

华北电力大学

专业硕士学位论文

弱支撑的新能源直流外送系统暂态过电压 协调抑制策略研究

**Research on Transient Overvoltage Coordinated
Suppression Strategy for Weakly Supported New
Energy DC Transmission Systems**

左优

2024 年 5 月

国内图书分类号：TM723

国际图书分类号：621.3

学校代码：10079

密 级：公开

专业硕士学位论文

弱支撑的新能源直流外送系统暂态过电压 协调抑制策略研究

硕 士 研 究 生： 左 优

导 师： 刘崇茹教授

企 业 导 师： 李振动

申 请 学 位： 能源动力硕士

专 业 领 域： 电气工程

培 养 方 式： 全日制

所 在 学 院： 电气与电子工程学院

答 辩 日 期： 2024 年 5 月

授予学位单位： 华北电力大学

Classified Index: TM723

U.D.C: 621.3

Thesis for the Professional Master's Degree

Research on Transient Overvoltage Coordinated Suppression Strategy for Weakly Supported New Energy DC Transmission Systems

Candidate:	Zuo You
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Enterprise Mentor:	Li Zhendong
Professional Degree Applied for:	Master of Energy and Power Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
Cultivation Ways:	Full-time
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2024
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

随着高压直流输电技术和新能源发电技术的快速发展,我国电力系统“强直弱交”现象日益凸显,主要表现为“沙漠、戈壁、荒漠”地区新能源在直流近区集中接入且远离交流主网。这导致直流送端新能源基地电网强度较弱,直流系统换相失败导致的暂态过电压问题会严重加剧,而严重的过电压会引起新能源高压脱网,影响新能源消纳,威胁电力系统的安全稳定运行。针对上述问题,本文提出了考虑多设备响应特性的直流弱送端暂态过电压协调抑制策略,取得了如下三方面研究成果:

首先,从换相失败机理出发,揭示了换相失败后直流弱送端暂态过电压的时间尺度和空间尺度特性;从时间滞后特性角度和电压调节特性角度,着重分析了直流控制系统、无功补偿设备和交流避雷器对暂态过电压的调节特性,详细阐述了现有暂态过电压抑制方法的优缺点。

其次,提出了基于低残压避雷器的直流弱送端暂态过电压快速抑制方法。基于直流弱送端暂态过电压抑制要求,分析了抑制送端暂态过电压的能量耗散需求;针对暂态过电压时间短、速度快、峰值高的特性,采用避雷器作为抑制设备,考虑到普通避雷器难以满足能量耗散需求,提出了基于抑制需求的低残压避雷器参数设计方法,分析了低残压避雷器接入后对系统的影响,并基于CIGRE-HVDC标准算例验证了方法的正确性。

最后,提出了一种考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制策略。描述了直流送端电压可控资源的分布情况,在第三章的基础上,提出了基于“整流站-新能源汇集点-新能源场站”的多设备响应特性的暂态过电压协调抑制策略。此外,基于PSCAD-MATLAB联合调用方式,搭建我国某特高压直流示范工程,在三种不同工况下进行仿真验证,结果表明,所提策略能够有效抑制换相失败后直流弱送端的暂态过电压问题,保障系统安全稳定运行。

关键词: 高压直流输电系统; 换相失败; 弱送端暂态过电压; 低残压避雷器; 协调抑制

Abstract

With the rapid development of high voltage direct current (HVDC) transmission projects and new energy generation technologies in China, the characteristics of "strong DC and weak AC" in the power system are becoming increasingly prominent. The main performance is that the new energy in the desert, Gobi and wilderness area is centralized access in the DC near area and away from the AC main network. The problem of transient overvoltage at the weak sending end caused by DC system commutation failure is aggravated. Severe overvoltage can lead to high-voltage disconnection of new energy at the sending end, affecting new energy consumption and threatening the safe and stable operation of the power system. Aiming at the above issue, this paper proposes a coordinated suppression strategy for transient overvoltage considering multiple devices, and mainly completes the following tasks:

Firstly, starting from the mechanism of commutation failure, the multiple spatiotemporal characteristics of transient overvoltage at the weak sending end of DC were revealed after commutation failure. From the perspective of time delay and voltage regulation characteristics, it focused on analyzing the regulation characteristics of DC control systems, reactive power compensation devices, and AC surge arresters on transient overvoltage, and elaborated on the advantages and disadvantages of existing transient overvoltage suppression methods.

Secondly, a rapid suppression method for transient overvoltage at the weak sending end of DC based on low residual voltage surge arresters was proposed. Based on the requirements for suppressing transient overvoltage at the weak sending end of DC, the energy dissipation demand for suppressing transient overvoltage at the sending end was analyzed. Considering the short duration, fast speed and high peak of transient overvoltage, arresters were used as suppression devices. Since conventional arresters might not meet the energy dissipation requirements, a parameter design method for low residual voltage surge arresters based on suppression requirements was proposed. The impact of low residual voltage surge arresters on the system after the installation was analyzed and the correctness of the method was verified based on the CIGRE-HVDC standard case.

Finally, considering that transient overvoltage can propagate through the sending-end grid, a coordinated suppression strategy based on multiple devices for transient overvoltage at the weak sending end was proposed. This chapter described the distribution of controllable voltage resources at the DC sending end. Based on chapter three, a coordinated suppression strategy for transient overvoltage was proposed based on the "rectifier station - point of new energy common coupling - new energy site" across multiple devices. Furthermore, the model was solved by using the joint calling algorithm

of PSCAD-MATLAB. Based on a certain UHVDC demonstration project in China, simulations were conducted under three different operating conditions. The results indicated that the proposed strategy effectively suppressed the transient overvoltage issue at the weak sending end after commutation failure, ensuring the safe and stable operation of the system.

Keywords: High-voltage transmission system, commutation failure, transient overvoltage at weak sending end, low residual voltage arrester, coordinated suppression strategy

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 暂态过电压产生机理.....	2
1.2.2 暂态过电压演化特性.....	3
1.2.3 暂态过电压的抑制策略.....	3
1.3 本文的主要工作.....	5
第 2 章 换相失败引起弱送端暂态过电压的特性分析	7
2.1 引言	7
2.2 换相失败引起弱送端暂态过电压的特性分析	7
2.2.1 换相失败机理.....	7
2.2.2 换相失败引起弱送端暂态过电压的时间尺度特性	8
2.2.3 换相失败引起弱送端暂态过电压的空间尺度特性	10
2.3 直流系统对暂态过电压的调节特性	12
2.3.1 定电流控制环节.....	12
2.3.2 低压限流环节.....	14
2.4 无功补偿设备对暂态过电压的调节特性	17
2.4.1 机械投切的电容器和电抗器组.....	18
2.4.2 静止无功补偿器(SVC)	18
2.4.3 同步调相机(SC).....	21
2.5 交流避雷器对暂态过电压的调节特性	24
2.6 本章小结.....	25
第 3 章 基于低残压避雷器的弱送端暂态过电压快速抑制方法	27
3.1 引言	27
3.2 避雷器的工作原理.....	27
3.3 基于低残压避雷器的弱送端过电压抑制方法	28
3.3.1 抑制弱送端暂态过电压的能量耗散需求分析	28
3.3.2 基于能量耗散需求的低残压避雷器参数设计	29
3.3.3 低残压避雷器接入后对系统的影响分析	31
3.4 仿真分析.....	32
3.4.1 低残压避雷器参数.....	32
3.4.2 系统运行特性对比分析.....	33
3.4.3 不同送端电网强度下的过电压抑制分析	35
3.5 本章小结.....	35

第 4 章 考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制策略37

4.1 引言37

4.2 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制框架37

4.2.1 直流送端电压可控资源分布.....37

4.2.2 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制框架38

4.3 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制策略40

4.3.1 整流站侧过电压协调抑制策略.....40

4.3.2 新能源汇集点侧过电压协调抑制策略43

4.3.3 新能源场站侧过电压协调抑制策略.....44

4.4 联合调用算法.....47

4.5 仿真分析.....48

4.5.1 仿真模型48

4.5.2 抑制策略对比分析49

4.5.3 抑制效果对比分析.....49

4.6 本章小结.....58

第 5 章 结论与展望60

5.1 结论60

5.2 展望.....60

参考文献.....62

第1章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

“十四五”以来,我国多次提出加快推进沙漠、戈壁、荒漠地区大型风电、光伏基地(以下称大基地)建设^[1-5]。大基地不同于常规新能源项目,其投资规模巨大,如库布齐沙漠鄂尔多斯中北部、鄂尔多斯南部、宁夏腾格里沙漠东南部等多个项目装机规模超千万千瓦级别^[6]。大基地所在的西北五省及内蒙古自治区的沙戈荒地区周边负荷较轻,新能源就地消纳难度大,需跨省、跨大区、跨大电网外送^[7];基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)技术使得电能远距离传输成为可能,因此,大容量、远距离、高比例新能源在直流近区集中接入的高压直流输电工程是我国电网未来发展的趋势之一^[8]。我国先后建设了“哈密-郑州”、“酒泉-湖南”、“宁东-浙江”、“青海-河南”等多条跨区、跨省特高压直流输电外送工程,将西北地区新能源远距离送至负荷中心^[9-11]。

LCC-HVDC 在正常运行过程中需要消耗其有功输送水平 40%~50%的无功功率,因此换流站内装设大量交流滤波器组,来满足直流系统对无功的需求^[12]。由于晶闸管存在的必然缺陷,换相失败(Commutation failure, CF)是 LCC-HVDC 系统最为常见的故障之一,并且难以避免^[13]。由于换相失败的持续时间为百毫秒级,导致直流系统电气量在短小时内发生剧烈变化^[14],主要表现为直流电流和触发角同时增大,使得整流器消耗的无功激增,直流送端出现低电压,动态无功补偿设备发出大量无功;而后随着直流系统的调控和故障的切除,触发角和直流电流快速减小,使得整流器的无功消耗随之降低,但整流站内大量交流滤波器难以及时切除,导致盈余的无功功率涌入送端交流系统,引起送端暂态过电压^[15]。

当过电压传导至新能源大基地时,大基地出现百毫秒级的 1.3p.u.以上的暂态过电压,可能对大基地内各类型绝缘设备产生影响,扰乱风机控制,更可能引发新能源脱网等危及电力系统安全稳定运行的严重问题,从而影响大基地新能源消纳^[16,17]。据文献报道,2014 年我国西北地区某高压直流故障,引发风场启动过压保护,多台风机因瞬时电压升高而脱网^[18]。

由于我国西北地区新能源大基地离交流主网较远,导致大基地电网强度较弱,其暂态过电压将更为严重^[19];同时换相失败后送端暂态过电压持续时间短、速度快^[20],上述情况均增大了暂态过电压的抑制难度。为了保障新能源大基地的安全稳定运行,提高大基地运行稳定性与抵御风险的能力,研究换相失败后弱送端暂态过电压特性及协调抑制策略具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

换相失败是 LCC-HVDC 系统最为常见并且无法避免的故障之一。在一个换相周期内,会有两个阀参与,当换相过程没有完成或某一个阀关断后在反向电压的作用下无法恢复阻断能力时,该阀上两端电压变为正,则该阀会重新导通,这种现象称之为换相失败^[21]。当直流系统发生换相失败时,直流系统各电气量发生剧烈波动,整流站消耗的无功大量减少,大量无功涌入送端交流系统,导致交流系统暂态过电压,针对该问题大量学者从暂态过电压的产生机理、演化特性、及抑制策略等展开研究。

1.2.1 暂态过电压产生机理

对于暂态过电压的产生机理而言,国内外学者已经开展了深入研究。文献[22]分析了换相失败引起直流送端交流电压升高的原理,在直流送端等值模型的基础上,推导了暂态电压升高的定量计算公式。文献[23]介绍了新能源接入高压直流系统的拓扑结构,分析了换相失败故障后,大规模新能源接入直流送端电网呈现出的暂态过电压机理及引发新能源连锁高压脱网事故的机理,再次基础上提出了单一故障和多故障集下基于多二元表的局部和全局暂态压升严重性指标。文献[24]推导了整流器消耗的无功功率与直流电压、直流电流之间的数学关系,提出了一种暂态过电压的计算方法,重点研究了三次暂态过电压产生的原因是整流器在换相失败期间内整流器消耗的无功功率迅速下降。文献[25]基于华北地区典型新能源汇集系统构建算例系统,建立数学模型进行定量研究,利用 RLC 电路全响应理论揭示了产生暂态过电压的根本原因,表明短路故障清楚后新能源汇集系统的电路固有谐振过程是导致暂态过电压的原因之一。

上述学者主要从理论方面对暂态过电压产生的机理进行了全面的研究,还有学者从实际工程出发展开研究。文献[26]基于 EMTDC 构建了某±800kV 特高压直流输电实际工程,重现了故障现场,研究了直流系统不同运行模式下换相失败导致的送端暂态过电压问题。文献[27]分析了当直流近区含有大量新能源机组时的暂态过电压原理,阐述了过电压引起新能源脱网的机理,并通过实际案例和仿真分析进行了验证。文献[28]研究了风火打捆的高压直流输电工程,从实际特高压直流工程出发,分析了高压直流换相失败导致风电机组过电压脱网的机理,并进行了仿真复现,但对于新能源近区缺乏常规电源支撑的场景需进一步研究。文献[29]以祁韶直流为例,开展大扰动后直流近区风机暂态压升实验测试,并于基于 PSASP 的仿真分析结果进行对比研究,分析了直流功率扰动引起风机暂态过电压的机理。

综上所述,国内外学者对换相失败后直流送端暂态过电压的产生机理已有明

确的理论分析,对缺乏常规电源支撑场景下暂态过电压的产生机理具有一定的参考价值。

1.2.2 暂态过电压演化特性

对于暂态过电压的演化特性而言,国内外学者已经开展了深入研究。文献[30]通过建立整流器消耗无功功率的数学表达式,推导了换相失败期间直流系统控制切换过程,得到了暂态过电压与无功功率之间的关系,表明了暂态电压随着时间演化呈现出“先下后上”的特征。文献[31]讨论了影响不同传输功率下送端电网暂态过电压的关键因素。文献[32]讨论了换相失败期间直流控制系统参数对暂态过电压的影响。文献[33]通过对送端交流系统进行等值,从理论上分析了暂态过电压的特性及其影响因素,并推导送端暂态电压的计算公式。

综上所述,暂态过电压的演化特性较为明确,但在缺乏常规电源支撑的场景下对于其时间尺度与空间尺度特性研究较少。同时,由于换相失败时间短、速度快,导致新能源机组暂态过电压变化速度快,且新能源机组控制逻辑“千机前面”,不利于抑制策略的制定,且对于不同设备和不同控制环节对暂态过电压的调节特性缺少系统分析。因此,对于暂态过电压的时空尺度特性、不同设备和控制环节对暂态过电压的调节特性还需深入研究。

1.2.3 暂态过电压的抑制策略

国内外对换相失败引起的送端暂态过电压抑制策略的研究已取得了显著的进展,对于暂态过电压的抑制策略,主要集中在三个方面:一是优化直流、风电场控制系统参数;二是引入辅助设备(如无功补偿设备和有功耗散设备);三是协调控制直流、风场和辅助设来抑制暂态过电压。

对于参数优化方面而言,主要包括对直流控制系统参数优化、对风电场控制系统参数优化以及直流、风场协调优化。现有研究表明对直流控制系统优化主要通过优化 VDCOL 环节、整流侧定电流控制环节以及逆变侧定关断角控制环节,其本质上都是使故障后直流电流更快恢复,使整流站消耗更多的无功,减小送端无功冗余,从而抑制暂态过电压。文献[34]分析了换相失败对相关电气量的影响,通过对逆变侧 VDCOL 控制的切换,提出一种换相失败后逆变侧的恒流控制方法,能够增加整流器在故障恢复期间吸收的无功功率,从而有效抑制暂态过电压。文献[35]针对传统比例积分电流控制的不足,提出一种基于预测直流电流变化趋势的动态参数控制方法,并结合低压限流控制环节参数优化,在一定程度上改善了送端交流系统暂态过电压现象。文献[36]结合考虑暂态过电压评估指标,定量分析直流控制参数对暂态过电压的影响,从而一种基于指标的控制参数优化方法。文献[37]采用智能算法对 PI 参数进行优化,对暂态过电压有一定的抑制作用。文

献[38]通过灵敏度分析探究了逆变侧关断角对整流站所消耗的无功功率的影响,并提出了一种基于调整控制目标的关断角补偿方法,该方法的原理是通过增加整流站对无功功率的消耗来抑制过电压峰值。综合现有研究可知,参数优化的本质是通过各种方法寻找最优的控制参数以加快直流电流的恢复速度,但直流自身对暂态过电压的调节范围受限,难以将较为严重的暂态过电压峰值限制在 1.3p.u.以下,同时由于直流电流恢复过快将增大逆变侧晶闸管的换相需求,换相失败发生的概率会进一步增大,对直流系统的暂稳态特性有一定的影响^[39]。

对于外加辅助设备而言,一方面利用无功补偿设备吸收送端冗余的大量无功功率,另一方面利用有功耗散设备对无法经直流传输的有功功率进行就地耗散。文献[40]通过研究静止无功补偿器(static var compensator, SVC)自身短路电流特性,得到其一定控制策略下的短路模型,结果表明,SVC 在系统故障时的接入点电压得到提高,改变网络短路电流特性,然而,由于 SVC 的无功输出与电压的平方成正比,系统电压大幅下降时,SVC 的无功输出急剧减小,引起无功不足,导致电压进一步下降,同时故障时 SVC 中的大电容与电网并联,导致系统等效阻抗增大,减小了交流系统短路容量,从而削弱了送端交流系统强度,加剧了过电压问题。文献[41]对大规模应用于风场的 SVC 进行了详尽分析,揭示了 SVC 所具有的“错位补偿”效应,同时强调在参数不当的情况下可能会助增暂态过电压。文献[42]分别建立 SVC 和 STATCOM 模型,对比在换相失败故障后其运行特性,表明 STATCOM 无功响应速度更快,对电压波动更为敏感。文献[43]将 STATCOM 接入整流侧交流母线,有效改善直流系统的暂态运行特性,抑制暂态过电压问题。文献[44]针对 STATCOM 在抑制过电压过程中存在助增暂态过电压的可能,研究了其响应滞后特性,提出了一种基于阻尼投切的优化策略,但该方法仅在 CIGRE-HVDC 标准模型下进行验证,其适应性依然未知。虽然无功补偿装置能够对冗余无功进行柔性负补偿,但部分无功补偿装置存在对电压的“反调”问题,会进一步恶化过电压。文献[45]对新型大容量调相机(synchronous compensator, SC)与 SVC、STATCOM 等进行了比较研究,证明新型调相机在动态无功支撑和暂态电压调节方面具有更强的性能,更加适合新能源经高压直流输电工程应用。无功补偿装置的研究现状表明,其对过电压的抑制效果显著,能保证直流系统、新能源场站的稳定运行,提高送端电网短路容量,但由于过电压时间短、速度快,无功补偿装置存在对过电压的反调问题,会进一步恶化过电压峰值,对电网造成严重影响。

避雷器作为一种消能装置,具有响应速度快、“0”控制需要的特点,具有广阔的应用前景。避雷器抑制过电压的原理很简单^[46],避雷器正常工作时处于断开状态,当作用在避雷器上的电压超过其保护值时,避雷器的电阻快速下降,将电

流泄放至地面，将过电压幅度限制在保护范围内^[47]。文献[48]提出了一种基于可控避雷器的暂态过电压抑制措施，但未将其应用于抑制换相失败引起的直流送端暂态过电压。文献[49]针对混合级联直流输电系统的暂态过电压问题，基于直流受端交流系统的暂态故障特性和能量耗散要求，提出了一种基于晶闸管避雷器的可控自恢复能量耗散装置来抑制直流过电压。文献[50]分析了高比例新能源经直流送出的暂态过电压机理，研究了可控避雷器抑制过电压的原理，提出了一种基于可控避雷器的电网侧抑制过电压措施，表明其可有效抑制青豫直流换相失败时送端暂态过电压。文献[51]提出了基于可控自恢复消能装置的过电压抑制方法，给出了装置的参数整定方法，能够防止特高压直流输电系统送端电压上升。

综上所述，对于暂态过电压的抑制策略，大多考虑直流与风电场控制系统调控和加装各种无功补偿设备，对于控制系统的时间滞后特性和电压调节特性缺少理论分析；由于换相失败后弱送端暂态过电压时间短、速度快、峰值高，在时间尺度上，难以避免通信延时和控制链路延时等，不利于暂态过电压的抑制；在空间尺度上，暂态过电压会在弱送端电网传导，需对送端暂态过电压进行整体抑制。因此，亟须研究弱支撑的新能源直流外送系统暂态过电压多设备协调抑制策略。

