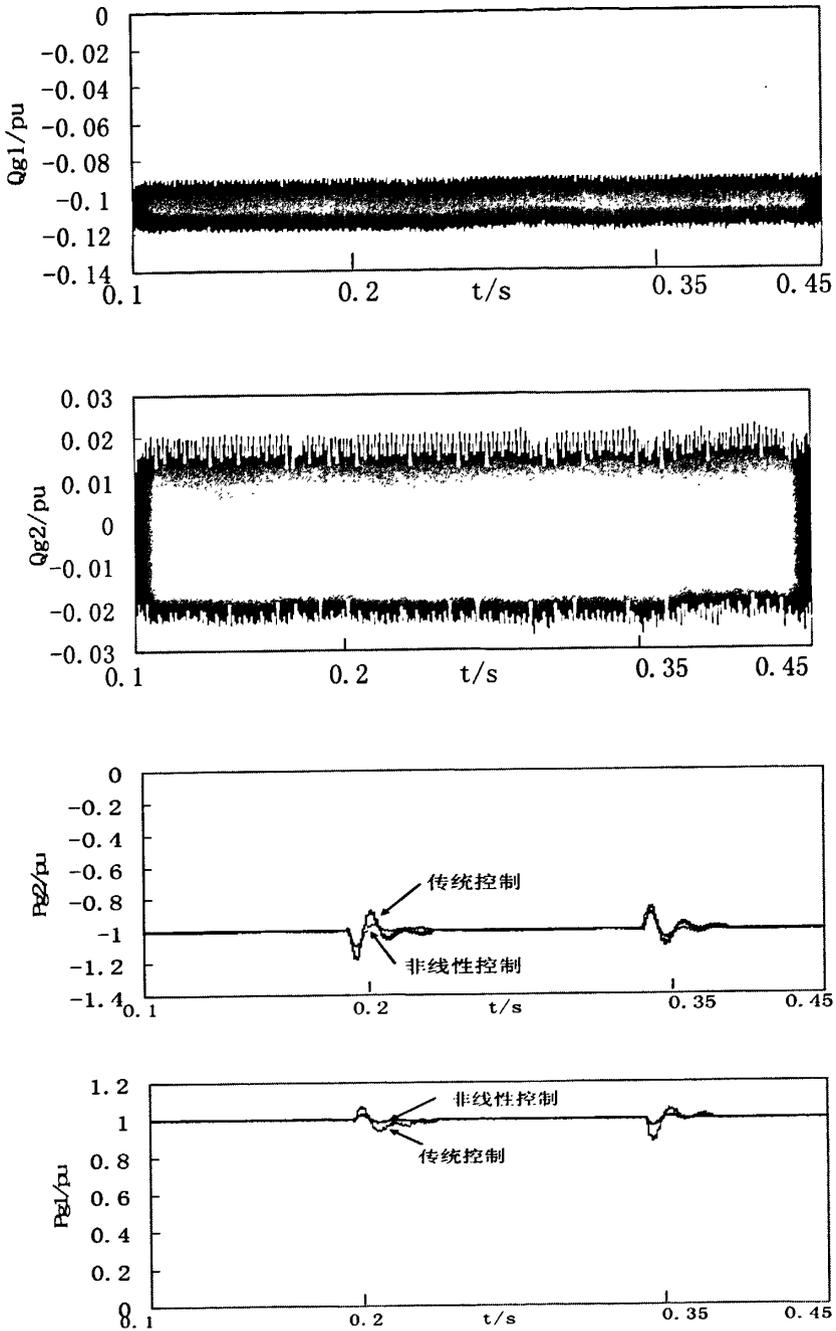
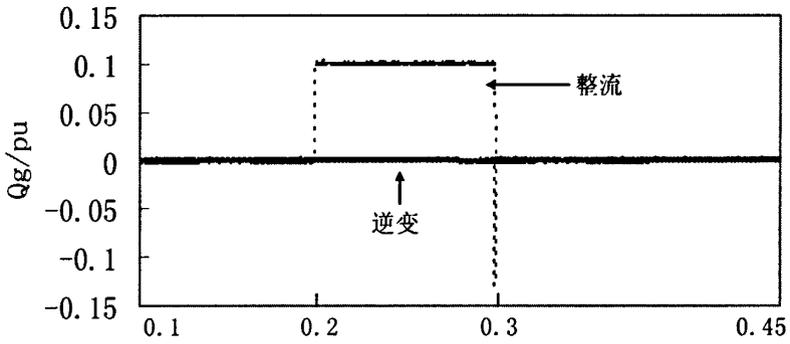
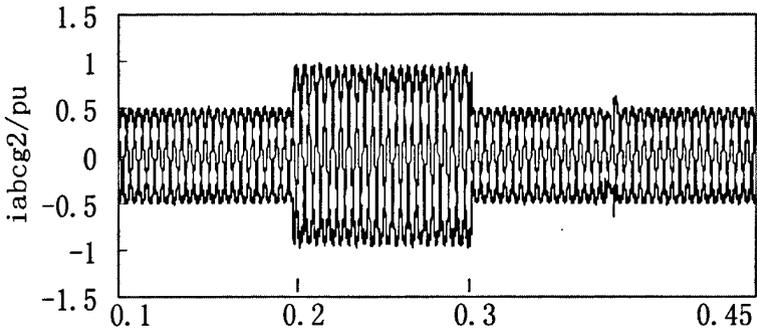
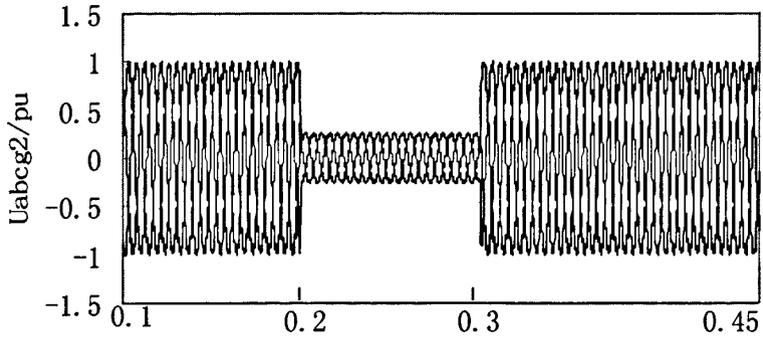


图 3-4 直流电流阶跃实验仿真

B 风电场输出电压对直流线路的影响

设置风电场电压是在 $0.8pu$, 持续时间为 $0.1s$, 系统参考输入参数分别为: $U_{DC1}^* = 10KV$, $Q_{g1}^* = -1MVAR$, $Q_{g2}^* = -1MVAR$ 和 $P_{g2}^* = 10MW$. 电压在 $0.2s$ 是发生突变, 并在 $0.3s$ 恢复到原来正常情况下, 整流器限制电流设置为 $1500A$. 仿真结果如图所示. 从图上可以看到, 最高电压仅仅有 20% 的变动, 这样可以减少风电场功率的变化影响系统输出电压的变化。



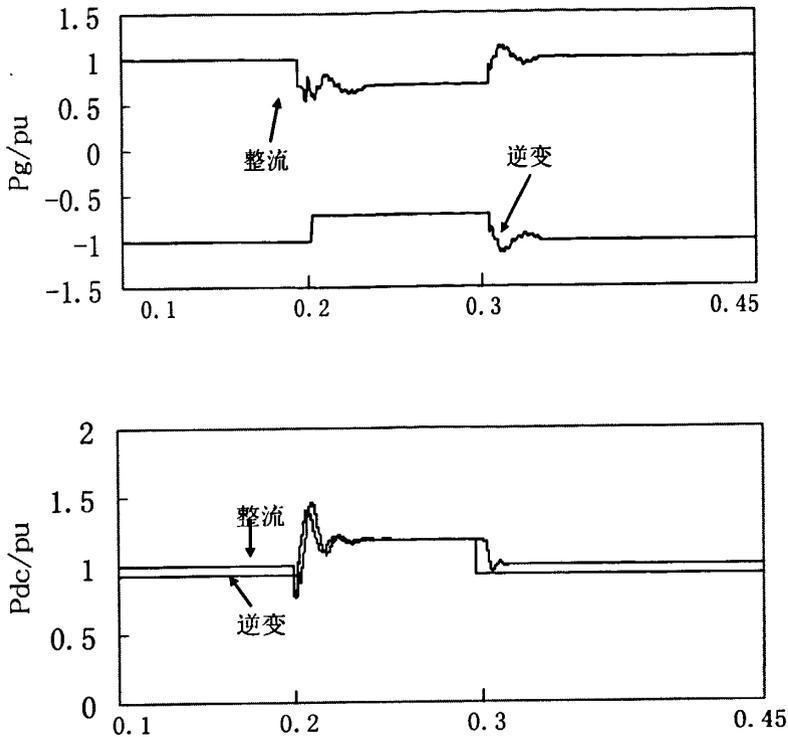


图 3-5 风电场侧交流电压闪变

从仿真结果可以得出结论，基于 VSC-HVDC 风电场并网在非线性控制器作用下保持了很好的恒定，隔离了风电场故障对电网系统的影响，可见在本文所设计的非稳态控制器作用下满足风电场并网需要，此方法是可行的。

3.5 小结

本章详细的阐述了借助关系度方法基本原理，将非线性控制理论领域中的新研究成果与电力系统动态学有机系统的结合 VSC-HVDC 的特性，设计了直流电压和功率解耦的非线性控制器控制，通过仿真满足系统并网需要，采用 PSCAD/EMTDC 软件仿真基于 VSC-HVDC 风电并网系统在主控制器的仿真，结果证明该控制器可以有效的提升系统稳定，保证并网系统在安全范围内运行。

第4章 换流站智能控制器的设计

本章首先分析了神经网络控制器的基本原理和电力系统控制的特点,设计了RBF-PID控制器的控制直流电流,本章研究同时使用了PSCAD与MATLAB混合仿真的方法。PSCAD具有精确的电力系统模型元件,缺少MATLAB那样强大的函数计算分析功能。而MATLAB/Simulink的电力系统的模型仿真数据不具有PSCAD模型仿真的专业认可度。因此,通过PSCAD/MATLAB接口,采用PSCAD建模,MATLAB执行算法,取长补短,充分发挥了二者的优点。

4.1 RBF-ANN的PID控制器研究

VSC-HVDC系统具有高度可控性,换流器的控制是整个系统控制的核心,传统的控制器都是在以微分和积分为工具的精确模型之上建立起来,在通常情况下他们有一定的适应性和鲁棒性。但对于实际的非线性、时变性的交直流混合输电的系统来说,很难保证系统在任何运行方式下都能正常运行。人工智能是近年发展迅速的一门控制技术,在处理模型的不确定性、高度非线性方面具有很大的优势,具有很强的自组织、自适应和自学习功能。当其用于非线性系统控制时,不需要控制对象的精确模型,且具有很强的自适应能力和鲁棒性,较好地兼顾了系统的动态性能和稳态性能要求。

综合比例-积分-微分调节器(PID)控制器调节迅速和神经网络控制器自适应能力较强的优点,将神经网络与常规PID调节器控制思想相结合。本节使用了RBF-ANN与传统PID控制器相结合的设计方案^[45-46]。

4.1.1 RBF网络的结构

通常从连接方式来看,人工神经网络有前馈型网络和反馈型网络两类主要模型。从学习的观点看,前馈网络(包括BP网络、RBF网络等)是一种较强的学习系统,可以进行复杂的非线性处理。其中径向基函数(RBF)神经网络就是一种性能良好的前馈型网络,由于它模拟了人脑中局部调整,相互覆盖接收域的神经网络结构,不仅适合于多变量函数逼近,而且还具有唯一最佳逼近点的优点,已证明它能以任意精度逼近任一连续函数^[31]。