1.3 本文的主要工作

本文针对换相失败后弱送端暂态过电压问题展开研究，深入探讨了其时空尺度特性，并详细分析了现有过电压抑制措施的利弊，提出一种基于低残压避雷器的暂态过电压快速抑制方法，在此基础上，结合无功补偿设备和直流控制系统，提出一种考虑多设备响应特性的暂态过电压协调抑制策略，具体研究工作如下：

第 2 章从直流换相失败出发，揭示了直流弱送端暂态过电压的多时空尺度特性。同时，从时间滞后特性和电压调节特性两个角度出发，详细分析直流控制系统（定电流控制环节、低压限流调节环节）、无功补偿设备（静止无功补偿器、同步调相机）及交流避雷器对暂态过电压的调节特性，为后续暂态过电压多时空尺度协调抑制策略奠定了理论基础。

第 3 章提出了基于低残压避雷器的送端暂态过电压抑制方法。首先，简要阐述了避雷器的工作原理，基于极低短路比下的直流送端交流电网模型，从理论上分析了抑制送端暂态过电压的能量耗散需求，进一步提出了一种基于抑制需求的低残压避雷器参数设计方法，并分析低残压避雷器接入后对系统的影响，最后基于 CIGRE-HVDC 标准算例验证了本方法抑制送端暂态过电压的有效性。

第 4 章提出了考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制策略。首先分析了直流送端电压可控资源分布，提出了考虑多设备响应特性的送端暂态过电压协调抑制框架，分别建立了整流站侧、新能源汇集点侧及新能源场站侧暂态过

电压协调抑制模型，采用联合调用算法求解模型。最后，以我国某±800kV 高压直流输电工程为背景进行仿真验证，在不同工况下验证本文策略的有效性。

第 5 章，总结与展望。

本文的研究思路如图 1-1 所示，各章节之间的联系如下：第 2 章揭示了暂态过电压的多时空尺度特性和不同设备的时间滞后特性与电压调节特性，为后续暂态过电压的多时空尺度协调抑制策略提供了理论和模型基础；第 3 章提出了基于低残压避雷器的弱送端暂态过电压快速抑制方法，为第四章的多时空尺度协调抑制策略提供支撑；针对直流近区含大规模新能源且短路比极低场景下的暂态过电压问题，第 4 章提出了考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制策略。综合上述内容共同完成了弱支撑的新能源直流外送系统暂态过电压协调抑制策略研究。

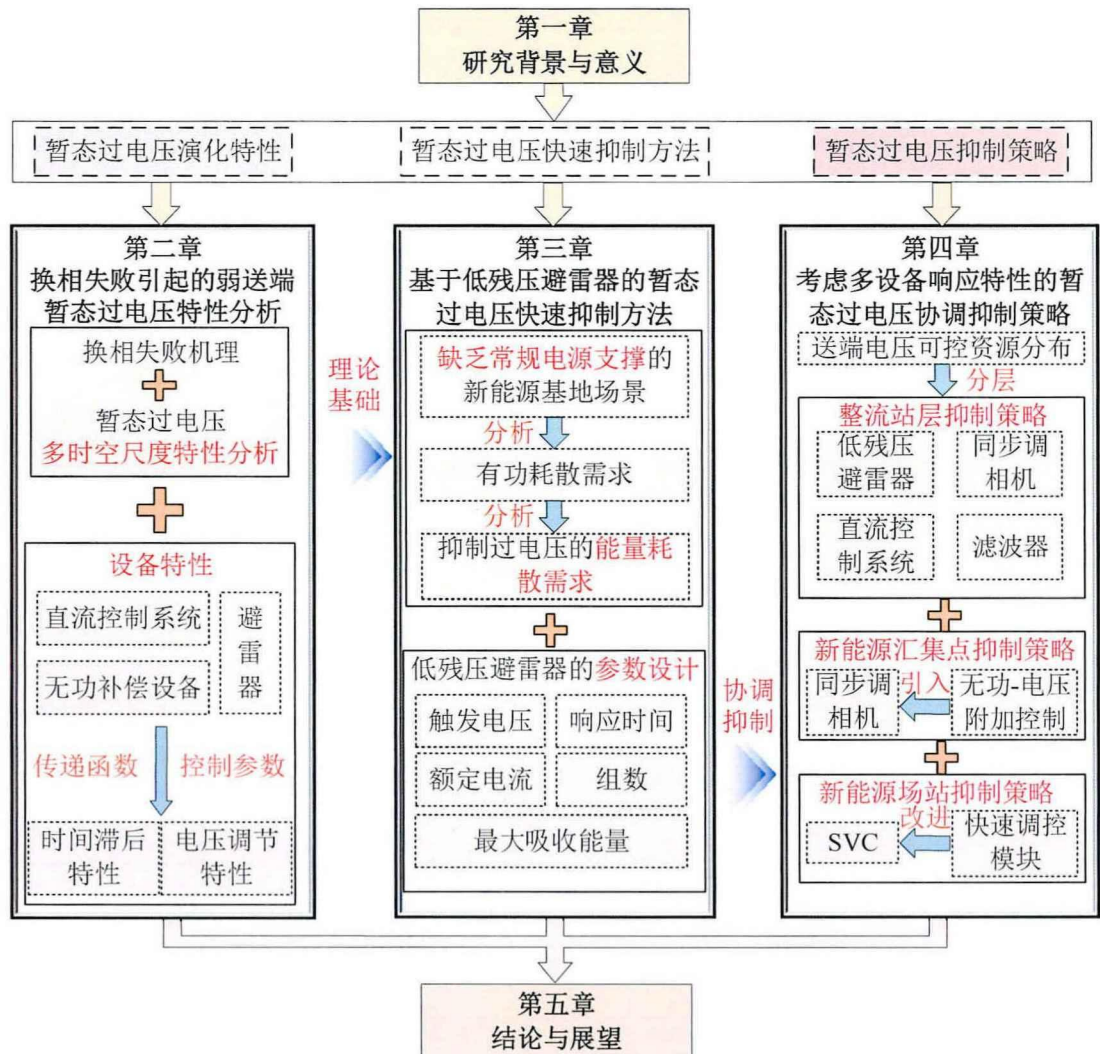


图 1-1 本文的研究思路

第2章 换相失败引起弱送端暂态过电压的特性分析

2.1 引言

直流换相失败引起的暂态过电压时间短、速度快，其峰值与送端电网强度相关；不同设备与不同控制环节带来的控制延时会对过电压造成“错位补偿”的风险。本章首先从直流换相失败机理出发，阐述了直流换相失败引起暂态过电压的原因；从理论分析和仿真验证的角度，揭示了换相失败引起弱送端暂态过电压的多时间尺度；推导了送端电网各母线处电压计算公式，研究了暂态过电压的多空间尺度特性。再从控制环节传递函数和控制参数入手，分别分析了直流控制系统、无功补偿设备和交流避雷器时间滞后特性和对暂态过电压的调节特性，为后文基于低残压避雷器的送端暂态过电压快速抑制方法和协调抑制策略奠定理论基础。

2.2 换相失败引起弱送端暂态过电压的特性分析

2.2.1 换相失败机理

换相失败是传统高压直流输电逆变站的常见故障，直流系统无法避免，会对直流系统及送、受端电网造成极大的冲击。逆变侧换流阀短路、逆变器丢失触发脉冲、逆变侧交流系统故障等均会引起换相失败。本节对换相失败的机理进行简单叙述。

如图 2-1 所示为常见的六脉冲逆变器原理图，其由六个晶闸管组成，每个晶闸管为一个阀，分别记作 VT1~VT6。正常情况下，VT1~VT6 按触发脉冲次序依次导通。在理想情况下，需同时导通来自不同半桥的非同向的两个晶闸管，形成通电回路，而电流从一条支路转移到另一条支路的过程即为换相。换相失败指的是在逆变器或换流器操作过程中，本应该关闭的晶闸管未能及时恢复阻断能力，导致该晶闸管在应该关闭的时间点上继续导通，从而引发电路中的电流短路或电压异常，影响电力系统的稳定性和运行安全^[52,53]。

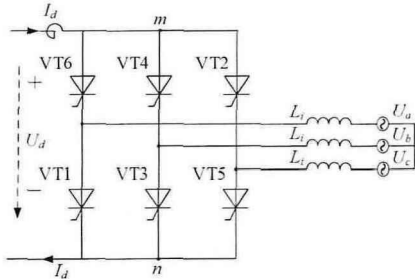


图 2-1 六脉冲逆变器原理图

如图 2-2 为直流系统换相失败等效图，换相失败发生时，逆变侧晶闸管无法

正常关断，相当于逆变侧发生短路，导致直流系统的电气量产生巨大波动，同时，送、受端交流系统也会产生功率波动。

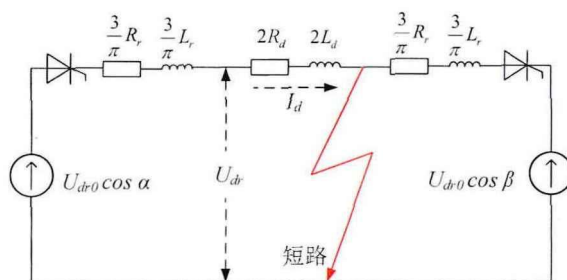


图 2-2 直流系统换相失败等效图

图中：\$U_{dr}\$ 为整流侧直流电压，\$L_r\$、\$R_r\$ 分别为整流侧换相电感和电阻，\$L_i\$、\$R_i\$ 分别为逆变侧换相电感和电阻，\$R_d\$ 为直流电阻，\$L_d\$ 为直流电感，\$I_d\$ 为直流电流。

2.2.2 换相失败引起弱送端暂态过电压的时间尺度特性

直流换相失败会导致送端暂态过电压，接下来分析直流换相失败引发送端暂态过电压的时间尺度特性。在稳态时，整流侧有功功率与无功功率满足：

$$\begin{cases} P_{dr} = N_p U_{dr} I_d \\ Q_{dr} = P_{dr} \tan \varphi_r \end{cases} \quad (2-1)$$

式中：\$P_{dr}\$、\$Q_{dr}\$——整流侧有功功率和吸收的无功功率；

\$N_p\$——极数（双极为 2，单极为 1）；

\$\varphi_r\$——整流站功率因数角。其计算公式为^[55]：

$$\varphi_r = \arctan \left[\frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \right] \quad (2-2)$$

式中：\$\mu\$——换相角；

\$\alpha\$——整流侧触发角。

稳态时，整流侧直流电压计算公式为：

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_p T_r U_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} N_p (L_r + R_r) I_d \quad (2-3)$$

式中：\$U_{dr}\$——整流侧直流电压；

\$N_p\$——极数（双极为 2，单极为 1）；

\$T_r\$——换流变压器变比；

\$U_r\$——交流系统线电压有效值；

\$\alpha\$——整流侧触发角；

\$L_r+R_r\$——整流侧换相阻抗；

\$I_d\$——直流电流。

换相失败时直流系统的动态微分方程为：

$$U_{dr} - U_{di} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} \quad (2-4)$$

式中： U_{di} ——逆变侧侧直流电压；

R ——电阻 ($R = \frac{3}{\pi} R_r + 2R_d + \frac{3}{\pi} R_i$)；

L ——电感 ($L = \frac{3}{\pi} L_r + 2L_d + \frac{3}{\pi} L_i$)。

如图 2-3 所示为弱送端直流系统换相失败后系统电气量响应曲线。

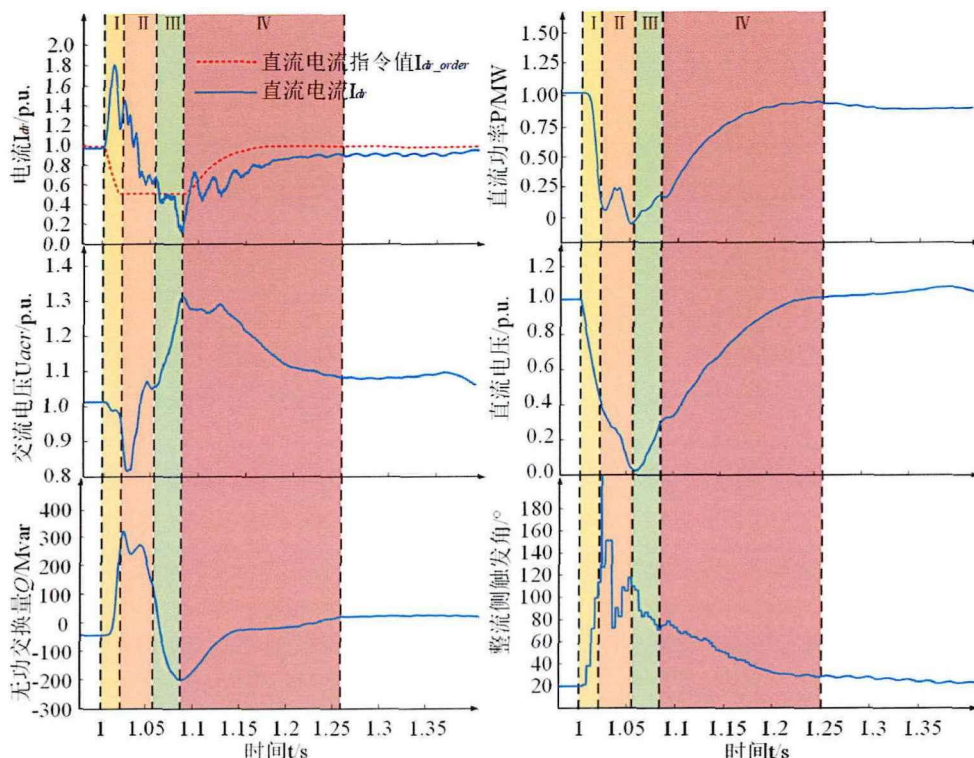


图 2-3 低短路比下直流换相失败后系统电气量响应曲线

阶段I：换相失败发生后，直流电流减小前。由图 2-2 可知，换相失败后，相当于逆变侧短路，逆变侧直流电压 U_{di} 骤降至 0，式(2-4)左边迅速增大，导致直流电流 I_d 迅速增大，如图 2-3 中I所示，此时送端交流电压未来及反应，几乎无变化。

阶段II：直流电流减小后，直流电压增大前，送端出现暂态低电压。此时，逆变侧的低压限流环节会迅速动作，减小直流电流指令值至最小，指令值传至整流侧定电流控制处，电流偏差增大，使得整流侧触发角 α 增大，根据式(2-3)可知， U_{dr} 会减小，来抑制 I_d 的增大，但直流电流值依然远远大于稳态值。由式(2-2)可知，由于换相角较小，可认为 $\mu = \sin \mu$ 。则式(2-2)可化为：

$$\varphi_r \approx \alpha + \mu / 2 \quad (2-5)$$

由于直流电流远大于稳态值，同时 α 的增大，根据(2-5)可知，导致整流侧功

率因数角增大，又根据式(2-1)，此时 Q_{dr} 会急剧增大，整流站所消耗的无功增多，因此直流系统将从交流系统吸收大量无功，无功补偿装置增发大量无功，但仍不足以弥补整流器的无功缺额，从而引起了送端交流母线下降，如图 2-3 中II。

阶段III：直流电压增大后，直流电流恢复前，送端出现暂态过电压。随着时间的推移，换相失败逐渐恢复， U_{di} 逐渐恢复到正常状态，同时逆变侧低压限流环节将直流电流指令值限制在最小限值来帮助直流电流的恢复；且整流侧定电流控制（CC）通过减小触发角 α ，来增大整流侧直流电压 U_{dr} ，从而来帮助直流电流的恢复，在此期间直流电流从最小值逐渐恢复。由式(2-1)、(2-5)可知，整流器消耗的无功功率迅速下跌，但无功补偿装置难以在毫秒级时间内及时减少无功功率输出，因此，送端产生大量无功冗余，涌入交流系统，导致换流母线电压升高，如图 2-3 中III。

阶段IV：直流电流逐渐恢复，暂态过电压降低。故障清除后，在系统各环节的调控下，整流站和逆变站的直流电压、直流电流开始恢复正常，直流功率开始恢复到正常水平，交直系统间的无功交换逐渐恢复正常，最终送端换流母线电压逐渐恢复至额定值，如图 2-3 中IV。

综上所述，在时间尺度上，将暂态过电压分为四个阶段，整体上呈现出“先下后上”的演化特性，换相失败整个过程持续约 200ms，其中暂态压降阶段持续约 50ms，暂态压升阶段持续约 50ms，所以暂态过电压存在持续时间短、速度快、峰值高的特点。

2.2.3 换相失败引起弱送端暂态过电压的空间尺度特性

如图 2-4 所示为缺乏常规电源支撑的新能源送出拓扑图。

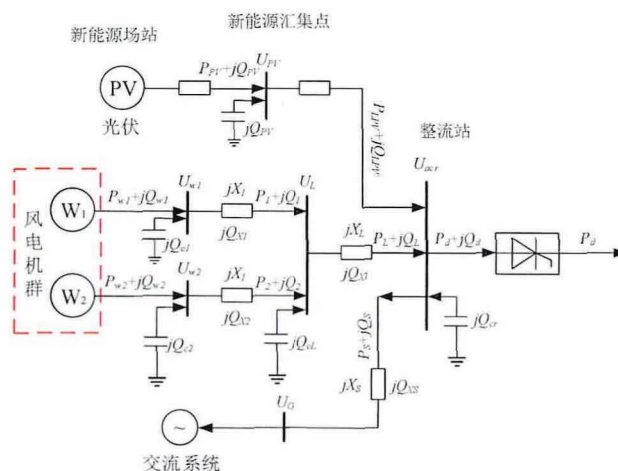


图 2-4 缺乏常规电源支撑的新能源送出电网拓扑图

图中： W 表示风电机组； PV 表示光伏机组； L 表示风电汇集母线； G 表示交流主网系统母线； acr 表示整流站侧交流母线； U 表示电压； $P+jQ$ 表示各线路上的有

有功功率、无功功率； Q_{cL} 风电汇集母线的无功补偿容量、 Q_{c1} 、 Q_{c2} 分别表示 1、2 号风电场的无功补偿容量、 Q_{X1} 、 Q_{X2} 、 Q_{Xl} 、 Q_{Xs} 表示各条线路上无功损耗。

根据潮流计算可计算得到送端电网各母线电压。整流站交流母线电压为：

$$U_{acr} = \sqrt{\left(U_G + \frac{Q_G X_G}{U_G} \right)^2 + \left(\frac{P_G X_G}{U_G} \right)^2} \quad (2-6)$$

光伏汇集母线电压为：

$$U_{LPV} = \sqrt{\left(U_{acr} + \frac{Q_{LPV} X_{LPV}}{U_{acr}} \right)^2 + \left(\frac{P_{LPV} X_{LPV}}{U_{acr}} \right)^2} \quad (2-7)$$

风电场汇集母线电压为：

$$U_{LW} = \sqrt{\left(U_{acr} + \frac{Q_{LW} X_{LW}}{U_{acr}} \right)^2 + \left(\frac{P_{LW} X_{LW}}{U_{acr}} \right)^2} \quad (2-8)$$

风电场母线电压为：

$$U_{w1} = \sqrt{\left(U_{LW} + \frac{Q_{w1} X_{w1}}{U_{LW}} \right)^2 + \left(\frac{P_{w1} X_{w1}}{U_{LW}} \right)^2} \quad (2-9)$$

$$U_{w2} = \sqrt{\left(U_{LW} + \frac{Q_{w2} X_{w2}}{U_{LW}} \right)^2 + \left(\frac{P_{w2} X_{w2}}{U_{LW}} \right)^2} \quad (2-10)$$

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 2-4 所示的仿真模型，经过仿真计算得到弱送端暂态过电压空间尺度分布特性如图 2-5 所示。

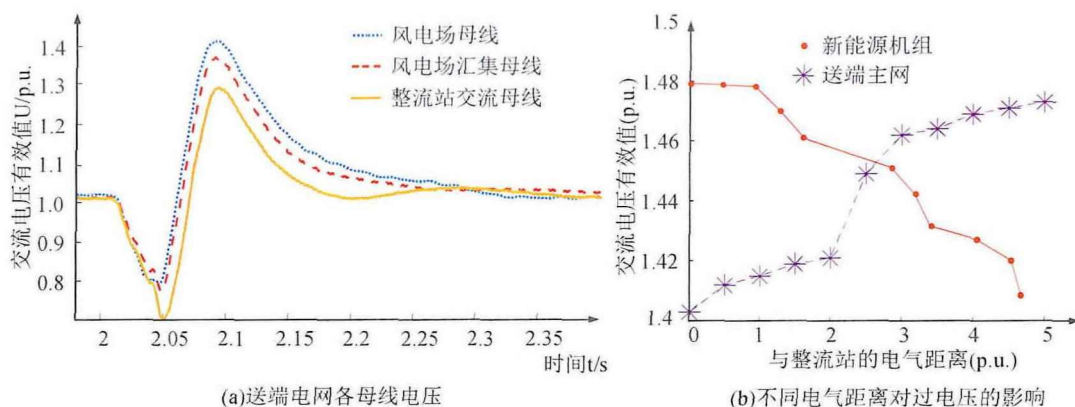


图 2-5 弱送端暂态过电压的空间尺度分布特性

如图 2-5(a)为弱送端电网各母线电压变化过程，在暂态低电压过程中，“整流站-新能源汇集点-新能源场站”各级母线处低电压呈“逆向分布”，即整流站过电压水平最高，新能源场站低电压水平低；在暂态过电压过程中，各级母线处过电压呈“正向分布”特性，即新能源场站过电压水平最高，整流站过电压水平最低。如图 2-5(b)为不同电气距离对过电压的影响，随着送端主网与整流站电气距离的

增大，整流站暂态过电压水平越高；随着新能源机组与整流站电气距离的增大，新能源机组暂态过电压水平越低。

2.3 直流系统对暂态过电压的调节特性

直流控制系统能控制换流器的触发角大小，换流器吸收的无功功率与其触发角有密切联系，同时换流器所吸收无功功率的大小会直接影响送端交流电压的大小，因此直流控制系统对送端暂态过电压有一定的调节作用。目前在常规高压直流输电工程中，整流站主要采用的是定电流控制，逆变侧主要采用的是定关断角控制、电流偏差控制和低压限流控制，现有文献表明整流侧定电流控制和逆变侧低压限流控制对送端暂态过电压有一定的抑制作用^[55]。因此，本小节旨在研究整流侧定电流控制和逆变侧低压限流控制的时间滞后特性和对暂态过电压调节特性，充分挖掘直流潜能，为第四章策略奠定理论基础。

2.3.1 定电流控制环节

整流侧定电流控制主要是通过将整流侧直流电流与逆变侧传递过来的定电流指令值比较，通过 PI 控制环节后，输出整流器的触发角，改变直流系统运行特性。本小节主要研究定电流控制系统的时间滞后特性与电压调节特性。

(1) 时间滞后特性

如图 2-6 为整流侧定电流控制环节框图^[54]。

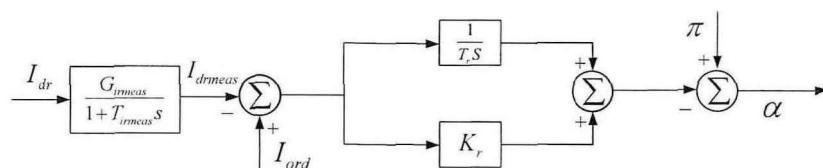


图 2-6 定电流控制环节框图

图中： I_d 为直流电流； G_{irmear} 为整流侧电流测量放大增益； T_{irmear} 为整流侧电流测量时间常数； I_{drmeas} 为整流侧滤波后电流值； I_{ord} 为定电流指令值； T_r 为整流侧电流测量时间常数； K_r 为整流侧滤波后电流值； α 为整流侧触发角。

由图 2-6 可知，在定电流控制环节中，整流侧直流电流经过一阶滞后环节滤波后，得到滤波后电流值，经 PI 控制环节得到触发角 α 。因此，定电流环节调节系统传递函数为：

$$G_{CCA}(s) = \frac{G_{irmear}}{1 + T_{irmear}s} \left(K_r + \frac{1}{T_r s} \right) \quad (2-11)$$

式中： G_{irmear} ——整流侧电流测量放大增益；

T_{irmear} ——整流侧电流测量时间常数；

K_r ——定电流 PI 控制环节的放大增益；

T_r ——和时间常数。

由式(2-11)可知，传递函数中的时间常数决定了调节系统的响应延时。将整流侧和逆变侧的典型控制参数代入式(2-11)，具体参数取值见表 2-1。

表 2-1 定电流控制环节典型参数

序号	技术参数	数值
1	G_{imeas}	0.5
2	T_{imeas}	0.0012s
3	K_r	0.3
5	T_r	0.02s

可以计算得到定电流控制系统的幅频、相频特性曲线和时间滞后特性，如图 2-7 所示。由图 2-7 (a) 可知，定电流控制环节在不同频段下都会产生不同程度的延时；由图 2-7 (b) 可知，其在工频信号（50Hz）下会产生 4.1ms 的响应延时。

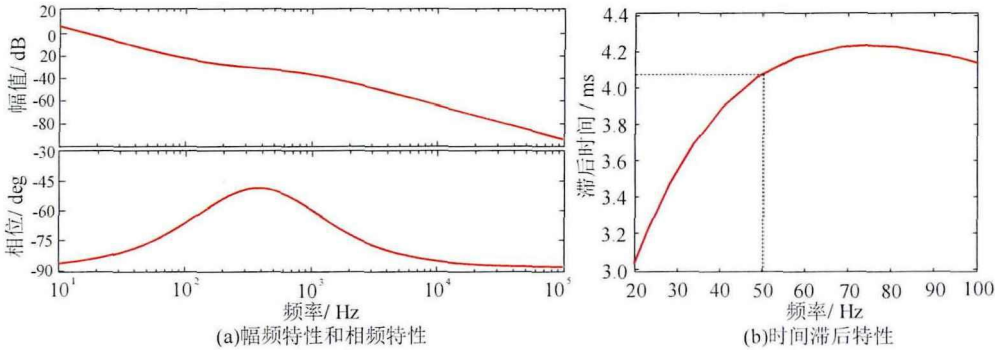


图 2-7 整流侧定电流控制系统的幅频、相频和时间滞后特性曲线

(2) 电压调节特性

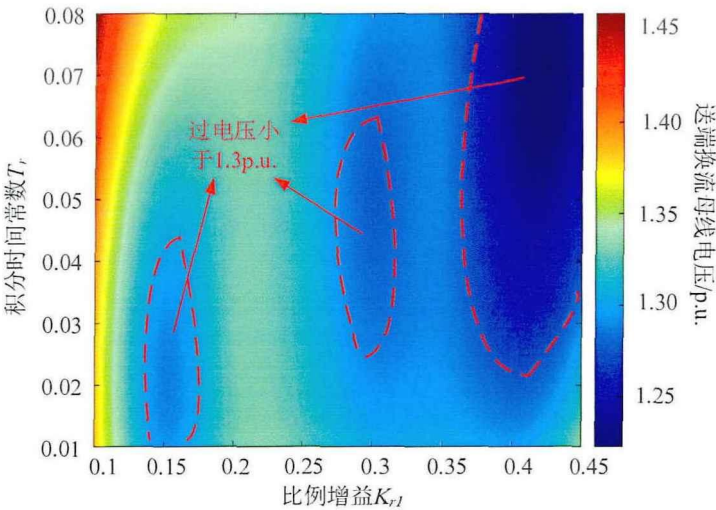


图 2-8 整流侧定电流控制系统对过电压峰值的可调域

为了研究定电流控制参数对过电压峰值的调节范围，本文建立如图 2-4 所示的仿真模型，选取 $K_{r,l}$ 、 T_r 为一组参数，保持其他参数不变逐渐更改这两个参数数值，计算每一组参数取值组合下的过电压峰值，得到过电压峰值与参数取值组合

的对应关系，获得参数对过电压峰值的可调域，如图 2-8 所示。根据参数对过电压峰值的可调域可知，为保证送端交流电压不高于 1.3p.u.，运行过程中的参数调整不应超过图中红色虚线边界，参数可调范围较小，表明定电流控制参数优化对过电压抑制效果存在一定的局限性。

2.3.2 低压限流环节

低压限流环节起初是作为换相失败故障的一种抑制措施，目前在许多现代高压直流输电工程均有应用，用来改善故障后直流系统的恢复特性^[57]。当直流系统发生换相失败后，通过低压限流环节的调节，可以使得直流电流增加，结合 2.2 的分析可知整流站吸收的无功功率也会增加，这将有利于抑制送端暂态过电压^[58]。

(1) 时间滞后特性

低压限流环节对送端交流电压的调节主要是通过测量逆变侧直流电压来调整整流侧直流电流参考值，经过通信传递到定电流控制环节来改变触发角指令，进而调整触发角输出，改善整流器所吸收的无功功率，从而抑制暂态过电压现象。如图 2-9 为低压限流控制环节框图。

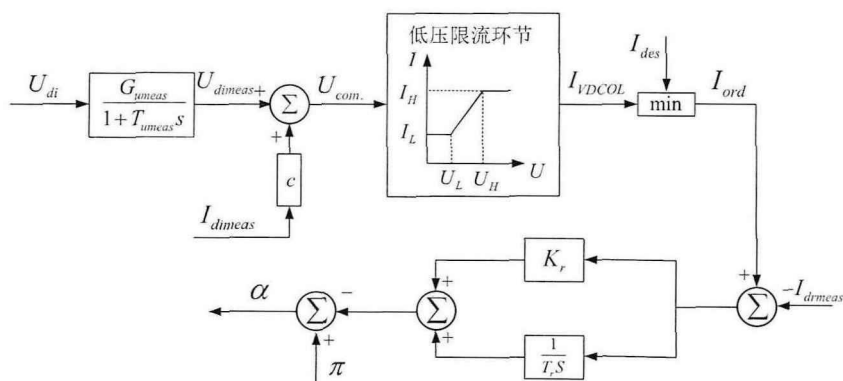


图 2-9 低压限流控制环节框图

图中： U_{di} 为逆变侧直流电压； I_{di} 为逆变侧直流电流； G_{umeas} 为逆变侧电压测量放大增益； T_{umeas} 为逆变侧电流测量时间常数； c 为电流补偿值； U_{com} 为补偿后电压值； I_H 、 I_L 、 U_H 、 U_L 分别为低压限流环节的电流上、下限值和电压上、下限值； I_{VDCOL} 为低压限流环节输出值； I_{des} 为下发电流指令值； I_{ord} 为定电流指令值； I_{rmeas} 为整流侧滤波后电流值。

由图 2-9 可知，在低压限流环节中，逆变侧直流电压和逆变侧直流电流经过一阶滞后环节滤波后，得到补偿电压，经低压限流控制器、最小选择器得到整流侧定电流指令信号，信号经通信传送到整流侧的定电流控制环节，经 PI 控制环节得到触发角 α 。因此，低压限流环节调节系统传递函数为：

$$G_{VDCOL}(s) = \frac{G_{umeas}}{1 + T_{umeas}s} \left(K_r + \frac{1}{T_r s} \right) \quad (2-12)$$

式中： G_{umeas} ——逆变侧电压测量放大增益；
 T_{umeas} ——逆变侧电压测量时间常数；
 K_r ——定电流 PI 控制环节的放大增益；
 T_r ——和时间常数。

因此，传递函数中的放大增益决定了低压限流调节系统输出量的大小，传递函数中各环节的时间常数决定了调节系统的响应延时。将整流侧和逆变侧的典型控制参数代入式(2-12)，具体参数取值见表 2-2。

表 2-2 低压限流控制环节典型参数

序号	技术参数	数值
1	G_{umeas}	0.002
2	T_{umeas}	0.02s
3	K_r	0.3
5	T_r	0.02s

可以计算得到低压限流环节调节系统的幅频、相频特性曲线和时间滞后特性，如图 2-10 所示。由图 2-10 (a) 可知，低压限流调节系统的传递函数在不同频段下都会产生不同程度的延时；由图 2-10 (b) 可知，其在工频信号 (50Hz) 下会产生 9.3ms 的响应延时。同时，指令值信号需要传递到送端，故也需要考虑通信带来的延时。

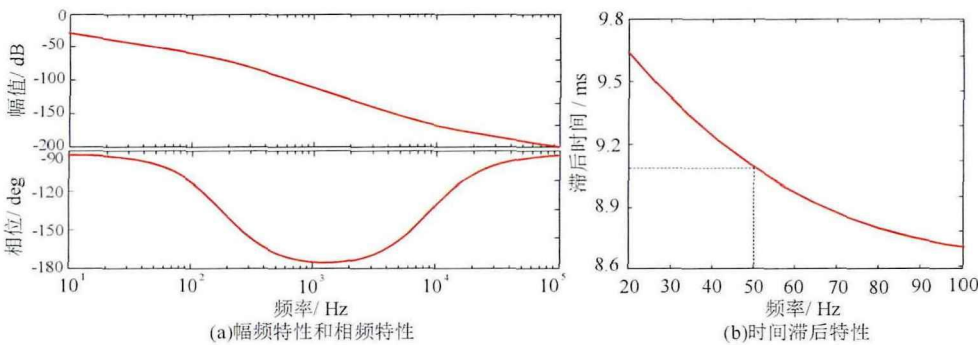


图 2-10 低压限流调节系统的幅频、相频和时间滞后特性曲线

(2) 电压调节特性

当电压低于或者高于某一限值 U_H 、 U_L 时，低压限流环节会限制输出的电流值，改变定电流整定值，将该信号传递到送端，影响定电流控制输出的触发角，触发角变化将影响整流器所吸收的无功功率大小，从而对暂态过电压起到一定的影响。为了探究低压限流调节系统对暂态过电压的影响，接下来从低压限流环节的四个参数 U_H 、 U_L 、 I_H 、 I_L 展开研究其电压调节特性。低压限流环节的电压-电流特性如图 2-11 所示。

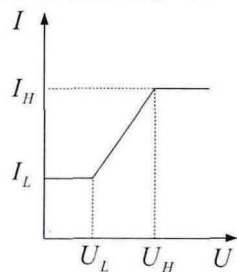


图 2-11 低压限流环节的电压-电流特性

由图 2-11 可得到其电压-电流特性方程为：

$$I = \begin{cases} I_L & U < U_L \\ \frac{I_H - I_L}{U_H - U_L} U + \frac{U_H I_L - U_L I_H}{U_H - U_L} & U_L < U < U_H \\ I_H & U > U_H \end{cases} \quad (2-13)$$

由式(2-13)可知，低压限流环节输出的电流指令值主要取决于 U_H 、 U_L 和 I_L 。为了研究定电流控制参数对过电压峰值的调节范围，本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 2-4 所示的仿真模型，选取 U_H 、 U_L 和 I_L 为一组参数，保持其他参数不变逐渐更改这其中两个参数数值，计算每一组参数取值组合下的过电压峰值，得到过电压峰值与参数取值组合的对应关系，获得参数对过电压峰值的可调域。

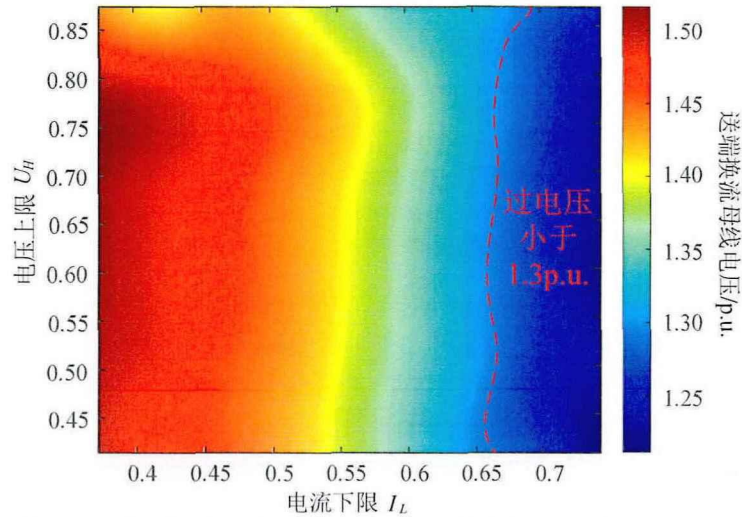


图 2-12 低压限流调节系统对过电压峰值的可调域 ($U_L=0.3$)

如图 2-12、图 2-13、图 2-14 分别为低压限流调节系统的电压调节范围示意图，由图可知，电压上限 U_H 的变化对送端暂态过电压的影响较小；随着电压下限 U_L 的增大，图中红色区域减少，送端暂态过电压有所抑制；电流下限 I_L 对送端暂态过电压的影响较大，随着电流下限 I_L 的增大，送端暂态过电压得到明显抑制。因此，可以优先考虑优化电压下限 U_L 和电流下限 I_L 。根据参数稳定域可知，为保

证暂态过电压不超过 1.3p.u.，运行过程中的参数调整不应超过图中红色虚线边界，参数可调范围较小。

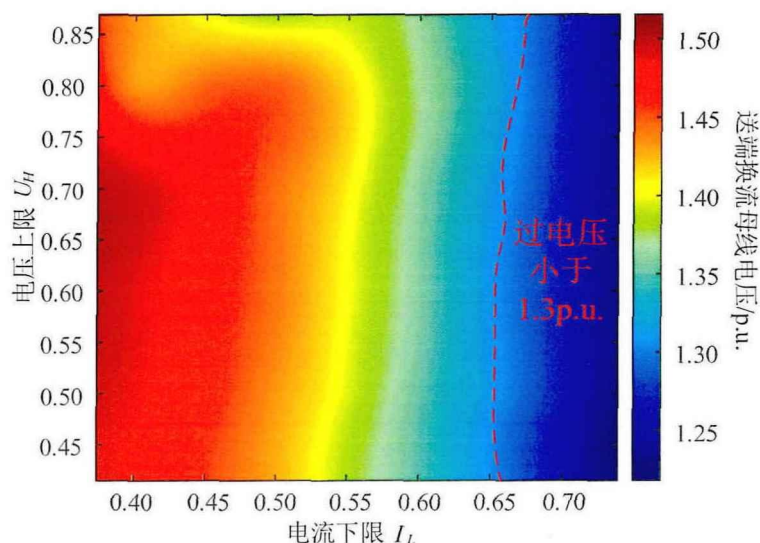


图 2-13 低压限流调节系统对过电压峰值的可调域 ($U_L=0.4$)

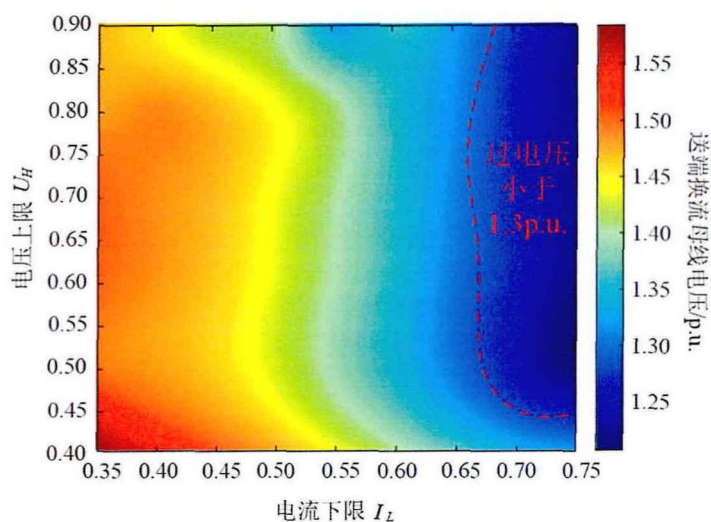


图 2-14 低压限流调节系统对过电压峰值的可调域 ($U_L=0.5$)

2.4 无功补偿设备对暂态过电压的调节特性

LCC-HVDC 的换流器在正常时需从送端吸收一定比例有功功率的无功功率，在额定工况时，一般为有功功率的 40%~60%。目前大部分高压直流换流站内的无功补偿设备主要有基于机械投切的电容器和电抗器组、静止无功补偿器 (SVC) 及同步调相机 (SC)。本小节从时间滞后特性和电压调节特性的角度分析了直流送端无功补偿设备对暂态过电压的调节特性，充分挖掘换流站内的无功潜能，为后文的暂态过电压多时间尺度协调抑制策略提供基础。