Broomhead和Lowe以及Moody和Darken首次到神经网络的设计中应用径向基函数(RBF)。它是到固定点的距离为自变量的函数,通常距离函数在二维欧式空间里可表示为:

$$r_k = r_k(x, y, x^{(k)}, y^{(k)}) = \sqrt{(x - x^{(k)})^2 + (y - y^{(k)})^2} \quad (4-1)$$

其中:欧氏空间中的任意点为 (x, y) ,第 k 个固定点为 $(x^{(k)}, y^{(k)})$ 。以此类推到高维空间的定义为:以距离 r_k 为自变量的函数 $\varphi^{(k)}(r_k)$ 称为径向基函数,固定点

$(x^{(k)}, y^{(k)})$ 称为径向基函数 $\varphi^{(k)}$ 的中心。RBF 网络的隐单元采用的变换函数是径向基函数。径向基函数神经网络是具有单隐含层的三层前馈网络，模拟了人脑中局部调整，是一种局部逼近的神经网络，采用 RBF 网络适合于实时控制的要求，大大加快学习速度并避免局部极小问题，可有效提高系统的精度和自适应性。网络结构如图 4-1。

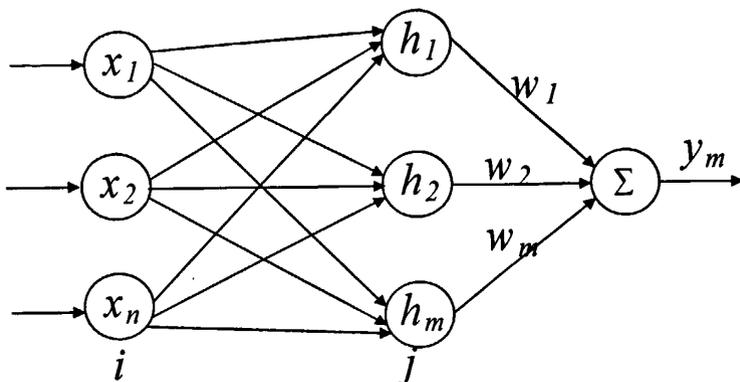


图 4-1 RBF 网络结构简图

在 RBF 网络结构中， $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量。设 RBF 神经网络隐含层节点径向基向量 $H = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_m]^T$ 。其中 h_j 为高斯基函数：

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4-2)$$

RBF 神经网络隐含层第 j 个节点的中心矢量为 $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}, \dots, c_{jm}]^T$ 。设 RBF 神经网络隐含层节点基宽向量为 $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ ，隐含层节点 j 的基宽度参数为 b_j ，且为大于零的数。 $w = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_m]^T$ 是网络的权向量，辨识网络的输出为：

$$y_m = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m \quad (4-3)$$

目前 RBF 网络已经广泛应用于非线性函数逼近，时间序列分析，数据分类，信息处理，系统建模，图像处理，控制和故障诊断等。

4.1.2 被控对象 Jacobian 信息的辨识算法

NNI 参数调整是指以 RBF 网络作为辨识器对参数的调整。设第 k 时刻被辨识系统的理论输出为 $y(k)$ ，辨识网络的输出为 $y_m(k)$ ，因此，辨识器的性能指标函数可如下式所示：

$$J_1 = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2 \quad (4-4)$$

依据梯度下降法可得出输出权、节点基宽参数和节点中心的迭代算法如下式所示：

输出权 w_j 算法：

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta(y(k) - y_m(k))h_j + \alpha(w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (4-5)$$

节点基宽参数 b_j 算法：

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta \Delta b_j + a(b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (4-6)$$

节点基宽变化量 Δb_j 算法:

$$\Delta b_j = (y(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{\|X - C_j\|}{b_j^3} \quad (4-7)$$

节点中心变化量 Δc_{ji} 算法:

$$\Delta c_{ji} = (y(k) - y_m(k)) w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \quad (4-8)$$

节点中心 c_{ji} 算法:

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + a(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (4-9)$$

式中, η 为学习速率, a 为动量因子。

4.1.3 PID 控制器参数整定

采用增量式PID控制器,以电流控制为例,控制误差为:

$$error(k) = rin(k) - y(k) \quad (4-10)$$

PID三项输入为:

$$\begin{cases} xc(1) = error(k) - error(k-1) \\ xc(2) = error(k) \\ xc(3) = error(k) - 2error(k-1) + error(k-2) \end{cases} \quad (4-11)$$

控制算法为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4-12)$$

$$\Delta u(k) = k_p * xc(1) + k_i * xc(2) + k_d * xc(3) \quad (4-13)$$

神经网络整定指标为:

$$E(k) = \frac{1}{2} error(k)^2 \quad (4-14)$$

有梯度下降法, k_p, k_i, k_d 的调整量为:

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(1) \\ \Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(2) \\ \Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(3) \end{cases} \quad (4-15)$$

式中:对象的输出与控制输入变化的灵敏度,即被控对象的Jacobian信息为

$\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 。可以通过RBF神经网络进行在线辨识得到,算法如下:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{ji} - x_j}{b_j^2} \quad (4-16)$$

式中： $x_1 = \Delta u(k)$

该神经网络采用2-3-1网络结构。为了仿真方便，对VSC-HVDC系统进行了简化建模^[47-50]，控制系统图如图4-2所示。

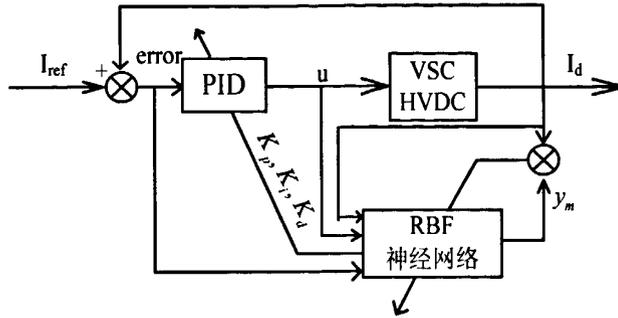


图 4-2 RBF 网络整定 PID 控制框图

图中 I_{dref} 为整流侧直流电流的整定值， I_{ref} 为整流侧神经网络控制输入参考值； ΔI 为整流侧直流电压误差。则辨识器的性能指标函数为： $J_1 = 0.5(y(k) - I_d(k))^2$ ，增量式PID控制器控制误差为 $error(k) = I_{ref}(k) - I_d(t)$ ，RBF神经网络通过学习，输出 K_p, K_i, K_d ，在线调整PID参数（主程序见附录B）。

4.2 换流站控制系统研究仿真

在电磁暂态仿真工具PSCAD/EMTDC建立以CIGRE HVDC标准仿真模型，因RBF网络的控制算法较复杂，通过接口程序调用S函数实现系统的RBF网络的PID调整的控制仿真，S函数通过对数据的初始化和指令信号、采集数据的输入，实现了RBF-PID控制器的参数在线调整，实现了系统的仿真。PSCAD/EMTDC内有一个Fortran文件DSDYN，它可以调用外部Fortran子程序来启动MATLAB数据引擎，同时把含有MATLAB命令的M文件传送到MATLAB数据引擎中，发挥MATLAB强大的数据处理功能对数据进行处理，这样就可以依据PSCAD/EMTDC中的电力系统模型和MATLAB中的控制算法得到控制分析结果，基本接口模块运行流程如图4-3所示，这样利用接口模块PSCAD/EMTDC与MATLAB就可紧密地结合起来进行混合仿真。如图4-4所示为RBF-PID控制器接口模块^[51]。

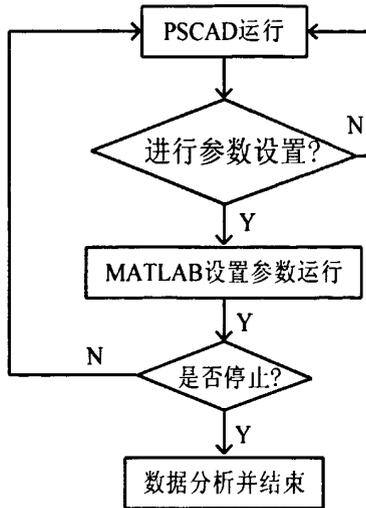


图 4-3 基本接口模块运行流程

本章仿真同时使用了PSCAD与MATLAB两种仿真软件，采用PSCAD建模，MATLAB执行算法，取长补短，充分发挥了二者的优点。

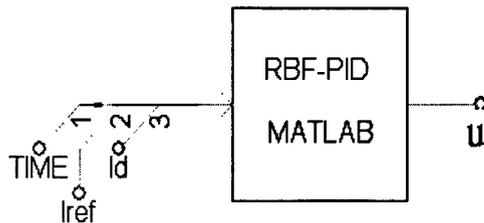


图 4-4 建立的 RBF-PID 接口模块图

在这里， I_d 和 I_{ref} 分别为直流电流实际值与直流电流期望值。S网络函数通过接口元件调用 I_d 和 I_{ref} ，根据其RBF网络计算出PID参数在线进行调整，通过这样的方式实现了对直流输电系统的控制，仿真得到的直流电流 I_d 启动、阶跃响应，如图4-5、4-6所示^[1、6、10]。

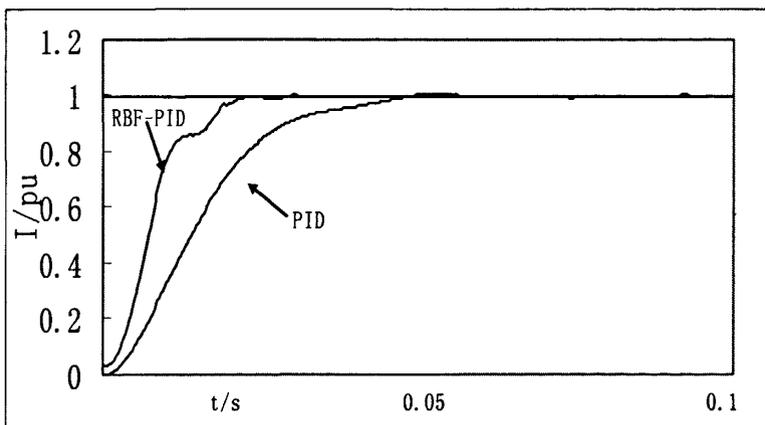


图 4-5 启动特性

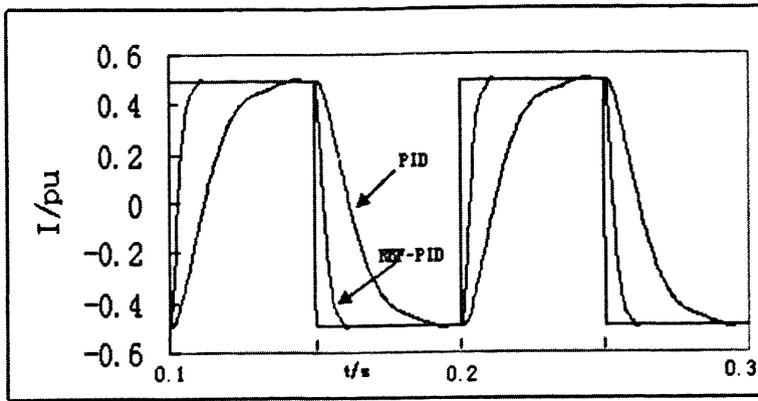


图 4-6 阶跃响应特性

在系统启动时,神经网络控制器通过输入的 I_d 和 I_{ref} 的关系,通过对神经网络的权值和PID参数进行学习调整学习,费时比较长并且稍微波动,如图4-5所示。通过对神经网络PID控制器的参数在线调整学习,电流整定值阶跃响应特性如图4-6所示,可见通过RBF-PID直流电流控制器实现VSC-HVDC系统的控制,不需要控制系统精确的数学模型,通过在线调整学习,获得了良好的响应特性,满足了系统的动态过程控制,保证了控制系统的稳定性。