2.4.1 机械投切的电容器和电抗器组

机械投切的电容器和电抗器组，也称之为交流滤波器，如图 2-15 为目前整流站常用的交流滤波器。

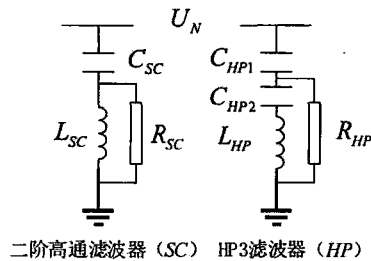


图 2-15 交流滤波器接线图

交流滤波器是在常规高压直流输电工程中最常见的无功补偿设备，能为系统提供基波无功，一般当短路比大于 5 时，仅靠交流滤波器即可满足直流系统所需的无功功率，由于电容器需为直流系统提供滤波作用，因此滤波器整体呈容性，最小滤波电容容量约占换流容量的 30%。由于滤波器能为系统提供工频 f_0 下的无功功率，可以设滤波器的等值电容为 C_f ，其主要受工频 f_0 的影响，滤波器两端的电压为 U_N ，则交流滤波器的无功补偿容量 $Q_{f\sum}$ 的计算公式为：

$$Q_{f\sum} = U_N^2 \sum_{i=1}^n C_{fi}(f_0) \quad (2-14)$$

式中： $Q_{f\sum}$ ——整流站交流滤波器的基波无功功率；

i ——第 i 台交流滤波器；

f_0 ——基波频率；

$C_{fi}(f_0)$ ——第 i 台交流滤波器的等值电容^[71]。

由(2-14)可知，滤波器的等值电容一定时，其所发出的无功功率与其两端电压的平方成正比，无法柔性地改变输出值，只能被动切除来改变其无功输出，无法及时切除滤波器也是导致直流送端暂态过电压的原因之一。

2.4.2 静止无功补偿器（SVC）

目前，在我国西北地区新能源送端电网中，投入了大量无功补偿装置，其中主要包括静止无功补偿器（SVC）。SVC 主要由晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）、滤波电容器或固定电容器（FC）、机械投切电容器（MSC）等结构组合构成的，常见的 SVC 结构为“TSC+TCR”结构，如图 2-16 所示，该结构可以根据母线处电压，通过一定的控制方法调整晶闸管的导通与关断，从而快速、动态地调节无功输出，满足系统所需的无功功率^[59]。

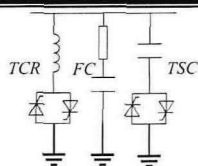


图 2-16 SVC 结构图 (TSC+TCR)

(1) 时间滞后特性

如图 2-17 为 SVC 控制系统框图。SVC 通常是采用电压闭环控制，控制器通过采集实际电压值，与 SVC 电压参考值作差后得到电压偏差，经过两个超前滞后环节得到连续控制增益 K_{SVCS} ，输入至快速调控模块中得到等效电纳值 B_{SVC} ，再经过信号发生器输出触发角信号和投入电容器数量信号。

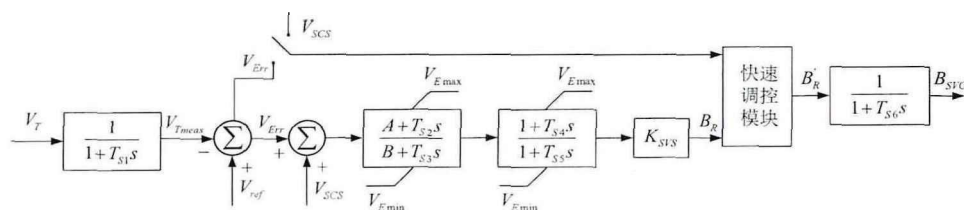


图 2-17 SVC 控制系统框图

图中： V_T 为系统电压实际值； V_{Tmeas} 为滤波后电压值； V_{ref} 为电压参考值， V_{SCS} 为连续控制增益参考电压； V_{Err} 为电压偏差； V_{Emax} 、 V_{Emin} 分别为最大、最小电压偏差限值； K_{SVCS} 为连续控制增益； B_R 为连续控制导纳值； B'_R 为快速调控导纳值； B_{SVC} 为输出等效电纳值； T_{S1} 为滤波器时间常数； T_{S2} 、 T_{S3} 分别为第一级超前、滞后时间常数； T_{S4} 、 T_{S5} 分别为第二级超前、滞后时间常数； T_{S6} 为可控硅触发延迟时间常数；快速调控模块是一种分段函数，其输出值取决于电压偏差 V_{Err} 是否超过阈值 ΔV_L 和 ΔV_H ，其具体表达式为：

$$B'_R = \begin{cases} B'_{max} & V_{Err} \geq \Delta V_H \\ B_R & \Delta V_H \geq V_{Err} \geq \Delta V_L \\ B'_{min} & V_{Err} \leq \Delta V_L \end{cases} \quad (2-15)$$

式中： B'_R ——快速调控导纳值；

V_{Err} ——电压偏差；

ΔV_L 、 ΔV_H ——快速调控模块最大、最小电压阈值，一般为 -0.2p.u. 和 +0.2p.u.；

B'_{max} 、 B'_{min} ——快速调控模块的最大导纳和最小导纳。

由图 2-17 可以得到 SVC 控制系统传递函数表达式为：

$$G(s) = \frac{K_{SVCS}}{(1+T_{S1}s)} \left(\frac{A+T_{S2}s}{B+T_{S3}s} \right) \left(\frac{1+T_{S4}s}{1+T_{S5}s} \right) \frac{1}{(1+T_{S6}s)} \quad (2-16)$$

式中： A 、 B ——表示超前滞后识别码，均为 1。

根据工程中典型 SVC 控制系统参数，SVC 控制系统传递函数可写为^[60]：

$$G(s) = \frac{K_{SVC}}{(1+T_{S1}s)(1+T_{S6}s)} = \frac{10}{(1+0.02s)(1+0.06s)} \quad (2-17)$$

可计算得到其幅频、相频特性（伯德图）及时间滞后特性曲线，如图 2-18 所示，SVC 控制系统的幅相特性表现为负，可知不同频率信号经过该系统均会呈现出滞后特性；如图 2-18（b）为 SVC 控制系统的时间滞后特性，随着输入信号频率增大，滞后时间逐渐减小，在工频 50Hz 信号的情况下，滞后时间约为 20ms 左右。

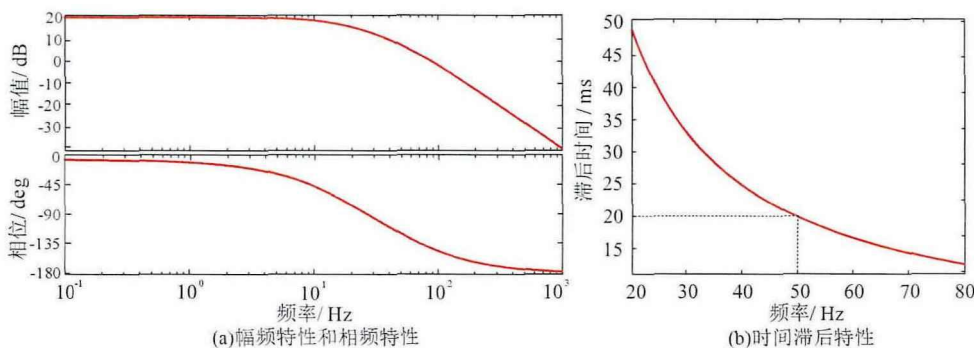


图 2-18 SVC 控制系统的幅频、相频和时间滞后特性曲线

（2）电压调节特性

静止无功补偿器一般接在风电场附近，设 SVC 接入母线电压为 U_{SVC} ，则其无功出力 Q_{SVC} 的表达式为^[60]：

$$Q_{SVC} = \left[2\pi f C_{SVC} - \frac{2(\pi - \theta_{TCR}) + \sin 2\theta_{TCR}}{2\pi f L_{SVC}} \right] (U_{SVC})^2 \quad (2-18)$$

式中： Q_{SVC} ——SVC 的无功出力；

C_{SVC} 、 L_{SVC} ——SVC 的电容、电感；

f ——系统频率；

θ_{TCR} ——TCR 支路的晶闸管触发角。

由式(2-18)可知，在电容器组和电抗器组容量不变的情况下，SVC 的无功出力除了与电压的平方成正比外，也与 SVC 控制系统输出的触发角有关，本文主要研究 SVC 控制系统参数对 SVC 电压调节特性的影响。

由 SVC 控制系统传递函数(2-17)可知，影响系统输出信号参数主要有连续控制增益 K_{SVC} 和可控硅触发延迟时间常数 T_{S6} 。为了研究 SVC 控制参数对过电压峰值的调节范围，本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 2-4 所示的仿真模型，选取 K_{SVC} 、 T_{S6} 为一组参数，保持其中一个参数不变逐渐更改另一个参数数值，通过仿真得到这组参数取值组合下的过电压峰值，得到过电压峰值与参数取值组合的对应关系，获得参数对过电压峰值的可调域。如图 2-19 为 SVC 控制系统中

的连续控制增益 K_{SRS} 和可控硅触发延迟时间常数 T_{S6} 对过电压峰值的可调域。根据参数对过电压峰值的可调域可知，为保证送端交流电压不高于 1.3p.u.，运行过程中的参数调整不应超过图中红色虚线部分，参数可调范围较小，表明 SVC 控制参数优化对过电压抑制效果存在一定的局限性。

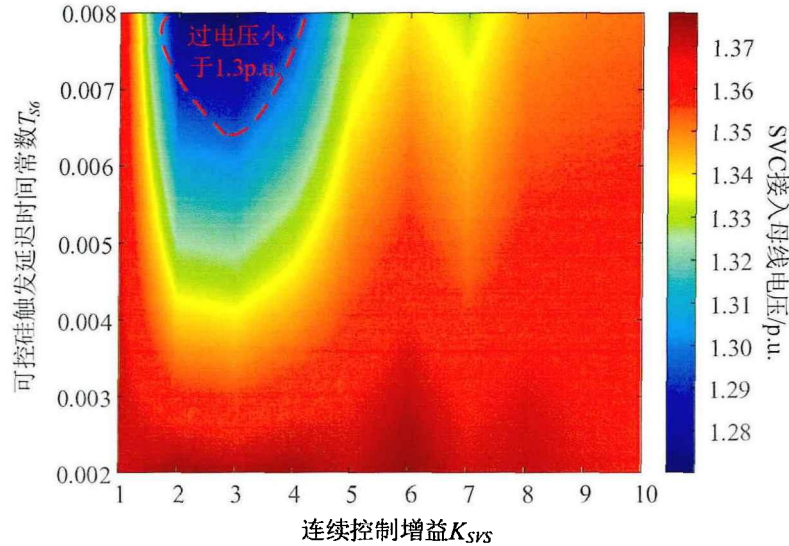


图 2-19 SVC 控制系统参数对过电压峰值的可调域

2.4.3 同步调相机 (SC)

静止无功补偿器虽然可以快速输出和吸收无功，并对电压进行柔性控制，但其不能提高换流站所接交流系统的短路比^[61]。当送端交流系统短路比小于或等于 3 时，会导致高压直流系统的抗干扰能力降低，主要表现在交流系统扰动或者故障时将导致直流系统发生换相失败，系统没有足够的无功支撑则会导致直流送端暂态过电压。一般在送端换流站交流母线接入一定容量的调相机，一方面可以提高系统短路比，另一方面可以改善换流器换相过程，抑制送端暂态过电压问题，提高系统运行稳定性。

同步调相机作为旋转设备，可以看作一台只发出无功功率的发电机。根据调相机运行原理，可将其动态无功响应分为两个过程：自发无功响应和励磁无功响应^[60]。

(1) 时间滞后特性

根据前述研究可知控制系统会对响应造成滞后，调相机的时间滞后特性主要是由励磁控制系统造成的。如图 2-20 为典型调相机励磁控制系统框图。

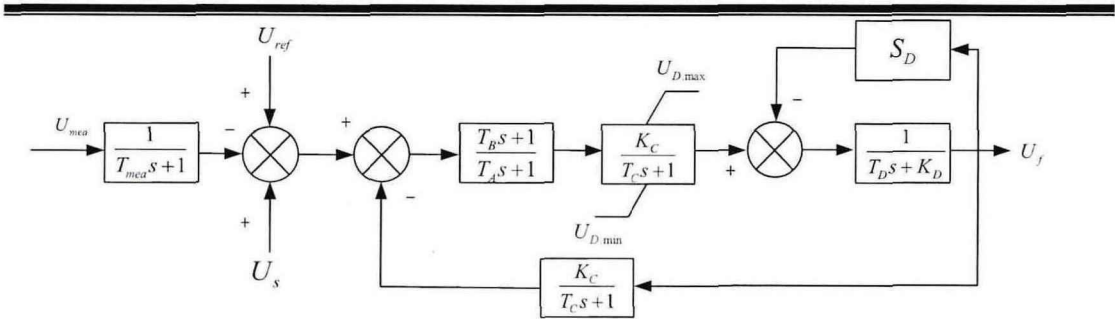


图 2-20 典型调相机励磁控制系统框图

图中： U_{mea} 为系统电压测量值； U_{ref} 为参考电压； U_s 为额外输入电压信号； U_{Dmax} 、 U_{Dmin} 分别为电压最大/最小电压阈值； U_f 为调相机内电势； T_{mea} 为量测环节时间常数； T_B 、 T_A 分别为串联校正环节超前、滞后时间常数； T_C 为励磁调节器时间常数； K_C 为励磁调节器放大增益； T_D 为放大环节时间常数； K_D 为积分选择因子。

由图 2-20 可知，调相机通过测量系统电压与参考电压作差，也可以加入额外输入电压信号得到电压偏差，与并联反馈环节得到的信号作差，经过串联校正环节、励磁调节器、功率放大环节得到调相机内电势输出信号 U_f 。因此，调相机励磁系统传递函数 $G_{SC}(s)$ 为：

$$G_{SC}(s) = \frac{k_C(1+T_Bs)}{(1+T_{mea}s)(k_v+T_As)(1+T_Cs)(k_D+T_Ds)} \tag{2-19}$$

具体参数取值见表 2-3。代入典型参数，可计算得到其幅频、相频特性（伯德图）及时间滞后特性曲线如图 2-21 所示。

表 2-3 调相机励磁控制环节典型参数

序号	技术参数	数值
1	T_{mea}	0.002
2	T_A	0.02
3	T_B	0.02
4	T_C	0.02
5	T_D	0.02
6	K_C	10
7	K_D	50

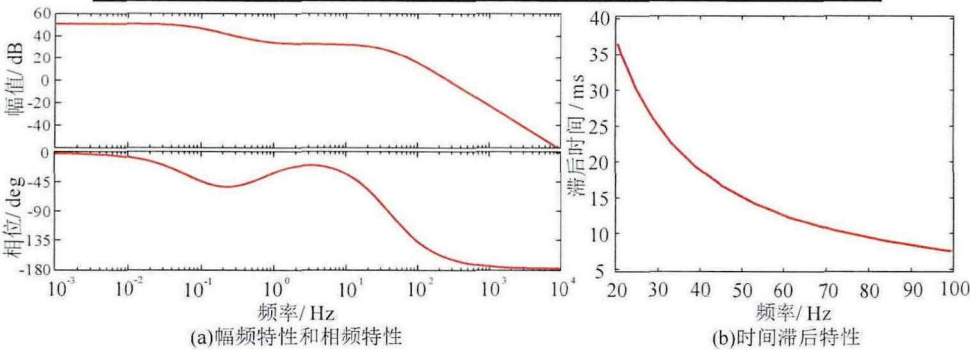


图 2-21 调相机的幅相特性 (a) 及时间滞后特性曲线 (b)

从图 2-21(a)可以看出, 调相机励磁系统在工频下主要呈现“负相关”特性, 会产生不同程度的延时。根据相位、频率和时间的关系, 结合图 2-21(a), 得到工频附近的时间滞后特性曲线, 如图 2-21(b)所示, 在工频信号 50Hz 下其系统响应延时约为 15ms 左右, 而换相失败引起的送端过电压持续时间在 20ms 左右, 因此, 调相机的响应速度很可能跟不上系统电压的变化, 进而形成“错位补偿”, 恶化系统电压峰值。

(2) 电压调节特性

调相机对电压的影响主要是依赖于调相机无功的输出量。在故障过程中, 调相机的自发无功分量 ΔQ_{SC1} 和励磁控制无功分量 ΔQ_{SC2} 组成了调相机的无功变化量 ΔQ_{SC} 。

系统故障后, 由于调相机属于旋转设备, 调相机的次暂态电势和磁链无法突变, 自发无功分量 ΔQ_{SC1} 与调相机接入母线处电压相关和直轴次暂态电抗 X_d'' 决定其输出值, 自发无功分量 ΔQ_{SC1} 可由下式计算:

$$\Delta Q_{SC1} = -U_L \frac{\Delta U_L}{X_d'' + X_{ISC}} + \Delta U_L i_{d0} \quad (2-20)$$

式中: ΔQ_{SC1} ——调相机自发无功分量;

U_L ——调相机接入母线处稳态电压;

ΔU_L ——故障后调相机接入母线处的电压变化量;

X_d'' ——直轴次暂态电抗;

X_{ISC} ——调相机并网变压器短路电抗;

i_{d0} ——旋转坐标系下 d 轴电流初值。

假设忽略 i_{d0} , 由式(2-20)可知自发无功分量与 ΔU_L 相关, 当换相失败故障发生时, 直流送端交流母线电压先低后高。当电压跌落时 (即 $\Delta U_L < 0$) 时, 调相机发出无功; 当电压升高时 (即 $\Delta U_L > 0$) 时, 调相机吸收无功。因此, 调相机可以完美契合换相失败故障后送端暂态过电压的抑制要求, 动态地补偿送端交流电网的无功缺额, 满足系统对暂态低电压和过电压的需求, 实现过电压的主动抑制, 具有一定的优势, 但由于调相机的自发无功容量受限, 还需要励磁控制系统的配合来实现合理的电压控制。

励磁控制无功分量 ΔQ_{SC2} 主要受励磁控制系统影响, 励磁系统启动强励来调控输出的无功功率。现有研究表明调相机励磁电流与端电压成反比, 其无功出力受励磁调节器放大增益 K_C 和励磁调节器时间常数 T_C 影响^[63]。为了研究调相机励磁系统控制参数对过电压峰值的调节范围, 选取 K_C 、 T_C 为一组参数, 保持其中一个参数不变逐渐更改另一个参数数值, 计算这组参数取值组合下的过电压峰值, 得到过电压峰值与参数取值组合的对应关系, 获得参数对过电压峰值的可调域。

如图 2-22 所示，为保证送端交流电压不高于 1.3p.u.，运行过程中的参数调整不应超过图中红色虚线部分，参数可调范围较大，表明调相机励磁控制系统参数优化对过电压抑制具有一定效果，但同样需要合理的参数整定。

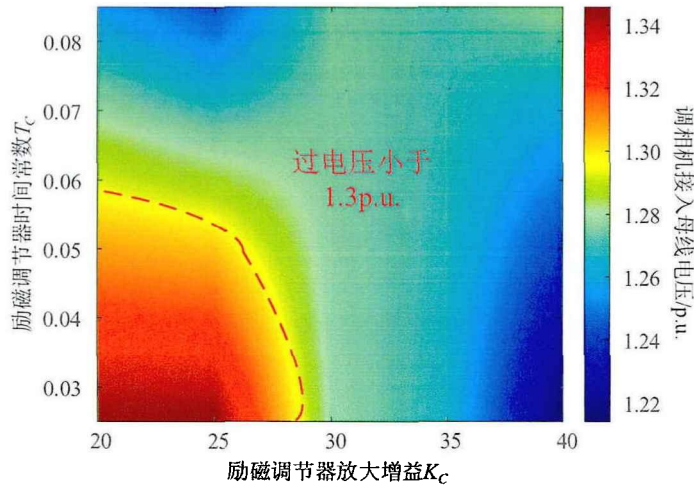


图 2-22 调相机励磁控制系统参数对过电压峰值的可调域

2.5 交流避雷器对暂态过电压的调节特性

交流避雷器作为一种过电压抑制设备，相比于直流系统控制和无功补偿设备而言，其具有控制简单、响应速度快、运维方便、造价低等优势。本小节研究交流避雷器对直流换相失败引起的送端暂态过电压的抑制效果。避雷器接入系统时，在正常工作电压环境下，流过避雷器的电流仅为微安级，相当于关断状态。当过电压作用时，由于氧化锌电阻片的非线性，流过避雷器的电流瞬间达到数千安，避雷器处于导通状态，释放过电压的能量，同时也限制了过电压的幅值。

如图 2-23 所示为交流避雷器的简单等值模型，它是由一个非线性可变电阻与一个等值电容并联组成。图中 C_{arr} 为避雷器的等值电容； R_{arr} 为避雷器的等值非线性电阻； U_L 为接入母线电压。