4.3 小结

由以上分析可见:基于 RBF 算法神经网络在线调整 PID 控制器参数的算法结构简单,既含有静态特性,同时有包含有动态特性的多层前向神经网络。此控制器具有自学习和自适应的特性,非常适合于控制非线性对象和复杂控制系统,对于在控制工况条件下扰动较大的系统,也有高性能的控制效果。此控制方法只需粗略给出 PID 控制器参数,控制系统的依靠神经网络寻优调整算法对 PID 参数进行在线调整,解决传统控制方法中控制参数确定困难等问题,克服由 PID 控制参数整定不准给系统带来的不良影响。通过以上采用 RBF 算法神经网络 PID 控制器研究仿真,该控制方法对直流输电系统进行控制能保证系统的稳定性。并且基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制器有超调量小、鲁棒性和适应性好的特点,正是由于它简单清晰的结构使其拥有了较好的动态性能,在实际应用中也将更具可行性。证明了这种结构简单的控制器能够满足系统控制的要求。

结论与展望

大规模风电场并网在发出有功功率的同时要吸收部分无功功率,在电网较弱或大规模风电并网时可能产生电压稳定问题。VSC-HVDC 凭借其显著的技术特点,解决风电场的电压稳定问题和隔离故障上具有很好的作用和广阔的应用的前景,并成为目前研究的热点。

本文主要研究了以下几个方面的内容:

首先,本文分析风力发电的发展趋势和意义,通过对高压直流输电发展过程进行了描述并对各个阶段性能进行比较分析,并叙述了基于 VSC-HVDC 风电场并网的特点和研究现状,针对上述问题选定进一步提出本文研究内容。

第 2 章分析了基于的 VSC-HVDC 稳态模型和暂态模型,论述了并网风电场引起系统电压波动的原因,使用无功功率控制器来制约电压波动来提高并网电压质量,通过 PSCAD/EMTDC 建立了仿真模型,验证了基于 VSC-HVDC 风电场并网系统能较好地抑制电压波动, VSC-HVDC 有效地将风电场与电网进行了“隔离”,对于提高电网稳定性也有重要意义。为大型风电场的并网传输提供灵活的解决方案,改善了风电场并网的电压质量问题,将在风电并网传输方面发挥越来越重要的作用。

第 3 章详细的阐述了借助关系度方法基本原理,将非线性控制理论领域中的新研究成果与电力系统动态学有机系统的结合 VSC-HVDC 的特性,设计了直流电压和功率解耦的非线性控制器控制,采用 PSCAD/EMTDC 软件仿真基于 VSC-HVDC 风电并网系统在主控制器的仿真,结果证明该控制器可以有效的保持系统稳定,保证并网系统在一个满意、安全范围内运行。

最后,考虑实际风电并网的非线性、时变性的特性以及实际系统模型难确定,传统的控制系统很难保证在任何运行方式下系统都能正常运行。使用了 RBF 神经网络 PID 控制器控制换流站,该控制方法只需给出粗略的 PID 控制参数,系统的性能依靠神经网络寻优调整,从而可解决传统 PID 控制方法中控制参数确定困难等问题,并且克服由 PID 控制参数整定不准给系统带来的不良影响,该控制方法对直流输电系统进行控制能保证系统的稳定性。并且基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制器有超调量小、鲁棒性和适应性好的特点,正是由于它简单清晰的结构使其拥有了较好的动态性能,在实际应用中也将更具可行性。仿真验证了这种结构简单的控制器能够满足系统控制的要求。

本文只是对基于 VSC-HVDC 风电场控制技术的理论研究和一些仿真分析,有时为了仿真的简便,对实际的系统进行了简化,与实际的并网系统难免会有一些偏差。因此,今后应该建立实际的系统硬件模型进行实验,并与仿真结果进行对比分析,来确定基于 VSC-HVDC 风电场并网系统的最终控制方法的策略。