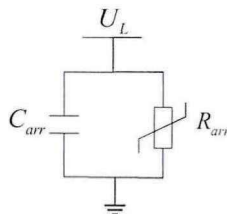


图 2-23 交流避雷器的等值模型

(1) 时间滞后特性

避雷器的响应时间指的是避雷器从触发到完全导通所需的时间。常见的避雷器响应时间为几纳秒至几微秒，因此，避雷器几乎没有时间滞后，能够瞬时响应。

(2) 电压调节特性

交流避雷器对过电压的抑制效果主要取决于残压。为了研究交流避雷器参数对直流换相失败引起的过电压峰值的调节范围，设置某直流受端发生三相短路故障引起直流换相失败，导致送端暂态过电压，保持其他参数不变逐渐更改残压数值，计算过电压峰值，得到过电压峰值与参数对应关系，获得参数对过电压峰值的调节特性。

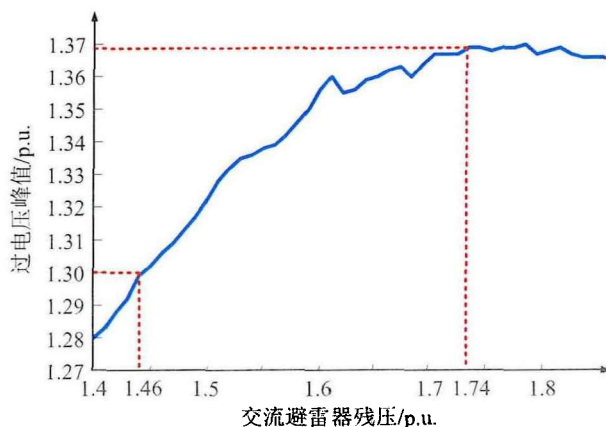


图 2-24 交流避雷器对过电压调节特性

如图 2-24 所示为交流避雷器残压对过电压峰值的调节特性。当交流避雷器的残压高于 1.46p.u.时，无法抑制过电压于 1.3p.u.以下；随着交流避雷器残压的升高，过电压峰值逐渐增大；当交流避雷器残压高于 1.74p.u.时，其对过电压峰值的影响不大。因此，普通交流避雷器对直流换相失败引起的过电压的抑制效果受限，降低残压有利于限制直流换相失败引起的过电压，为了抑制直流换相失败引起的送端暂态过电压，需对避雷器参数提出一定要求。

2.6 本章小结

本章首先从换相失败机理出发，揭示了在低短路比场景下，直流换相失败引起送端暂态过电压的时间尺度和空间尺度特性；进而，从时间滞后特性和电压调节特性两个维度深度探讨了直流控制系统、无功补偿设备及交流避雷器对暂态过电压的调节特性，得出以下结论：

(1) 当直流系统发生换相失败时，导致直流线路无法正常传输功率，此时整流器消耗的无功功率降低，大量冗余无功涌入送端交流系统，导致送端发生暂态过电压。在时间尺度上，将暂态过电压分为四个阶段，整体上呈现出“先下后上”的演化特性；在空间尺度上，在低电压情况下呈现“逆向分布”，而在过电压情况下呈现“正向分布”的特性。

(2) 在电压调节的过程中，直流控制系统虽然响应速度较快，但其参数对过电压峰值的调整受限；无功补偿装置虽然对过电压峰值有较好的抑制效果，但存在一定程度的响应延迟，可能存在“错位补偿”的风险；交流避雷器作为过电

压抑制设备，可以通过降低残压来改善过电压抑制效果，但对参数有严格要求。

综上所述，本章为后续研究基于低残压避雷器的送端暂态过电压抑制方法和暂态过电压的协调抑制策略奠定理论基础。

第3章 基于低残压避雷器的弱送端暂态过电压快速抑制方法

3.1 引言

在第 2 章中指出,不同控制环节和设备存在不同的控制延时,尽管避雷器作为一种过电压抑制设备,相较于直流系统控制和无功补偿设备具有控制简单、响应速度快、运维方便、造价低等优势,但常规交流避雷器对直流换相失败引起的送端暂态过电压的抑制效果不显著。为了保障直流送端电网的安全稳定运行,本章提出一种基于低残压避雷器的送端暂态过电压抑制方法。本章简要分析了避雷器的工作原理,进一步基于极低短路比下的直流送端交流电网模型分析抑制送端暂态过电压的能量耗散需求,提出了一种基于抑制需求的低残压避雷器参数设计方法,方法考虑了低残压避雷器的额定电压、额定电流、最大吸收能量、组数及响应时间等关键参数,提出了低残压避雷器关键参数整定流程,并分析低残压避雷器接入后对系统的影响,最后基于仿真验证了直流换相失败故障时低残压避雷器抑制送端暂态过电压的有效性。

3.2 避雷器的工作原理

避雷器被公认为当代最先进的过电压抑制器,其结构包括若干氧化锌阀片,它们被紧密压紧并密封在避雷器瓷套内,且具有优越的非线性特性^[64],在较高电压下,电阻很小,可以泄放大量电流,同时残压较低,相反,在电网正常运行电压下,电阻显著增大,仅有微安级漏电流,可视为断路,对系统没有任何影响。

避雷器的非线性电压-电流特性,也称伏安特性,是其作为限压元件的最为重要的性能。如图 3-1 为普通避雷器与高性能避雷器的伏安特性曲线对比^[65],从图中可以看出,随着电压的增大,避雷器的通流能力逐渐变强,可以起到泄放能量的作用,来抑制过电压。同时,高性能避雷器相比于普通避雷器具有更低的残压,能有效抑制过电压。根据避雷器两端电压大小,可以将其伏安特性分为三个区域:预击穿区、击穿区和回升区。在 A 点之前为预击穿区,在此区域避雷器呈现出高阻值,该区域的电压与电流接近线性关系,流过避雷器的电流为微安级以下,避雷器处于关断状态;在 A-B 之间为击穿区,此区域具有较高的非线性指数,其电流变化在 $10^{-6}\text{A}\sim 10^0\text{A}$,上升 6 个数量级,而电压仅变化不到 300kV。在 B 之后为回升区,非线性逐渐变小,直至最后消失,进入低阻值状态,这也是避雷器抑制过电压的区域。

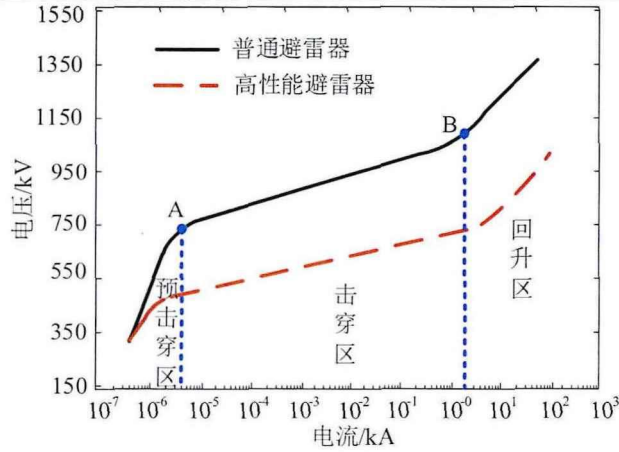


图 3-1 避雷器伏安特性曲线

3.3 基于低残压避雷器的弱送端过电压抑制方法

3.3.1 抑制弱送端暂态过电压的能量耗散需求分析

送端交流主网距离新能源基地较远，新能源基地缺乏常规电源支撑，导致新能源基地短路比极低，一般为 1.3 左右。由于有功功率在线路上传输时损耗较小，本文以图 2-4 中换流母线为例，推导抑制暂态过电压的有功耗散需求。在稳态时，由节点注入功率等于流出功率可知，换流母线上功率满足如下等式约束：

$$\begin{aligned} P_{dr} &= P_L + P_{LPV} - P_S \\ Q_{dr} &= Q_L + Q_{LPV} + Q_{cr} - Q_S \end{aligned} \quad (3-1)$$

当逆变侧发生换相失败后，由于整流侧定电流控制的调节，整流侧触发角 α 增大到 90° 以上，此时，直流电流增大，整流侧直流电压急剧下降，导致直流系统传输功率急剧下降，此时 $P_{dr} \approx 0$ 。若从送端交流系统的角度来看，直流系统发生换相失败相当于交流系统丢失容量为直流额定功率 P_d 的“大负荷”，会急剧影响送端交流系统潮流分布。为了让交流系统尽可能小的感受到这个“大负荷”的丢失，依然希望故障后汇入换流母线的功率等于之前稳态时的直流功率。因此，抑制送端过电压的有功耗散需求 P_{need} 如下所示：

$$P_{need} \geq P_{dr} \quad (3-2)$$

结合过电压持续时间可计算得到抑制送端过电压能量耗散需求 W_{need} ：

$$W_{need} = \int_{t_{str}}^{t_{end}} P_{need}(t) dt \quad (3-3)$$

式中： P_{need} ——有功耗散需求；

t_{str} ——避雷器开始耗散能量的时间；

t_{end} ——避雷器结束耗散能量的时间。

3.3.2 基于能量耗散需求的低残压避雷器参数设计

由 3.2 可知，避雷器的限压能力取决于其参数设计和配置组数，因此合理设计避雷器关键参数对送端过电压的抑制至关重要。低残压避雷器的关键参数设计主要考虑 5 个方面：触发电压（残压）、额定电流（荷电率）、最大吸收能量、配置组数及响应时间。

(1) 触发电压（残压）

触发电压是避雷器开始导通的电压阈值。较低的触发电压可以更早地启动避雷器，提供更好的保护，但可能会增加误触发的风险。较高的触发电压可能导致过电压穿越避雷器，影响保护性能。选择适当的触发电压取决于系统所需的过电压保护级别 U_N 。根据 3.3.1 中的抑制需求可知为了将过电压抑制在 1.3p.u. 值以下，触发电压应不大于 1.3p.u.。采用 1.3p.u. 的触发电压的低残压避雷器则更具有优势。

(2) 额定电流（荷电率）

额定电流是避雷器可以安全地承受的最大电流。选择适当的额定电流可以确保避雷器在过电压事件中不会被损坏或失效，而电流的大小与避雷器工作状态时的阻抗有关。有功功率与阻抗满足以下关系：

$$P = \sqrt{3} \frac{U^2}{|Z|} \cos \varphi \quad (3-4)$$

设送端交流母线电压由 U_L 升高为 U_L' 。由式(3-4)可知为了满足“有功耗散需求”，避雷器消耗的有功功率至少为 P_d ，且送端交流系统过电压水平为电压为 U_{acr}'' 时，一般最严重时过电压达到 1.4~1.5p.u. 左右，故额定电流的表达式为：

$$I_N = \frac{P_{arr}}{\sqrt{3} \cdot U_{acr}'' \cos \varphi} \quad (3-5)$$

式中： P_{arr} ——避雷器阻抗消耗的有功功率；

U_{acr}'' ——避雷器阻抗的对地电压；

φ ——避雷器功率因数角，且 $\cos \varphi = r/(r+x)$ 。

(3) 最大吸收能量

降低避雷器的触发电压后，避雷器在抑制过电压的过程中吸收的能量会相应增加，这就要求避雷器有足够的能量吸收能力。但对于不同系统故障工况，避雷器需吸收的能量也不同，本文考虑直流工程不同故障工况，基于 3.3.1 中“能量耗散需求”计算所需吸收的最大能量。换相失败期间直流系统几乎无法传输直流功率，因此避雷器至少需消耗 W_{need} 的能量。抑制过电压所需吸收的最大能量 E_{max} (kJ/kV) 可以表示为：

$$E_{\max} = \frac{W_{\text{need}}}{U_N} \quad (3-6)$$

式中: W_{need} ——能量耗散需求;

U_N ——避雷器的额定电压。

(4) 避雷器组数

假使避雷器的最大吸收能力 E_{arr} (kJ/kV)。避雷器的组数 n 可以通过以下方式计算:

$$n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{arr}}} \quad (3-7)$$

式中: $E_{\max}$ ——抑制过电压所需吸收的最大能量;

E_{arr} ——避雷器最大能量吸收能力, 可通过以下方式计算:

$$E_{\text{arr}} = \frac{E_r \cdot m}{K_I} \quad (3-8)$$

式中: E_r ——氧化锌阀片最大能量吸收能力, 国内通常在 15~21kJ/kV 范围内;

m ——并联避雷器阀片数, 通常对于超高压避雷器为 4;

K_I ——电流分布的不均匀系数, 通常取 1.1^[65]。

(5) 响应时间

响应时间指的是避雷器从触发到完全导通所需的时间。一般情况下过电压产生的时间是在故障发生后的 100ms 左右, 常见的避雷器响应时间为几纳秒至几微秒, 完全满足时间上的要求。

如图 3-2 为低残压避雷器参数设计流程图。方法主要包括两个部分: 参数计算和原因分析。首先按照上述计算方法逐一计算避雷器参数, 其次将避雷器安装至送端换流母线处进行仿真, 根据仿真结果判断过电压是否低于 1.3pu, 若是, 输出避雷器参数; 若否, 分析无法抑制过电压于 1.3p.u. 以下的原因, 再进行参数整定。

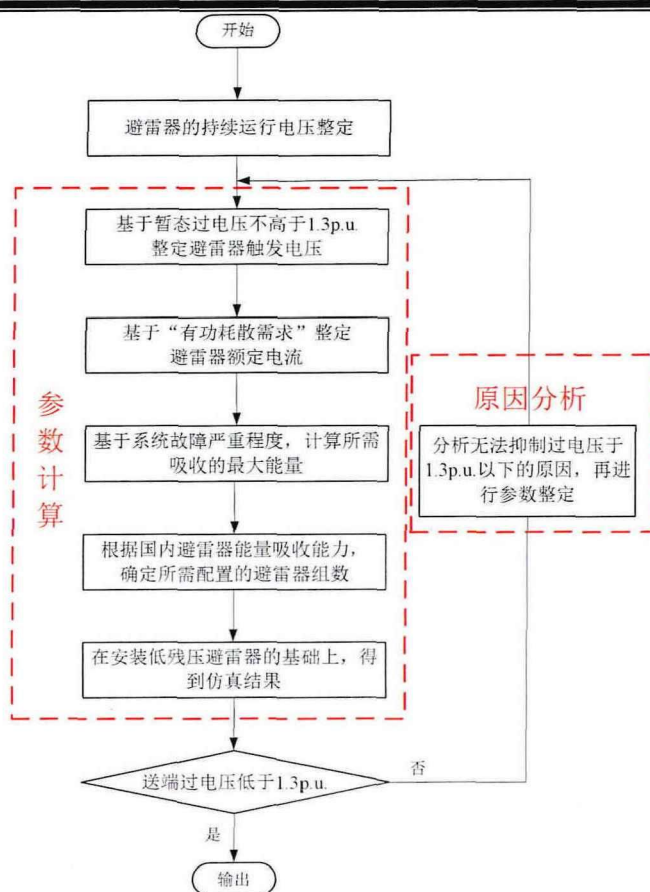


图 3-2 低残压避雷器参数设计流程图

3.3.3 低残压避雷器接入后对系统的影响分析

为了限制换相失败导致的送端暂态过电压，将避雷器并联在高压直流输电系统整流侧交流母线处，如图 3-3 所示。

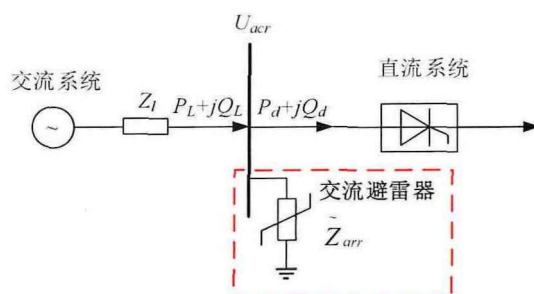


图 3-3 交流避雷器接入 LCC-HVDC 示意图

通过戴维南等值方法，交流避雷器接入后送端交流系统的等值阻抗如下式：

$$Z_{acr} = Z_l // \tilde{Z}_{arr} = \frac{Z_l}{\frac{Z_l}{\tilde{Z}_{arr}} + 1} \quad (3-9)$$

当系统正常运行时，避雷器阻抗 $\tilde{Z}_{arr}$ 处于高阻值（开路状态），阻值趋于无穷大， $Z_l / \tilde{Z}_{arr}$ 趋于 0，送端交流系统阻抗 Z_{acr} 几乎不变，因此对系统不会有任何影响。

当直流系统发生换相失败，送端产生过电压时，避雷器阻抗感受到电压上升，其阻值迅速减小，避雷器支路导通，此时 $Z_l / \tilde{Z}_{arr}$ 逐渐增大，送端交流系统等值阻抗 Z_{acr} 会减小，相当于减小了交流系统与直流系统的电气距离。交流系统短路容量 S_{acr} ，可表示为：

$$S_{ac} = \frac{3U_s^2}{Z_s} \quad (3-10)$$

式中： Z_s ——直流稳态运行时的交流系统等值阻抗；

U_s ——直流稳态运行时的系统等值电势。

由上述分析可知，换相失败发生后，大量无功涌入送端交流系统，避雷器感受到过电压，其阻抗减小，能够短时地增大系统短路容量。故障后送端交流母线暂态过电压 ΔU_{acr}^* 可以使用下式计算：

$$\Delta U_{acr}^* = \frac{\Delta Q_{acr}^*}{S_{ac}} \quad (3-11)$$

式中： ΔQ_{acr}^* ——压升阶段送端无功功率冗余量；

S_{ac} ——交流系统的短路容量。

由式（3-11）可知，短路容量 S_{ac} 增大使得送端交流母线暂态过电压 ΔU_{acr}^* 有所下降，故送端过电压得以抑制。同时故障期间，避雷器为无法输送到直流系统的有功功率提高一短时通道，通过耗散大量有功功率，为直流系统控制器争取反应时间，有利于直流系统的恢复，从而增大整流器消耗的无功功率，减小换流站无功盈余，进一步抑制送端过电压。

3.4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 2-4 所示的仿真模型，直流系统采用 CIGRE-HVDC 标准算例模型^[64,65]，设置送端短路比为 1.3 左右，通过仿真试验对比分析本文设计的低残压避雷器抑制送端暂态过电压的有效性。

3.4.1 低残压避雷器参数

通过反复迭代计算和大量仿真，基于弱支撑新能源直流外送系统模型，确定了低残压避雷器的技术参数，如表 3-1 所示。

表 3-1 低残压避雷器的技术参数

序号	技术参数	数值
1	触发电压（残压）	1.3p.u.
2	额定电流（荷电率）	1.08p.u.
3	最大吸收能量	$E_{max} \leq 246.15 \text{kJ/kV}$
4	响应时间	ns~us 级
5	避雷器组数	5 组

3.4.2 系统运行特性对比分析

通过如下 3 种工况分别对投入低残压避雷器后的系统运行特性进行对比分析。

工况 1：轻微故障（受端发生单相短路接地故障，接地电感 $L_f=0.7\text{H}$ ，故障持续时间为 0.02s）

工况 2：严重故障（受端发生单相短路接地故障，接地电感 $L_f=0.3\text{H}$ ，故障持续时间为 0.05s）

工况 3：两次换相失败故障（受端发生三相短路金属性接地故障，故障持续时间为 0.06s，引起直流系统发生两次换相失败）

如图 3-4 为轻微故障和严重故障下的低残压避雷器抑制过电压的曲线。系统轻微故障下，送端过电压水平达到了 1.279p.u.，站内安装 5 组低残压避雷器，可将换流站内过电压水平限制在 1.113p.u.左右。系统严重故障下，送端过电压水平达到了 1.381p.u.，站内投入 5 组低残压避雷器，可将送端过电压水平限制在 1.173p.u.左右。

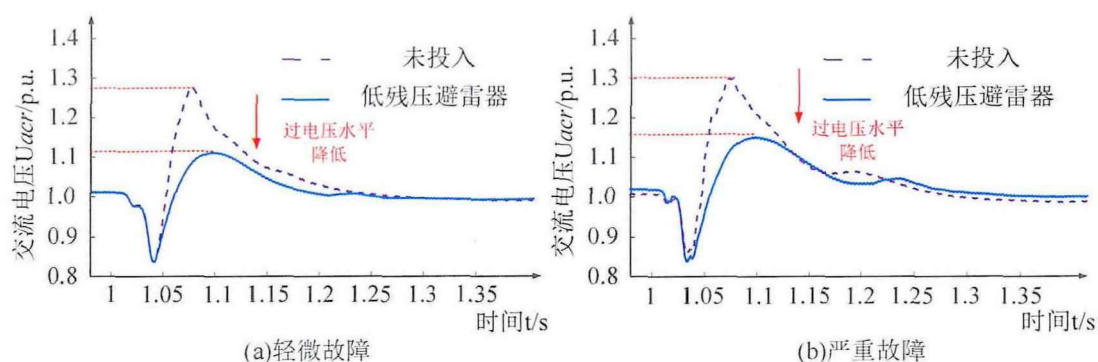


图 3-4 轻微故障和严重故障下的电压曲线

如图 3-5 为两次换相失败故障下的系统工况。由图 3-5 (c) 所示，直流电流突增两次，表明了直流系统发生两次换相失败。在首次换相失败时，送端交流系统的过电压水平高于 1.5p.u.，第二次换相失败发生时，过电压水平也达到了 1.4p.u.。投入低残压避雷器后，在换相失败期间，过电压作用下，迅速从高阻状态切换为低阻状态，泄放电流，从而限制过电压的幅值，进而直接使得站内无功补偿量减小，见图 3-5 (d)；同时使得整流侧直流电压在暂态过电压期间有所下