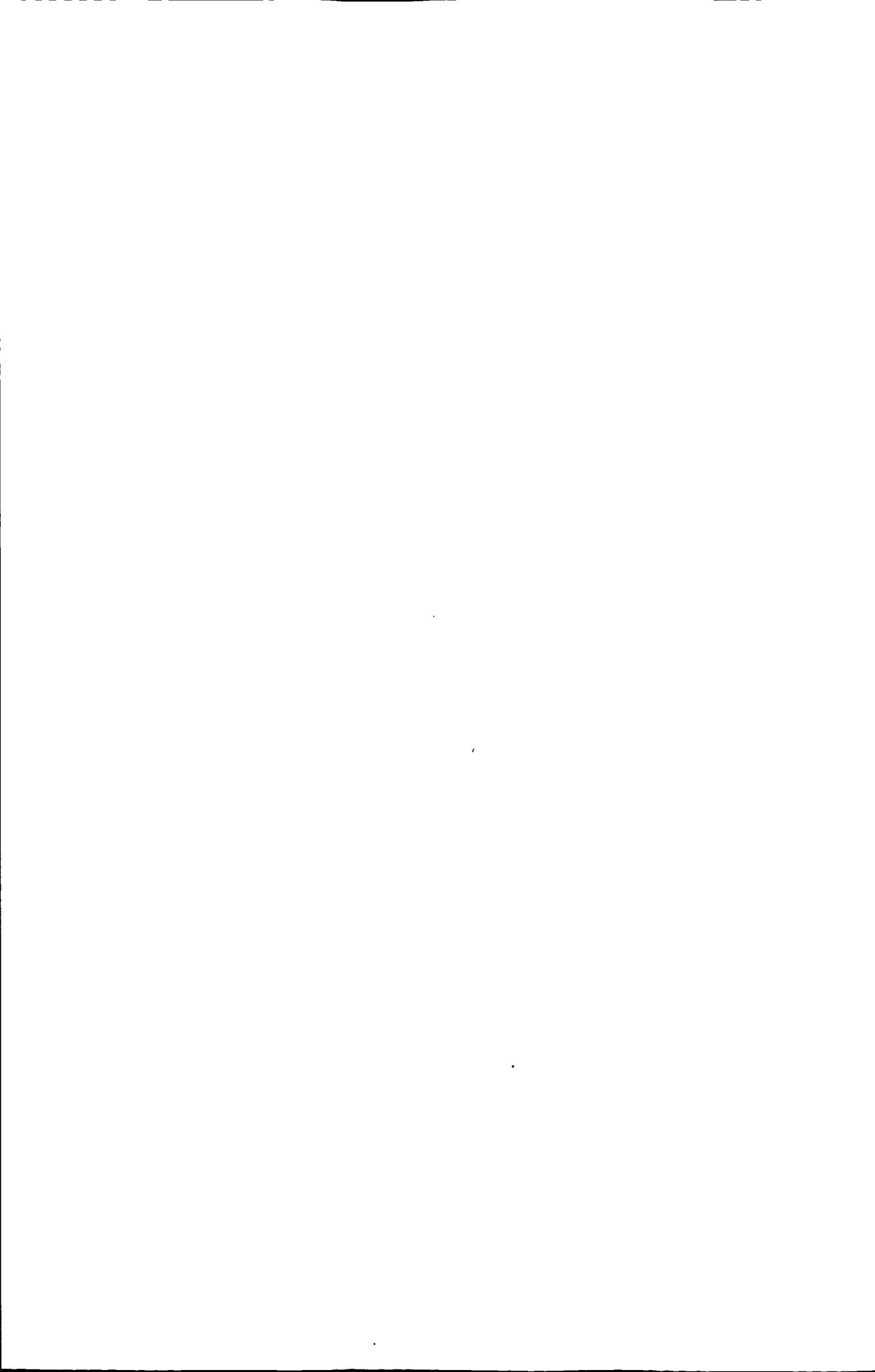
参考文献

- [1] 施鹏飞. 从世界发展趋势展望我国风力发电前景. 中国电力, 2003, 36(9): 54-62.
- [2] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
- [3] T.Ackermann, "Wind Power in Power System", John Wiley & Sons.Ltd, 2005.
- [4] S. Bozhko, G. M. Asher, J. C. Clare, L. Yao, C. Sasse, "Grid frequency control design for offshore wind farms with naturally commutated HVDC link connection " IEEE ISIE conference. Montrael, pp. 1595-1600, July 2006
- [5] 薛桁, 朱瑞兆. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 25-28.
- [6] 中国国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划. 2007
- [7] SOBRINKKH K, SORENSEN L, CRISTENSEN, et al. DC feeder for connection of a wind farm [A]. CIGRE Symposium[C]. Kuala Lumpur, Malaysia, 1999.
- [8] SOBRINKK, SORENSEN L. Feasibility study regarding integration of the 160 MW wind farm using VSC transmission [A]. CIGRE[C].2001.
- [9] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电—新一代HVDC技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [10] 徐政 交直流电力系统动态行为分析 机械工业出版社 2004
- [11] Vijay, K. Sood "HVDC and FACTS Controllers" Kluwer power electronics and power editions series, 2004.
- [12] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输输电. 北京: 水利 电力出版社, 1985.
- [13] High Voltage Direct Current Transmission, 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, J. Arrillaga, 1998, ISBN 0-85296-941-4.
- [14] SOBRINKK K H K, SORENSENPL, Feasibility study regarding integration of the 160MW wind farm using VSC transmission[A].CIGRE (C) .2001.
- [15] 韩晓民 文俊 徐永海 高压直流输电原理与运行
- [16] 张桂斌. 新型直流输电及其相关技术 (博士学位论文). 浙江大学, 2001.
- [17] Nojtaba Noroozian, Abdel-Aty Edris, David Kidd, etal. The potential use of voltage sourced converter based back-to-back tie in load restoration [J].IEEE trans on power delivery, 2003, 18(4):1416-1421.
- [18] 李庚银, 吕鹏飞等. 轻型高压直流输电技术的发展和展望. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.
- [19] Kjell Eriksson, Christer Liljegren, Kent Sobrink. HVDC Light experiences

- applicable for Power transmission from offshore wind Power Parks [C].
[Http://library.abb.com](http://library.abb.com).
- [20] K.Eriksson, P.Halvarsson, D.Wensky. System approach on designing an offshore WindPower grid connection [J].
- [21] Ana Diez Castro, Rickard Ellstrom, Ying Jiang Hafner, et al. Co-ordination of Parallel AC-DC system for optimum Performance[C].Power delivery conference, Madrid, SPain, Sep, 1999.
- [22] Urban Axelsson, Anders Holm, Christer Liljegren, et al. Gotland HVDC Light transmission-world's first commercial small scale DC transmission[C].Cired Conference in Nice, France, May 1999.
- [23] Gunar Asplund. HVDC using voltage source converters-A new way to build highly controllable and compact HVDC substation [C].Cigre SC 23 Symposium, Paris, France, Aug27-Sept2, 2000.
- [24] U Axelsson, A Holm, C Liljegren, et al. The Gotland HVDC Light Project-experience from trialand and commercial operation[C].GIRED conference, Amsterdam, Netherlands, June 18-21,2001.
- [25] Kent H Sobrink, Peter Christensen, Kjell Eriksson, et al. DC feeder for connection of a wind farm[C].Cigre Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, SeP.1999.
- [26] Ann-Karin Skytt, Per Holmberg, Lars-Erik Juhlin. HVDC-Light for connection of wind farm[C]. Second International Workshop on Transmission Network for offshore wind farm Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, Mareh29-30, 2001.
- [27] Nils Horle, Kjell Erisson, Asmund Maeland, et al. Electrical supply for offshore installations made Possible by use of VSC technology[C]. Cigre 2002 conference, Paris, Aug2002.
- [28] Kjell Eriksson, Ove Trollerz. Small scale transmission to AC networks by HVDC-Light[C].12th Cepsi conference, pattaya, Thailand, November 1998.
- [29] 刘静 轻型直流输电建模及其在风力发电中的应用46sc3dk8 华北电力大学(北京) 硕士论文 2008-12-18.
- [30] WeixingLu, Boon Teek Ooi. Optimal Acquisition and Aggregation of Offshore wind Power by Multjterminal Voltage-Source HVDC[C], IEEE Trans.on Power Delivery, 2003, 18(1):201-206.
- [31] Poul Soensen, AneaD.Hansen, Florin lov, et al. Wind farm models and control strategies Riso National Laoratory[C], Roskilde, Denmark, August, 2005.
- [32] Kent Sobrink, Dennis Woodford, Regine Belhomme. AC cable versus dc cabletransmission for offshore windfarms, a study case[C]. Proceedings of

- Fourth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Denmark, October 2003.
- [33] Aishling Reidy, Rick Waston. Comparison of VSC based HVDC and HVAC Inter-connection to a Large Offshore Wind Farm [R]. Technology report support by IRCSET, 2005.
- [34] Lidong Zhang, Lennart Harnfors, et al. Power System Reliability and Capability Improvement by HVDC. Security and Reliability of Electric Power Systems [C], CIGRE Region Meeting, 2007.
- [35] 李庚银, 吕鹏飞等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4):77-81.
- [36] 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(1): 17-22
- [37] 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]. 中国电力科学研究院博士论文, 北京, 2006.
- [38] 何国庆, 基于电压源换流器的高压直流输电技术在风电场并网中的应用研究中国电力科学研究院硕士论文 2008-03-01
- [39] 魏晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究[D]. 中国电力科学研究院博士论文, 北京, 2007.
- [40] Larsson A. Flicker emission of wind turbines during continuous operation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1):114-118.
- [41] Ladakakos DP, Ioannides G M, Koulouvari I M, Assessment of wind turbines impact on the Power quality of autonomous weak grids. Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, 1998:900-905
- [42] Ake Larsson. Flicker emission of wind turbines caused by switch operations. IEEE Transactions on energy conversion, Vol.17, No.1, March 2002. PP: 119-123.
- [43] 闫景信, 轻型直流输电在城市电网中的应用研究 华北电力大学(北京) 硕士论文 2008-01.
- [44] 张桂芝(译). 海外风力发电现状及对电力系统的影响. 风力发电. 2001年第3期:17-31.
- [45] HARTMANE J, KEELERJD, KOWALSKIJM. Layered neural networks with gaussian hidden units as universal approximations Neural Compute, 1990, 2:210-215.
- [46] CHENS, COWANCFN, GRANTPM. Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks [J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1991, 2(2): 302-309.

- [47] Nasser Taheri*, Mohamad Reza Banaei A Supplementary Neural Controller for Novel Modeling of VSC HVDC to Enhance Dynamic Stability in a Power System. 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference 1999
- [48] Shamsollahi.P, Malik.O.P: “Application of neural adaptive power system stabilizer in a multi-machine power system” . IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.14, No.3,1999 , pp.731-736.
- [49] Shamsollahi.P, Malik, O.P: “Real-time Implementation and Experimental Studies of a Neural Adaptive Power System Stabilizer” , IEEE Trans On energy conversion, Vol.14,1999,pp.737-742.
- [50] Liu.w, Venayagamoorthy.G, Wunsch.D: “Adaptive Neural Network based Power System Stabilizer Design” , IEEE, Neural networks,Proceeding of the international joint conference,Vol.4, pp. 2970-2975.
- [51] PSCAD Users Guide Version 4. 2. 0 [CP / CD] .
- [52] 徐政; 陈海荣; 电压源换流器型直流输电技术综述 高电压技术 2007-01-31.
- [53] 孔令云; 杜颖; 电压源换流器型直流输电在风电场并网中的应用 - 科技信息- 2010-11-05.
- [54] 陈海荣, 交流系统故障时VSC-HVDC系统的控制与保护策略研究 浙江大学博士论文 2007-01-01.



致 谢

本论文的主要工作是在我的导师包广清教授的悉心指导和亲切关怀下完成的，包老师以其高度的敬业精神、严谨求实的治学态度、孜孜以求、兢兢业业的工作作风和大胆创新的进取研究精神对我的学习和生活产生了深刻影响。她开阔的视野、渊博的知识和敏锐的思维给了我深远的影响。留下了深刻的印象，在此衷心感谢研究生学习期间包老师对我的指导和关心，恩师情谊铭记在心。

同实验室的师兄马威和师姐任艳峰，以及同学刘胜文，在研究生期间生活和学习给予了极大的帮助，在此表示衷心的感谢，同时向所有在本人完成本论文查阅的参考文献以及被引用论文的作者表示谢意。