降, 见图 3-5 (f); 在直流控制系统的调控下, 使得直流电流进一步增大, 见图 3-5 (c)。图 3-5 清晰显示了应用本文所提抑制方法后, 促进了直流系统的恢复过程, 首次换相失败后不再出现电气量突变的情况。由于直流电流的增大和直流电压的减小, 此时整流器消耗的无功功率会增加, 此时, 整流侧无功盈余量减小, 送端瞬时过电压被抑制在 1.274p.u., 见图 3-5 (a)。但若随着故障严重程度进一步增大, 该方法存在难以将过电压抑制于 1.3p.u. 以下的可能, 因此下一步工作应该针对更为严重的故障和实际电网场景下, 提出一种更加全面的送端电网暂态过电压协调抑制策略。

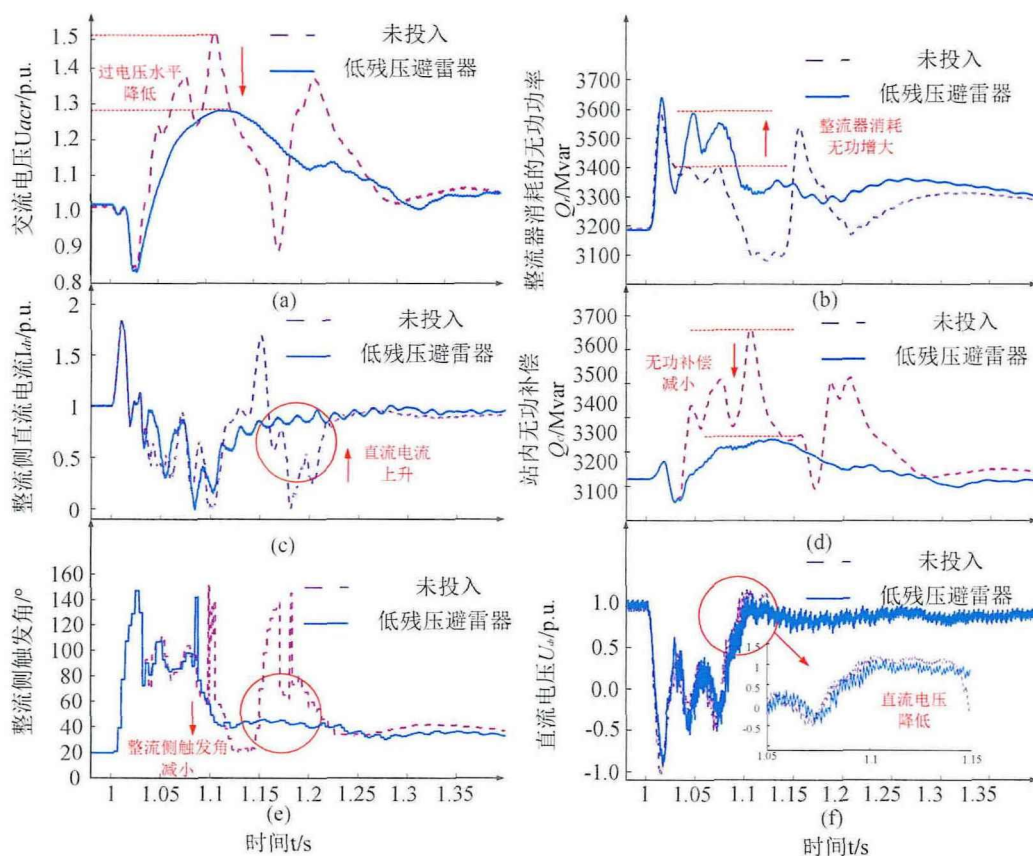


图 3-5 两次换相失败故障下的系统工况图

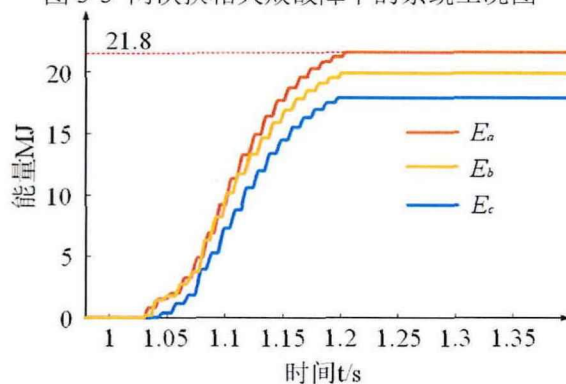


图 3-6 一台低残压避雷器的吸收能量

如图 3-6 为一台低残压避雷器的吸收能量曲线。根据前述计算和表 3-1 可知，理论上一台低残压避雷器每相所能吸收的最大能量为 22.079MJ，由图 3-6 可知，该台低残压避雷器 a 相吸收的能量最大，满足能量要求。

3.4.3 不同送端电网强度下的过电压抑制分析

为了进一步验证所提低残压避雷器对弱送端交流电网暂态过电压抑制效果，本文基于工况 3，调整送端电网强度，采用普通避雷器（OA）、高荷电率避雷器（HRA）与本文设计的低残压避雷器（LRA）进行对比分析暂态过电压抑制效果，对比结果如表 3-2 所示。

表 3-2 不同避雷器的过电压抑制效果

短路比	OA(p.u.)	HRA(p.u.)	LRA(p.u.)
1.3	1.344	1.325	1.274
1.6	1.329	1.317	1.256
1.9	1.313	1.298	1.243
2.2	1.301	1.273	1.231

经过仿真，综合所有情况，可将各种方案的抑制效果总结如下：

- （1）普通避雷器（OA）：对于工况 3（两次换相失败），在不同短路比下，普通避雷器均无法将过电压抑制在 1.3p.u. 以下。
- （2）高荷电率避雷器（HRA）：在短路比低于 1.9 时，高荷电率避雷器无法将过电压抑制在 1.3p.u. 以下；但短路比高于 1.9 可以将过电压抑制在 1.273p.u.~1.298p.u.。
- （3）低残压避雷器（LRA）：采用低残压避雷器在短路比极低的情况下，可以将过电压抑制在 1.231p.u.~1.274p.u.；在短路比高于 2 时，可将过电压水平限制到 1.25p.u. 以下。

由表 3-2 可见随着电网强度减弱，过电压幅值增量都逐渐增大，但低残压避雷器能够有效的抑制暂态过电压于 1.3p.u. 以下，可以有效保护送端电网抵御高压的危害。

3.5 本章小结

本章基于上一章所分析的直流换相失败引起的送端暂态过电压特性，研究了基于低残压避雷器的送端暂态过电压抑制方法，分析了抑制送端暂态过电压的能量耗散需求，并提出了基于抑制需求的低残压避雷器参数设计方法，分析了避雷器接入后对系统的影响。为了验证所提方法的正确性，以 CIGRE-HVDC 标准算例模型为例，研究了低残压避雷器在系统不同工况下、不同送端电网强度下的过电压抑制效果。结论如下：

- （1）本章所提的抑制方法无需复杂的控制策略，且不受通信延时、计算延

时等内在的控制延时影响，能够快速感受电压变化，及时作出抑制响应；并通过理论分析，系统正常运行时，避雷器的接入不会对系统产生影响。

(2) 根据所提的基于过电压抑制需求设计的低残压避雷器能够在送端短路比极低的情况下展现出较好的抑制效果。在系统不同工况下、不同送端电网强度下，与普通避雷器、高荷电率避雷器对比，低残压避雷器均能将过电压幅值抑制在 1.3p.u. 以下，表明本文所设计参数的低残压避雷器对暂态过电压抑制具有一定的可行性。

(3) 当逆变交流侧发生更为严重故障时，本章所提的基于低残压避雷器的暂态过电压抑制方法可能难以将过电压抑制于 1.3p.u. 以下，下一步工作应考虑实际送端整体电网可控电压资源，提出相应的协调抑制策略。

第4章 考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制策略

4.1 引言

由第 2 章研究可知,不同设备之间的响应时间和抑制效果存在差异,第 3 章的抑制方法在较为严重故障下,难以对送端新能源地区暂态过电压进行全局抑制,为了充分利用送端电网资源来抑制换相失败引发的送端电网暂态过电压问题,本章着重分析了直流送端电网的电压可控资源分布,在第 3 章的基础上并结合第 2 章不同设备间的时间滞后特性,提出了一种考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制框架,建立基于“整流站-新能源汇集点(PCC 点)-新能源场站”的暂态过电压抑制模型,形成完善有效的暂态过电压协调抑制策略,并采用“PSCAD-MATLAB”联合调用法求解模型,最后在不同工况下验证了本文策略的正确性。

4.2 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制框架

直流送端网架结构复杂,包含整流站、新能源汇集点及新能源场站,由于无功功率无法在线路上远距离传输,所以难以通过抑制一点过电压来达到抑制全局过电压的效果,本小节通过分析直流送端电压可控资源分布,给出考虑多设备响应特性的送端暂态过电压协调抑制框架。

4.2.1 直流送端电压可控资源分布

送端电网结构以整流站为中心呈辐射状发散,主要由“整流站-新能源汇集点(PCC 点)-新能源场站”构成,其中,整流站换流母线处的电压可控资源包括调相机、定电流控制环节和滤波器,新能源汇集母线处的电压可控资源包括调相机,新能源场站的电压可控资源包括静止补偿器(SVC),直流送端电网电压可控资源分布如图 4-1 所示。

由第 2 章的分析可知,定电流控制作为直流系统自身的控制策略,其控制延时为 4ms,但其控制对暂态过电压的较小,可作为协调控制的手段之一。调相机作为动态无功补偿设备,其自发无功响应延时为 0ms,但抑制效果有限;其励磁控制响应延时为 20ms,但抑制效果受控制参数的影响较大,可对其进行参数优化来达到最优。SVC 作为静态无功补偿设备,其控制响应延时为 20ms,由于其“反调效应”,若控制不当会对系统过电压进一步恶化,须对其进行电压阈值设置和参数优化。在第 3 章的研究中表明低残压避雷器可以自发、无延时的对暂态电压

进行控制，其控制延时为 0ms。

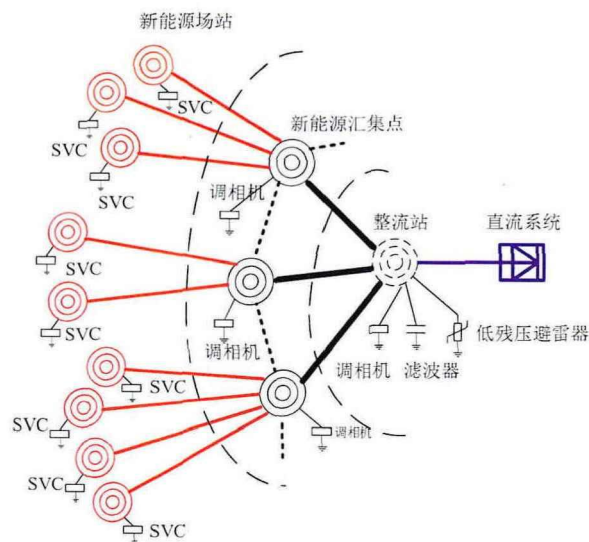


图 4-1 直流送端电网电压可控资源分布示意图

可将图 4-1 中的电压可控资源按空间尺度和时间尺度划分如表 4-1 所示。

表 4-1 电压可控资源分类

时间					
尺度	空间尺度	0ms	4ms	20ms	170ms
	整流站	低残压避雷器、 调相机自发响应	定电流控制环节	调相机励磁响应	滤波器
	新能源汇集点	调相机自发响应	无	调相机励磁响应、 SVC	无
	新能源场站	调相机自发响应	无	SVC	无

4.2.2 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制框架

由于暂态过电压时间短、速度快的特征，本节基于 4.2.1 小节提出考虑多设备响应特性的弱送端暂态过电压协调抑制框架。

根据不同设备的响应控制时间，给出“整流站侧-新能源汇集点侧-新能源场站侧”暂态过电压协调抑制框架如图 4-2 所示。

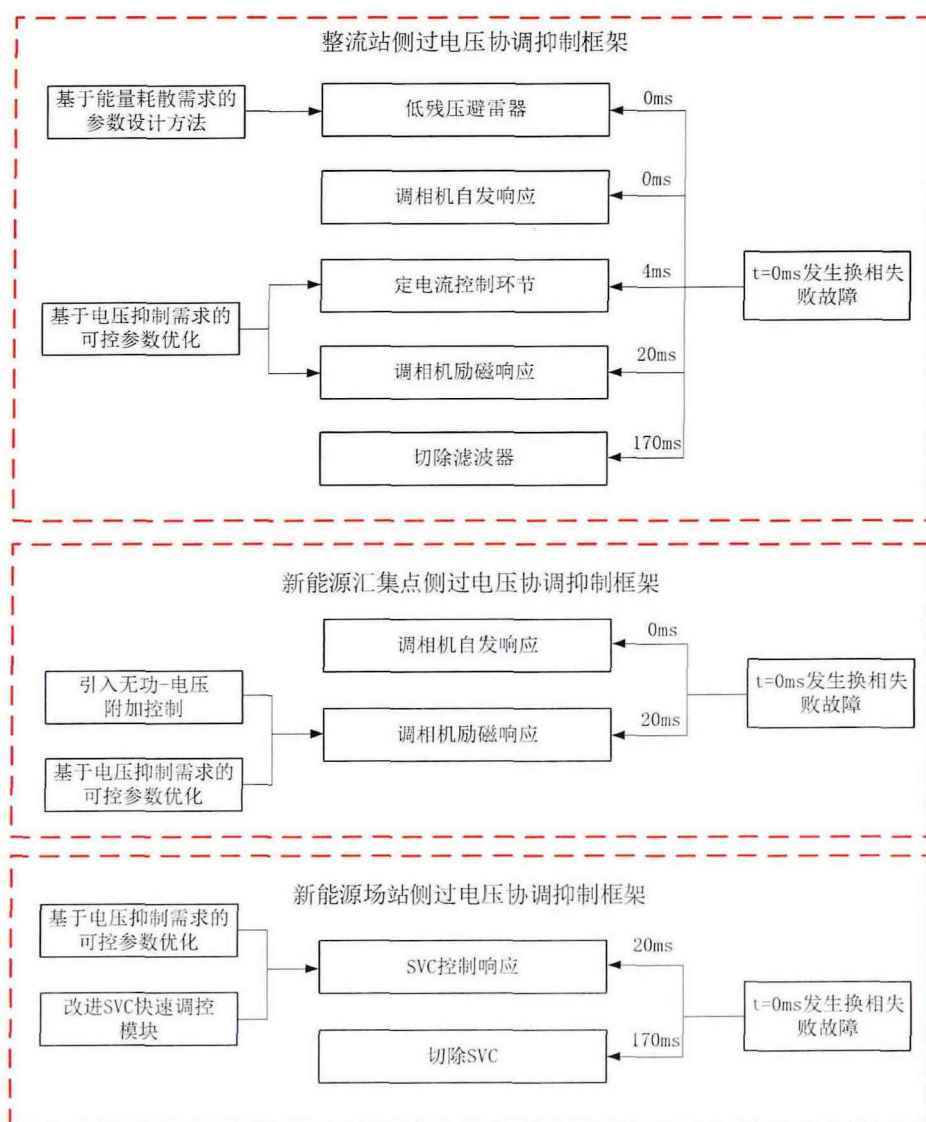


图 4-2 直流弱送端暂态过电压协调抑制框架

如图 4-3 所示为直流弱送端暂态过电压协调抑制框架时间尺度示意图。

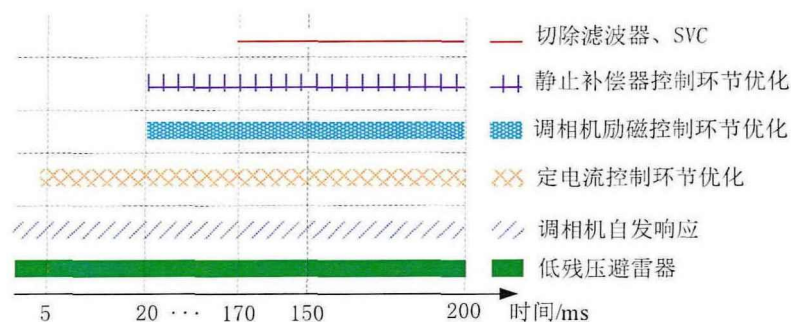


图 4-3 直流弱送端过电压协调抑制策略时间尺度示意图

4.3 考虑多设备响应特性的弱送端过电压协调抑制策略

4.3.1 整流站侧过电压协调抑制策略

为了充分挖掘整流站侧暂态过电压的抑制潜能，根据不同设备的响应时间，建立考虑多设备响应特性的整流站侧过电压协调抑制模型，如图 4-4 为整流站侧过电压协调抑制策略流程图。具体步骤流程如下：

- (1) $t=0\text{ms}$ 时，直流发生换相失败故障，整流站换流母线感受到电压上升，低残压避雷器、调相机自发响应抑制暂态过电压；
- (2) $t=4\text{ms}$ 时，若电压阈值超过 U_{th1} ，启动定电流控制环节参数优化；若否，则跳至第五步；
- (3) $t=20\text{ms}$ 时，若电压阈值超过 U_{th2} ，启动调相机励磁控制环节参数优化；若否，则跳至第五步；
- (4) $t=170\text{ms}$ 时，若电压阈值超过 U_{th3} ，切除整流侧多余滤波器；若否，则跳至第五步；
- (5) 系统恢复稳定运行。

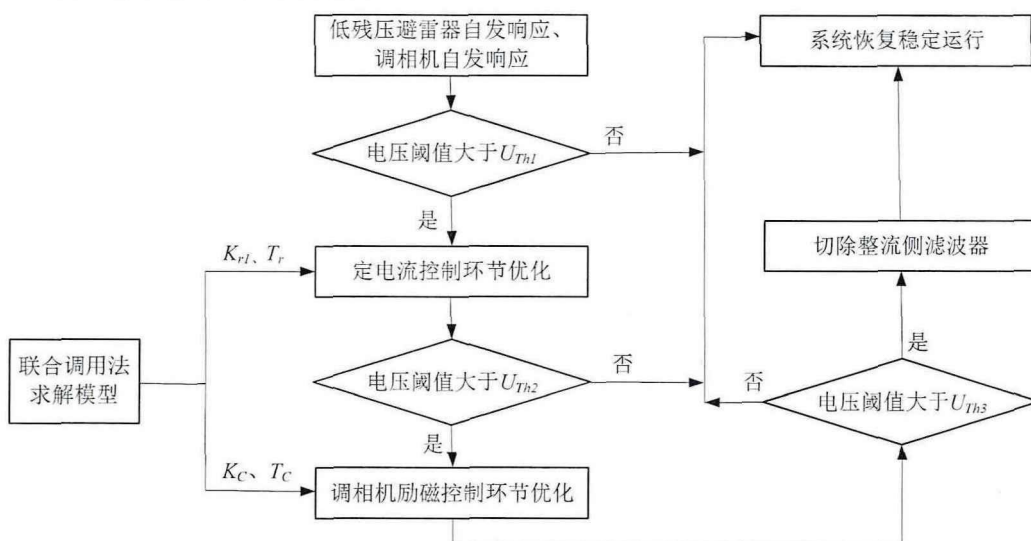


图 4-4 整流站侧过电压协调抑制策略流程图

4.3.1.1 定电流控制环节参数优化模型

定电流控制环节参数优化以暂态过电压峰值最低为目标函数，基于第 2 章的分析可知，选择定电流控制环节中的 PI 参数 K_r 和 T_r 为优化对象，建立定电流控制环节参数优化模型。当然，定电流控制环节参数在优化的过程中也必须满足以下约束：

(1) 功率平衡约束

如图 2-4 所示，在参数优化过程中，各节点同一时刻的注入有功必须和流出

有功、注入无功和流出无功必须满足潮流方程，则功率平衡约束可表示为^[63]：

$$\begin{cases} P_{in,i} - P_{out,i} - P_i(U, \theta) = 0 \\ Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_i(U, \theta) = 0 \end{cases} \quad (4-1)$$

式中： i ——第 i 节点；

in 、 out ——注入和流出；

P 、 Q ——有功功率和无功功率；

$P(U, \theta)$ 、 $Q(U, \theta)$ ——有功潮流方程和无功潮流方程。

(2) 定电流控制环节参数约束

定电流控制环节参数优化模型的 PI 参数存在上下限约束，可表示为：

$$\begin{cases} K_{min} \leq K_{r1} \leq K_{max} \\ T_{min} \leq T_r \leq T_{max} \end{cases} \quad (4-2)$$

式中： K_{min} 、 K_{max} 、 T_{min} 、 T_{max} ——PI 参数的最小、最大值。

综上所述，为了去除量纲，本文选用 $\arctan$ 函数法进行处理，因此目标函数 Z_{CC} 可表示为：

$$\begin{aligned} Z_{CC}(K_{r1}, T_r) = \min \left\{ [\arctan(U_{acr, max})] \cdot \frac{2}{\pi} \right\} \\ \begin{aligned} P_{in,i} - P_{out,i} - P_i(U, \theta) &= 0 \\ Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_i(U, \theta) &= 0 \\ K_{min} &\leq K_{r1} \leq K_{max} \\ T_{min} &\leq T_r \leq T_{max} \end{aligned} \end{aligned} \quad (4-3)$$

式中： Z_{CC} ——定电流控制环节参数优化的目标函数；

K_{r1} 、 T_r ——定电流控制环节的 PI 参数；

$U_{acr, max}$ ——换相失败故障期间整流站侧暂态过电压峰值。

4.3.1.2 调相机励磁控制环节参数优化模型

基于第 2 章的分析可知，选择调相机励磁控制环节中的参数 K_C 和 T_C 为优化对象。对于调相机励磁控制环节参数优化模型，除了需要考虑暂态过电压抑制效果外，还需考虑调相机的成本问题，因此在对调相机励磁控制环节参数进行优化处理时，需选取暂态过电压抑制峰值和调相机配置的经济性作为优化的目标。

调相机励磁控制环节参数优化模型的暂态过电压抑制峰值目标函数同 4.3.1.1，不再赘述。

本文调相机的经济性计算主要考虑三部分，第一投资成本；第二运维成本，年运维费用占投资成本的 5%，一般调相机的使用年限为 30 年；第三损耗成本，一般调相机的损耗率为 1.5%，调相机的损耗成本=设备容量×年最大利用小时数×损耗率×电价^[69]。所建立的调相机经济性目标函数 f_{SC} 如下所示：

$$f_{SC} = \sum_{i=1}^a (C_{SC,i} + 5\% \cdot 30C_{SC,i} + 1.5\% S_{SC,i} T_{mh} P) \quad (4-4)$$

式中: C_{SC} ——调相机的投资成本价格;

S_{SC} ——调相机总容量;

T_{mh} ——年最大利用小时数;

P ——电价。

当然, 励磁控制环节参数在优化的过程中也必须满足以下约束:

(1) 功率平衡约束

同 4.3.1.1, 不再赘述。

(2) 调相机容量约束

同步调相机的额定容量表达为其过励运行时的视在功率, 在欠励运行时, 其最大容量仅为过励时的 K_{SC} 倍, 其吸收的无功功率总量应保持在最大欠励容量之下, 即:

$$\frac{|Q_{SC,i}|}{K_{SC}} \leq Q_{SC,i}^N (i=1, 2, \dots, n_{SC}) \quad (4-5)$$

式中: $Q_{SC,i}$ ——调相机欠励运行时吸收的无功功率;

$Q_{SC,i}^N$ ——SVC 的额定容量;

i ——第 i 台静止无功补偿器;

K_{SC} ——一般取 0.5~0.6。

(3) 调相机参数上下约束

调相机励磁控制环节参数存在上下限约束, 可表示为:

$$\begin{cases} K_{\min} \leq K_C \leq K_{\max} \\ T_{\min} \leq T_C \leq T_{\max} \end{cases} \quad (4-6)$$

式中: $K_{\min}$ 、 $K_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ ——调相机励磁控制环节参数的最小、最大值。

综上所述, 调相机励磁控制环节参数优化目标函数为:

$$\begin{aligned} Z_{SC}(K_C, T_C) = \min & \left\{ [\arctan(U_{acr, \max}) + \arctan(f_{SC})] \cdot \frac{2}{\pi} \right\} \\ & P_{in,i} - P_{out,i} - P_i(U, \theta) = 0 \\ & Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_i(U, \theta) = 0 \\ & Q_{SC,i} \leq Q_N \\ & K_{\min} \leq K_C \leq K_{\max} \\ & T_{\min} \leq T_C \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (4-7)$$

式中: Z_{SC} ——调相机励磁控制参数优化的目标函数;

K_C ——励磁调节器放大增益;

T_C ——励磁调节器时间常数;

$U_{acr,max}$ ——换相失败故障期间整流站侧暂态过电压峰值；

f_{sc} ——调相机经济性目标函数。

4.3.2 新能源汇集点侧过电压协调抑制策略

由图 4-1 可知，新能源汇集点处仅有调相机作为暂态过电压抑制设备，因此，除了配备励磁控制参数优化外（同 4.3.1.2），在如图 2-20 中的额外输入电压信号 U_s 处引入无功-电压附加控制环节，改进后的调相机励磁控制框图如图 4-5 所示。

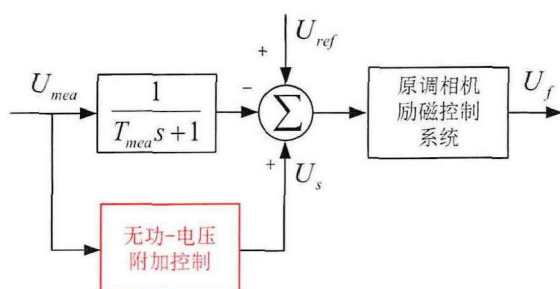


图 4-5 引入无功-电压附加控制后的调相机励磁控制框图

图 4-5 中的无功-电压附加控制如图 4-6 所示，将电压实测值 U_{mea} 与调度下发的新能源汇集处母线的参考电压 $U_{ref,V}$ 对比，计算得到所需调相机无功出力参考值 $Q_{ref,Q}$ ，与调相机输出无功 Q_{sc} 对比后，经过无功增益系数 K_Q 和电压补偿系数 A ，通过运算积分输入励磁控制系统，控制调相机进入深度进相运行，有助于系统恢复正常电压^[71]，其控制环节可以表示为：

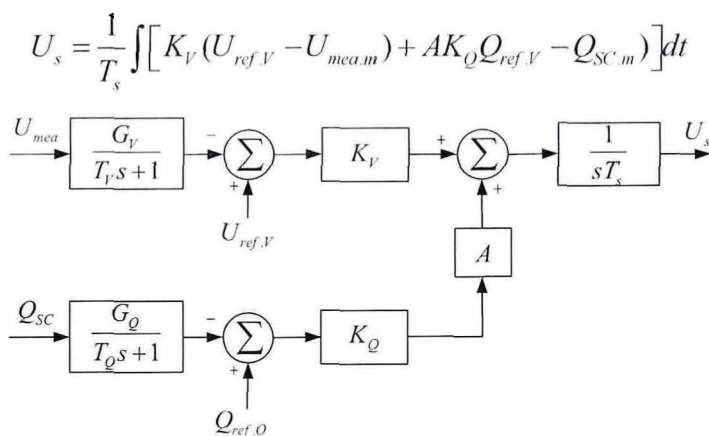


图 4-6 无功-电压附加控制框图

图中： U_{mea} 为电压实测值， $U_{ref,V}$ 为新能源汇集处母线的参考电压， Q_{sc} 为调相机输出无功； $Q_{ref,Q}$ 调相机无功出力参考值； G_V 、 T_V 分别为电压测量系数和测量时间常数； G_Q 、 T_Q 分别为无功功率测量系数和测量时间常数； K_V 、 K_Q 分别为电压、无功增益系数； A 为电压补偿系数。

如图 4-7 为新能源汇集点侧过电压协调抑制策略流程图。具体步骤流程如下：

(1) $t=0ms$ 时，直流发生换相失败故障，新能源汇集点母线感受到电压上升，

调相机自发响应抑制暂态过电压。

(2) $t=20\text{ms}$ 时, 若电压阈值超过 U_{thl} , 引入无功-电压附加控制, 同时启动调相机励磁控制环节参数优化; 若否, 则跳至第三步;

(3) 系统恢复稳定运行。

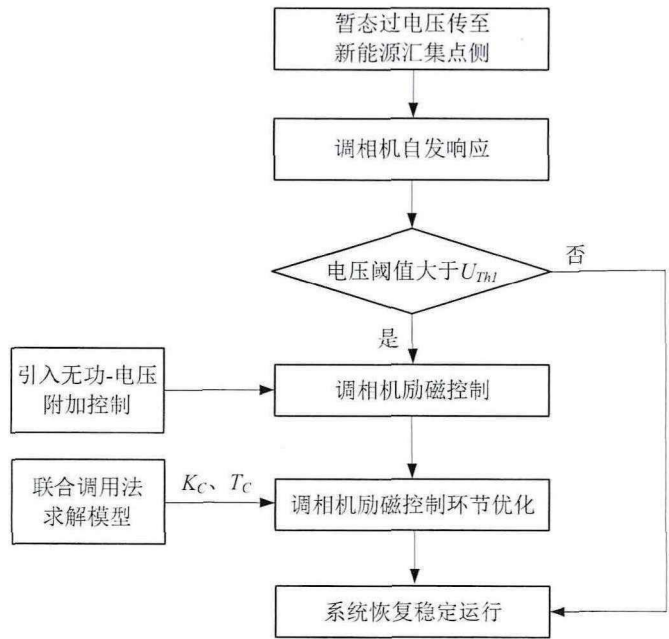


图 4-7 新能源汇集点侧过电压协调抑制策略流程图

4.3.3 新能源场站侧过电压协调抑制策略

由图 4-1 可知, 新能源场站处仅有唯一的 SVC 作为暂态过电压抑制设备, 但针对新能源场站广泛应用的 SVC 存在一个弊端, 即 SVC 所具有的“错位补偿”效应会恶化新能源场站的暂态过电压, 从而进一步引发风机脱网。文献[41]指出 SVC 的控制参数能够有效改善“错位补偿”效应, 本文提出基于改进快速调控模块的 SVC 控制策略, 来缓解 SVC “错位补偿”效应, 抑制新能源场站侧过电压。

由于换相失败引起的送端暂态过电压呈现出“先低后高”的特点, 且风机具有较强的低压穿越能力, 而对于过电压的抵抗能力较弱, 因此使得 SVC 在过电压的过程中尽可能减小无功输出, 即可有效缓解 SVC 的“错位补偿”效应^[41]。如图 2-17 所示, 对于传统的快速调控模块, 当母线处于低电压, 电压误差 V_{err} 大于 ΔV_H 时, B'_R 直接取 B'_{max} , 即 SVC 发出大量无功功率来抬升母线电压, 由于“错位补偿”效应, 当母线处于过电压时, SVC 来不及减小无功输出, 从而助增了过电压现象。为了避免这种现象, 结合阈值和输出值的选取, 改进 B'_{max} 为斜坡函数来减少低电压时 SVC 的无功输出。改进的快速调控模块如下式:

$$B'_R = \begin{cases} B'_{\max} + K_{SD}(V_{Err} - \Delta V_{ref}) & V_{Err} \geq \Delta V_H \\ B_R & \Delta V_H \geq V_{Err} \geq \Delta V_L \\ B'_{\min} & V_{Err} \leq \Delta V_L \end{cases} \quad (4-8)$$

式中: B'_R ——快速调控导纳值;

V_{Err} ——电压偏差;

ΔV_L 、 ΔV_H ——快速调控模块电压阈值;

$B'_{\max}$ 、 $B'_{\min}$ ——快速调控模块的最大导纳和最小导纳;

K_{SD} ——斜坡函数斜率;

ΔV_{ref} ——电压偏差参考值。

为了得到最优的斜坡函数斜率 K_{SD} 和电压偏差参考值 ΔV_{ref} , 本文建立基于 SVC 控制的新能源场站侧过电压协调优化模型。对于 SVC 控制环节参数优化模型, 除了需要考虑暂态过电压抑制效果外, 还需考虑 SVC 的成本问题, 因此在对 SVC 控制环节参数进行优化处理时, 选取暂态过电压抑制峰值和 SVC 配置的经济性两个角度作为优化的目标。本文以 SVC 中可控参数连续增益 K_{SVS} 、延迟时间常数 T_{S6} 、斜坡函数斜率 K_{SD} 和电压偏差参考值 ΔV_{ref} 为调整对象。当然, 新能源场站侧过电压协调优化模型须满足以下约束:

(1) 功率平衡约束

同 4.3.1.1, 不再赘述。

(2) SVC 容量约束

SVC 吸收的无功功率应小于可吸收的最大无功功率^[72], 可表示为:

$$|Q_{SVC,k}| \leq Q_{SVC,k}^N \quad (k=1, 2, \dots, n_{SVC}) \quad (4-9)$$

式中: $Q_{SVC,k}$ ——SVC 吸收的无功功率;

$Q_{SVC,k}^N$ ——SVC 的额定容量;

k ——第 k 台静止无功补偿器。

(3) SVC 的上下参数约束

本模型的控制变量为 SVC 可控参数连续增益 K_{SVS} 、延迟时间常数 T_{S6} 、斜坡函数斜率 K_{SD} 和电压偏差参考值 ΔV_{ref} 存在上下限约束, 可表示为:

$$\begin{cases} K_{SVS.min} \leq K_{SVS} \leq K_{SVS.max} \\ T_{S6.min} \leq T_{S6} \leq T_{S6.max} \\ K_{SD.min} \leq K_{SD} \leq K_{SD.max} \\ \Delta V_{min} \leq \Delta V_{ref} \leq \Delta V_{max} \end{cases} \quad (4-10)$$

式中: $K_{SVS.min}$ 、 $K_{SVS.max}$ —— K_{SVS} 参数的最小、最大值;

$T_{S6.min}$ 、 $T_{S6.max}$ —— T_{S6} 参数的最小、最大值;

$K_{SD.min}$ 、 $K_{SD.max}$ —— K_{SD} 参数的最小、最大值;

$\Delta V_{\min}$ 、 $\Delta V_{\max}$ —— ΔV_{ref} 参数的最小、最大值。

根据文献[73]内容，本文 SVC 的经济性计算方法如下所示：

$$f_{SVC} = \frac{1}{C_{\max}} (0.3Q_{SVC}^2 - 305.1Q_{SVC} + 127380) \quad (4-11)$$

式中： f_{SVC} ——SVC 的经济性计算公式；

$C_{\max}$ ——此刻容量约束条件下装置的最大投资费用；

Q_{SVC} 为 SVC 的安装容量。

综上所述，基于 SVC 的新能源场站侧过电压协调优化模型：

$$\begin{aligned} Z_{SVC}(K_{SVS}, T_{S6}, K_{SD}, \Delta V_{ref}) = \min & \left\{ [\arctan(U_{acr, \max}) + \arctan(f_{SVC})] \cdot \frac{2}{\pi} \right\} \\ P_{in,i} - P_{out,i} - P_i(U, \theta) &= 0 \\ Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_i(U, \theta) &= 0 \\ |Q_{SC,i}| &\leq Q_N \\ K_{SVS, \min} &\leq K_{SVS} \leq K_{SVS, \max} \\ T_{S6, \min} &\leq T_{S6} \leq T_{S6, \max} \\ K_{SD, \min} &\leq K_{SD} \leq K_{SD, \max} \\ \Delta V_{\min} &\leq \Delta V_{ref} \leq \Delta V_{\max} \end{aligned} \quad (4-12)$$

如图 4-8 为新能源场站侧过电压协调抑制策略流程图。具体步骤流程如下：

- (1) 确定新能源出力工况，建立基于 SVC 的新能源场站侧过电压协调优化模型；
- (2) 改进 SVC 快速调控模块，采用联合调用法求解模型，并将求解结果输出至 SVC 控制器；
- (3) 换相失败故障后， $t=20ms$ 时，SVC 控制响应抑制暂态过电压；
- (4) $t=170ms$ 时，若电压阈值小于 U_{Th} ，系统恢复稳定运行；若否，发出 SVC 闭锁退出信号，进一步抑制暂态过电压。

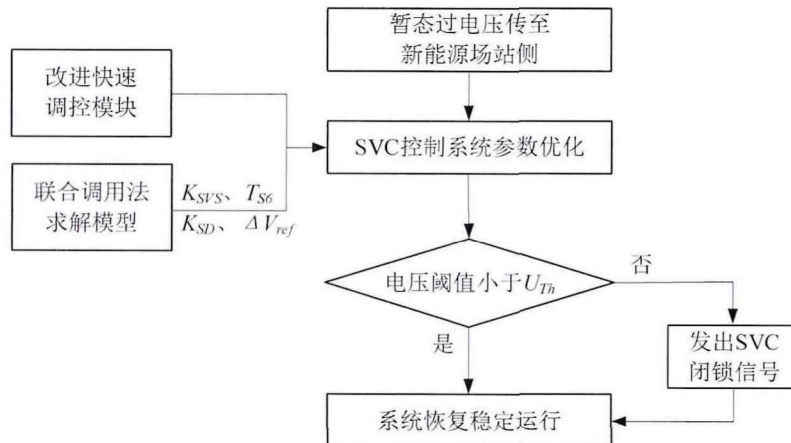


图 4-8 新能源汇集点侧过电压协调抑制策略流程图

4.4 联合调用算法

本文采用 PSCAD 与 MATLAB 联合调用算法^[74]求解 4.3 节中的优化模型，在电磁暂态仿真软件 PSCAD 上运行新能源弱送端经直流送出仿真模型以计算适应值，传输给 MATLAB 进行寻优，同时 MATLAB 将控制参数传输给 PSCAD 计算适应值，以此往复更新控制参数，实现 PSCAD 与 MATLAB 之间的数据实时交互。本文采用改进 MOPSO 算法作为优化算法来实现参数优化问题，如图 4-9 为联合调用与数据交互框图^[74]。

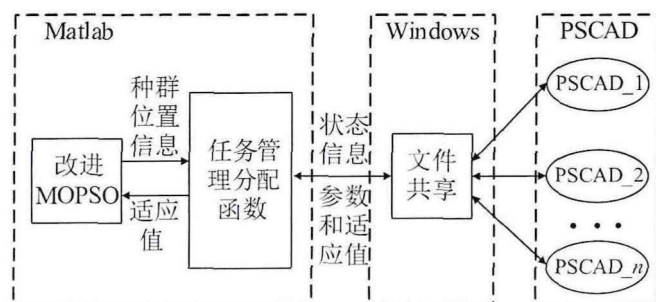


图 4-9 联合调用与数据交互框图

本文以 ITAE (Integrated Time and Absolute Error) 为参考指标^[74]，建立控制目标的适应度评价函数如下所示：

$$Y_i = \int_0^T t \times |y_{iref} - y_i| dt \quad (4-13)$$

式中：\$y_{iref}\$——相应的控制目标的参考值；

\$y_i\$——相应的控制目标的实际值；

\$T\$——积分上限动态过程时间；

\$t\$——时间。

本文选取暂态电压 \$U_{ITEA}\$ 和经济性指标 \$f_{ITEA}\$ 组成的二维向量 \$\mathbf{Y}\$ 作为适应值，为了简化分析同时具有代表性，本文采用一种简单的线性函数来实现归一化处理，如下式所示：

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_{i\max} - Y_i^k}{Y_{i\max} - Y_{i\min}} \quad (4-14)$$