另外也感谢家人对我学习的理解和支持，尤其是我的父母亲，他们的支持使我能够在学校专心完成我的学业。

最后，向评审和评议本文以及参加论文答辩的专家学者，老师们致以崇高的谢意。

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

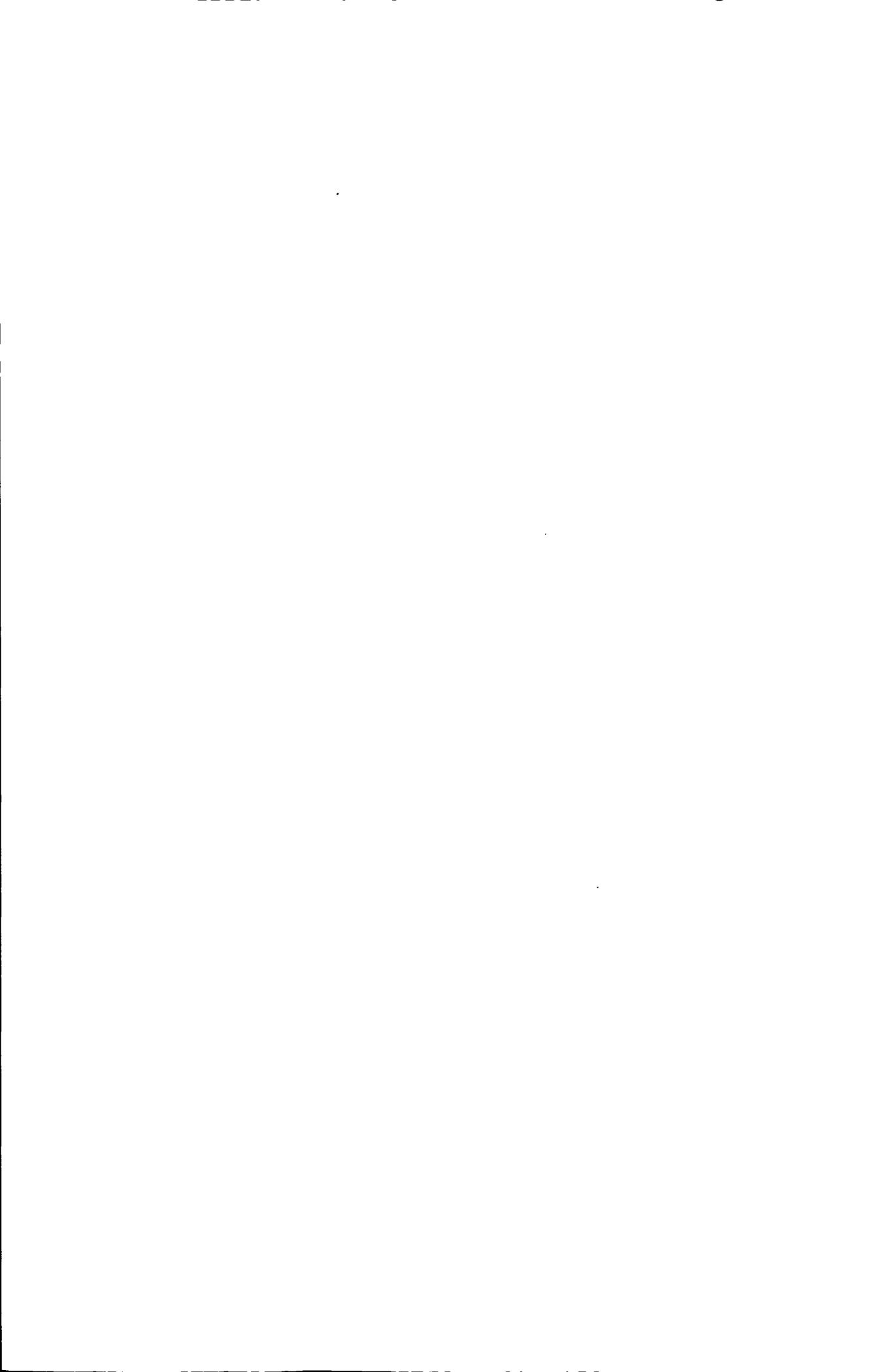
- 1 Zhang Jie Bao Guangqing Voltage Stability Improvement For Large Wind Farms Connection Based On VSC-HVDC. the 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2011), WuHan, China, March, 28-31,2011. (EI 收录) .

附录 B RBF-PID 控制器算法主程序

```

function [u]=test3(in)
persistent xite alfa belte x ci bi w h ci_1 ci_3 ci_2 bi_1
persistent bi_2 bi_3 w_1 w_2 w_3
persistent u_1 y_1 xc error_1 error_2 error kp ki kd kp_1 ki_1 kd_1
persistent xitekp xitek d xiteki kp0 ki0 kd0 errori
if in(1)==0
xite=1.105;
alfa=0.05;
belte=0.01;
x=[0,0,0]';
ci=30*ones(3,6);
bi=40*ones(6,1);
w=10*ones(6,1);
h=[0,0,0,0,0,0]';
ci_1=ci;ci_3=ci_1;ci_2=ci_1;
bi_1=bi;bi_2=bi_1;bi_3=bi_2;
w_1=w;w_2=w_1;w_3=w_1;
u_1=0;y_1=0;
xc=[0,0,0]';
error_1=0;error_2=0;error=0;
kp0=0.75;
ki0=0.023;
kd0=0.03;
kp_1=kp0;
kd_1=kd0;
ki_1=ki0;
xitekp=0.10;
xitek d=0.20;
xiteki=0.20;
end
ts=0.001;
rin=in(2);

```



```

yout=in(3);
for j=1:1:6
    h(j)=exp(-norm(x-ci(:,j))^2/(2*bi(j)*bi(j)));
end
ymout=w'*h
d_w=0*w;
for j=1:1:6
    d_w(j)=xite*(yout-ymout)*h(j);
end
w=w_1+d_w+alfa*(w_1-w_2)+belte*(w_2-w_3);
d_bi=0*bi;
for j=1:1:6
    d_bi(j)=xite*(yout-ymout)*w(j)*h(j)*(bi(j)^-3)*norm(x-ci(:,j))^2;
end
bi=bi_1+d_bi+alfa*(bi_1-bi_2)+belte*(bi_2-bi_3);
for j=1:1:6
    for i=1:1:3
        d_ci(i,j)=xite*(yout-ymout)*w(j)*(x(i)-ci(i,j))*(bi(j)^-2);
    end
end
ci=ci_1+d_ci+alfa*(ci_1-ci_2)+belte*(ci_2-ci_3);
yu=0;
for j=1:1:6
    yu=yu+w(j)*h(j)*(-x(1)+ci(1,j))/bi(j)^2;
end
dyout=yu;
error=rin-yout;
kp=kp_1+xitekp*error*dyout*xc(1)
kd=kd_1+xitek*error*dyout*xc(2)
ki=ki_1+xiteki*error*dyout*xc(3)
if kp<0
    kp=0;
end
if kd<0
    kd=0;

```



```

end
if ki<0
    ki=0;
end
du=kp*xc(1)+kd*xc(2)+ki*xc(3)
u=u_1+du
x(1)=du;
x(2)=yout;
x(3)=y_1;
u_1=u;
y_1=yout;
ci_3=ci_2;
ci_2=ci_1;
ci_1=ci;
bi_3=bi_2;
bi_2=bi_1;
bi_1=bi;
w_3=w_2;
w_2=w_1;
w_1=w;
xc(1)=error-error_1;
xc(2)=error-2*error_1+error_2;
xc(3)=error;
error_2=error_1;
error_1=error;
kp_1=kp;
kd_1=kd;
ki_1=ki;
end

```