如图 4-10 为模型控制参数优化流程图。主要流程如下：

(1) 初始化种群信息，计算初始适应值，初始化外部存储器，令迭代次数 \$j=1\$；

(2) 若 \$j < N_{loop}/2\$，利用基于拥挤度方法选取领导粒子；若否，利用基于隶属度方法选取领导粒子；

(3) 更新粒子信息，将领导粒子的参数 1 赋值给所有粒子；优化参数 2，将非支配解加入外部存储器并进行变异；选取领导粒子并更新粒子信息，将领导粒

子的参数 2 赋值给所有粒子；优化参数 1，将非支配解加入外部存储器并进行变异；

(4) 令 $j=j+1$ ，重复 (2)、(3)，直至到达最大的迭代次数。

(5) 将最优输出结果传输至各个控制器内，确定可实现最佳暂态过电压抑制效果。

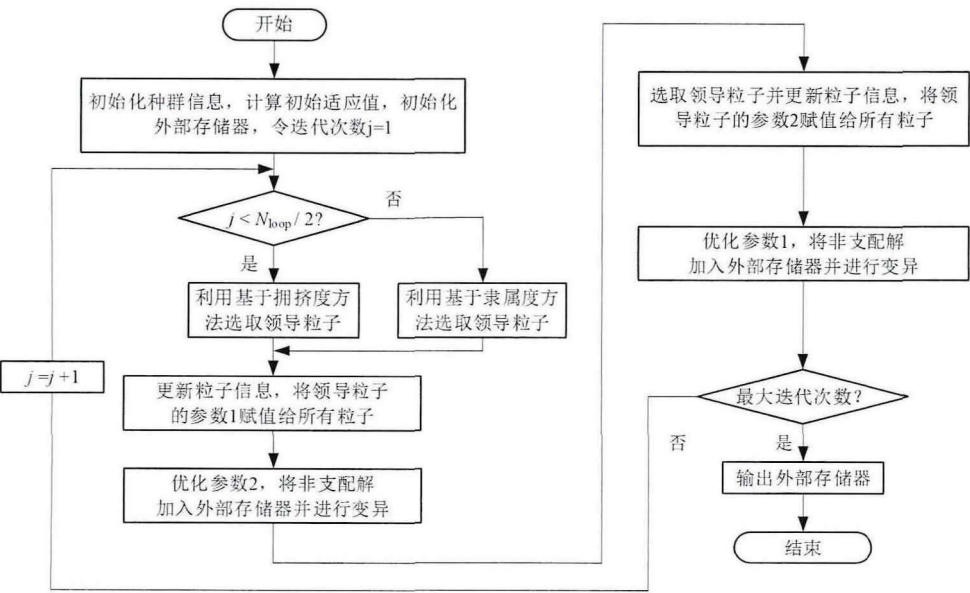


图 4-10 模型控制参数优化流程图

4.5 仿真分析

4.5.1 仿真模型

如图 4-11 为我国某直流工程送端拓扑结构，直流电压为 $\pm 800\text{kV}$ ，额定输送功率为 8000MW ，送端直流近区短路比为 1.3 左右，在 PSCAD/EMTDC 中建立所示的仿真模型。

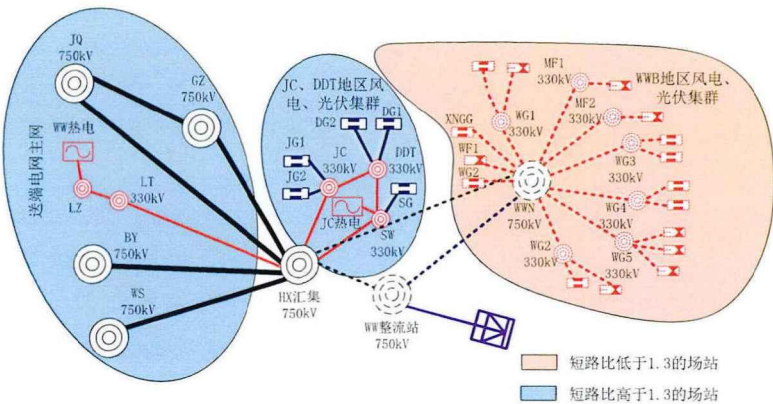


图 4-11 某 $\pm 800\text{kV}$ 直流工程送端拓扑结构

4.5.2 抑制策略对比分析

(1) 整流站侧过电压抑制策略

整流站侧过电压协调抑制策略如表 4-2 所示。

表 4-2 整流站侧过电压抑制策略

抑制策略	抑制方法
本文策略	0ms 时低残压避雷器主动抑制; 20ms 时优化定电流控制与调相机励磁控制系统参数协调抑制; 170ms 时切除多余滤波器
现有策略	调整调相机控制参数 ^[63]

(2) 新能源汇集点侧过电压抑制策略

新能源汇集点侧过电压协调抑制策略如表 4-3 所示。

表 4-3 新能源汇集点侧过电压抑制策略

抑制策略	抑制方法
本文策略	调相机无功-电压附加控制, 优化调相机励磁控制参数
现有策略	调整调相机控制参数 ^[63]

(3) 新能源场站侧过电压抑制策略

新能源场站侧过电压协调抑制策略如表 4-4 所示。

表 4-4 新能源场站侧过电压抑制策略

抑制策略	抑制方法
本文策略	SVC 改进快速调控模块, 优化 SVC 控制参数
现有策略	SVC 定电压控制 ^[63]

4.5.3 抑制效果对比分析

为了验证本文所提抑制策略的有效性, 通过如下 3 种工况对比验证本文所提策略、现有策略、无抑制策略的抑制效果, 故障类型均为受端发生三相接地故障, 故障持续时间为 0.2s, 引起直流换相失败。

工况 1: 直流外送功率 5000MW, 风电外送占比 50%, 即 2500MW。

工况 2: 直流外送功率 6000MW, 风电外送占比 60%, 即 3600MW。

工况 3: 直流外送功率 6400MW, 风电外送占比 80%, 即 5120MW。

4.5.3.1 工况 1

(1) 整流站侧过电压抑制效果对比

针对工况 1, 建立整流站侧过电压抑制模型, 求解模型, 得到各控制参数结果分别如表 4-5 所示。

表 4-5 整流站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	定电流控制参数		调相机励磁控制参数	
	K_{rI}	T_r	K_C	T_C
本文策略	0.42	0.07	40.00	0.02
现有策略	0.30	0.03	20.00	1.00

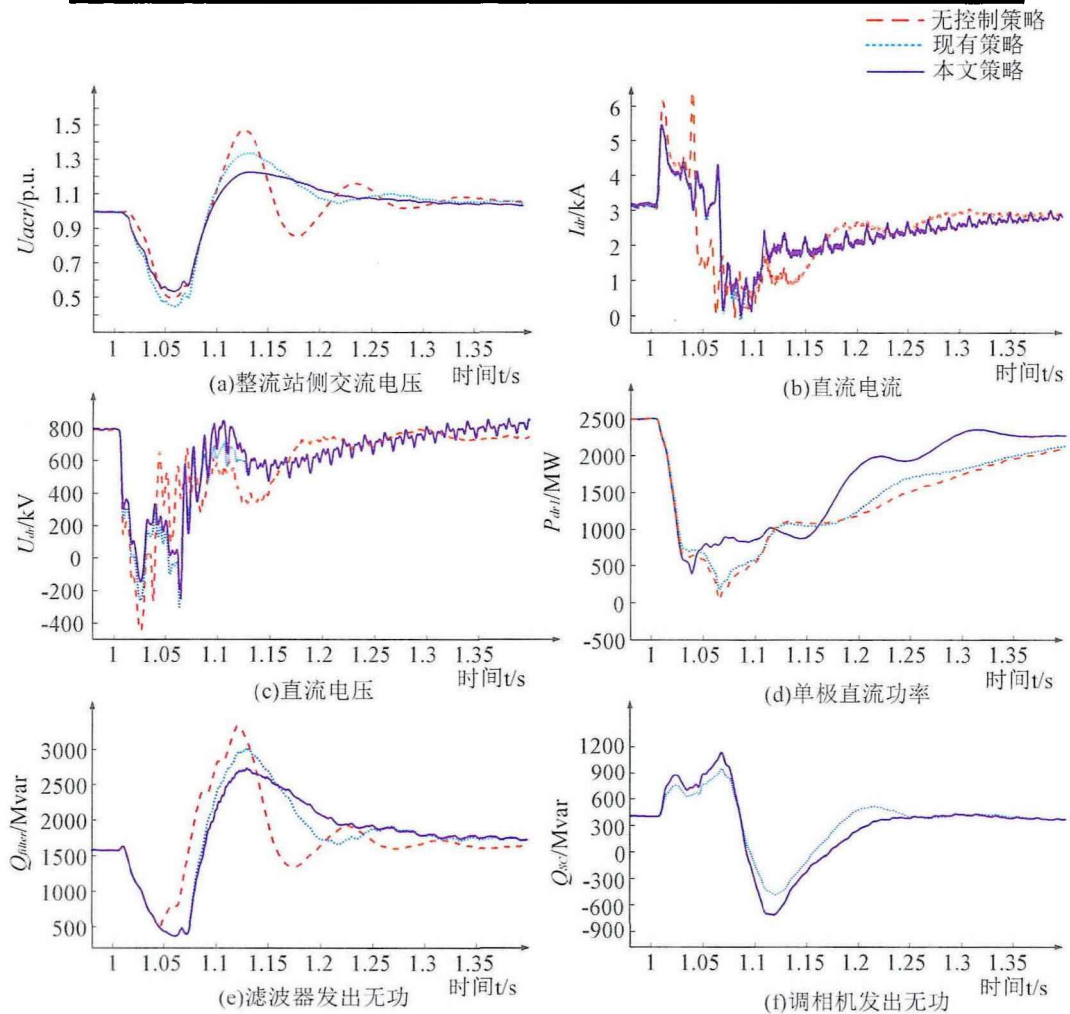


图 4-12 整流站侧电气量响应图（工况 1）

如图 4-12 展示了工况 1 下的整流站侧电气量响应图。在图 4-12 (b)、(c)、(d) 中，可见故障期间直流系统受到冲击较大，单极直流功率跌至 100MW 左右，直流电流和直流电压均跌落至较低水平，标志着系统发生换相失败；同时，在图 4-12 (a) 中显示，换相失败期间，交流系统过电压呈现出“先下后上”的时间尺度特性，进一步验证了第二章分析的正确性。在无抑制策略下，整流站侧交流过电压水平达到 1.484p.u.，在现有抑制策略的作用下，可将过电压水平抑制到 1.335p.u.，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.217p.u.，相较于于

无抑制策略下降了 0.267p.u., 相较于现有抑制策略下降了 0.118p.u., 能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下; 同时在本文抑制策略的作用下, 直流功率、直流电流和直流电压能够更迅速地恢复到正常水平, 进一步验证了本文抑制策略的优越性, 提升了整流站侧的电压安全裕度。

如图 4-12 (e) 为整流站侧交流滤波器发出的无功功率响应曲线, 在换相失败期间, 由于滤波器无法调节无功输出, 滤波器发出的无功呈现出“先下后上”的特征, 随着交流电压的变化, 大量冗余无功助增了整流站侧暂态过电压, 在本文抑制策略的作用下, 滤波器发出无功峰值由 3963MW 减少至 2625MW, 无功冗余大量减少。如图 4-12 (f) 为整流站侧投入的调相机发出的无功功率响应曲线, 与现有抑制策略对比, 在本文抑制策略下, 调相机在低电压期间能够多发出 233Mvar 无功功率, 在过电压期间能够多吸收 206Mvar 无功功率, 能够柔性的适应电压变化, 有效抑制暂态过电压。

(2) 新能源汇集点侧过电压抑制效果对比

针对工况 1, 建立新能源汇集点侧过电压抑制模型, 引入无功-电压附加控制, 求解算法, 得到控制参数结果分别见表 4-6 所示。

表 4-6 新能源汇集点侧过电压抑制模型结果

抑制策略	调相机励磁控制参数	
	K_C	T_C
本文策略	48.00	0.03
现有策略	20.00	1.00

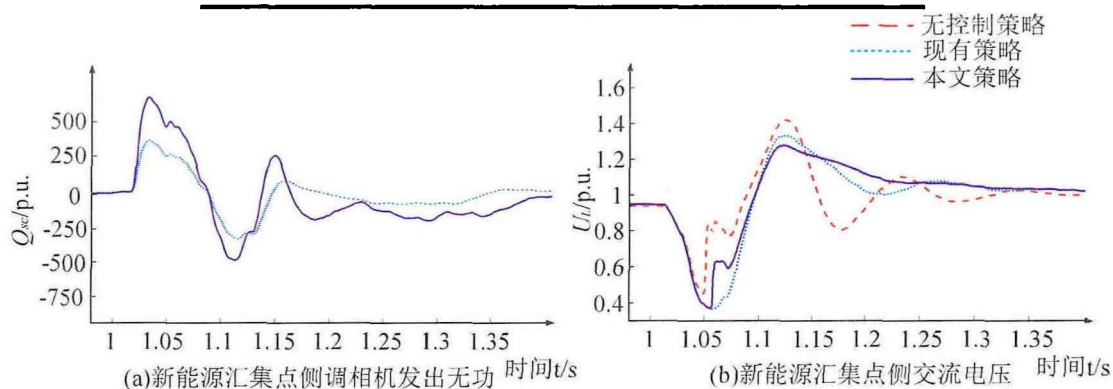


图 4-13 新能源汇集点侧电气量响应图 (工况 1)

如图 4-13 为工况 1 下的新能源汇集点侧电气量响应图。整流站侧过电压首先传导至新能源汇集点侧交流母线, 使得新能源汇集母线处流过电压水平达到 1.435p.u., 如图 4-13 (b) 所示, 在现有抑制策略的作用下, 可将过电压水平抑制到 1.343p.u., 无法将过电压抑制于 1.3p.u.以下, 但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.254p.u., 相较于无抑制策略下降了 0.181p.u., 相较于现有抑

制策略下降了 0.089p.u.，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下。如图 4-13 (a) 为新能源汇集点侧调相机发出无功响应曲线，在本文抑制策略的控制下，调相机在低电压时能发出更多的无功功率，在过电压时能吸收更多的无功功率，能够柔性的适应电压变化，充分发挥了调相机的无功-电压动态特性，有效抑制暂态过电压。

(3) 新能源场站侧过电压抑制效果对比

针对工况 1，建立新能源场站侧过电压抑制模型，引入改进快速调控模块，求解模型，得到结果分别见表 4-7 所示。

表 4-7 新能源场站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	SVC 励磁控制参数			
	K_{SVC}	T_{S6}	K_{SD}	ΔV_{ref}
本文策略	3.00	0.0075	0.03	0.05
现有策略	10.00	0.06	0	0

如图 4-14 为工况 1 下的新能源场站侧电气量响应图。如图 4-14 (b) 所示，整流站侧过电压经过新能源汇集点侧传导至新能源场站侧交流母线，使得新能源场站侧过电压水平达到 1.3p.u.以上，导致风机脱网。在现有抑制策略的作用下，可将过电压水平抑制到 1.293p.u.，在脱网限制边缘，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.213p.u.，相较于现有抑制策略下降了 0.08p.u.，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下，保障新能源机组安全稳定运行。如图 4-14 (a) 为新能源汇集点侧静止无功补偿器 (SVC) 发出无功响应曲线，由于 SVC 的错位补偿效应，现有策略控制下的 SVC 在 1.12s 过电压峰值到来时仍发出无功，助增了过电压峰值；而在本文抑制策略的控制下，SVC 在低电压时及时发出无功功率，在过电压时能够及时吸收更多的无功功率，避免了 SVC 的“错位补偿”效应，能够柔性的适应电压变化，充分发挥了 SVC 的无功-电压动态特性，有效抑制了暂态过电压。

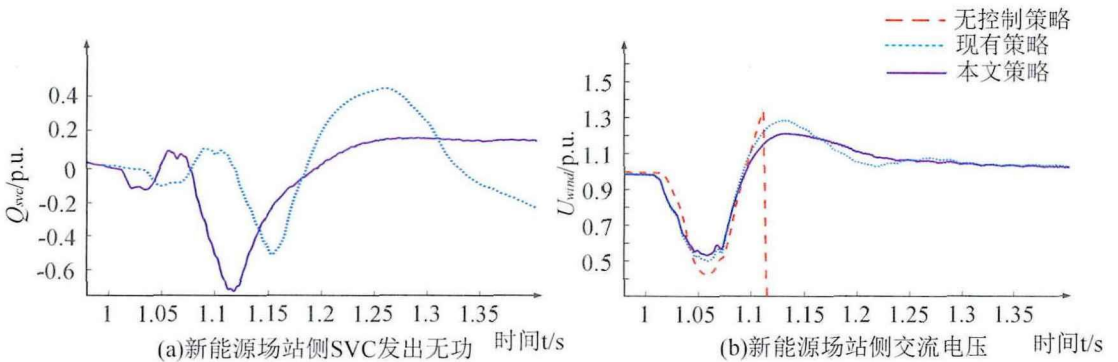


图 4-14 新能源场站侧电气量响应图 (工况 1)

4.5.3.2 工况 2

(1) 整流站侧过电压抑制效果对比

针对工况 2，建立整流站侧过电压抑制模型，求解模型，得到结果分别见表 4-8 所示。

表 4-8 整流站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	定电流控制参数		调相机励磁控制参数	
	K_{rl}	T_r	K_C	T_C
本文策略	0.45	0.05	42.00	0.03
现有策略	0.30	0.03	20.00	1.00

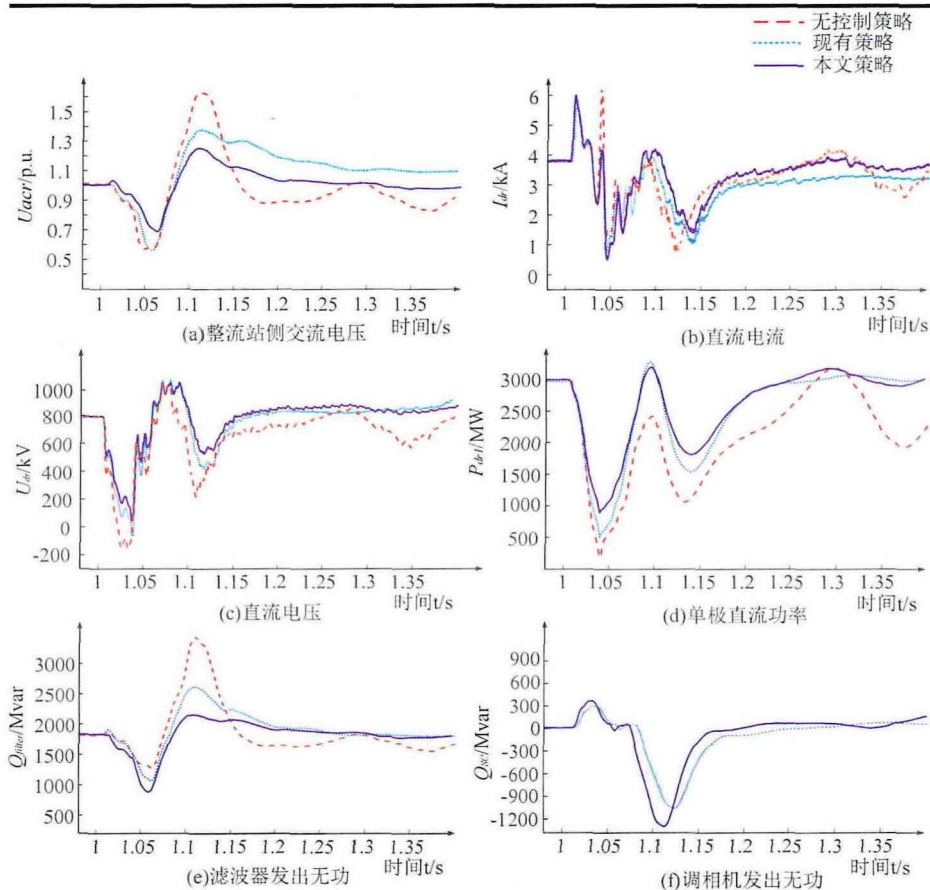


图 4-15 整流站侧电气量响应图（工况 2）

如图 4-15 为工况 2 下的整流站侧电气量响应图。如图 4-15（d）、（e）所示，随着直流传输功率的增大，稳态时整流站单极消耗的无功功率达到 1800MW 左右，则故障期间，将会有更多冗余的无功功率涌入送端交流系统，从而加剧暂态过电压峰值。如图 4-15（a）所示，发生换相失败后，无抑制策略下的整流站侧暂态过电压水平达到 1.623p.u.，在现有抑制策略的作用下，可将过电压水平抑制到 1.366p.u.，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.231p.u.，相较于

无抑制策略下降了 0.392p.u., 相较于现有抑制策略下降了 0.135p.u., 能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下; 如图 4-15 (b)、(c)、(d) 所示, 同时在本文抑制策略的作用下, 较现有抑制策略, 直流功率、直流电流和直流电压能够更快的恢复正常水平, 进一步验证了本文抑制策略的优越性, 增强了整流站侧电压安全裕度。

如图 4-15 (e) 为整流站侧交流滤波器发出的无功功率响应曲线, 在本文抑制策略的作用下, 滤波器发出无功峰值由 3563MW 减少至 2125MW, 无功冗余大量减少。如图 4-15 (f) 为整流站侧投入的调相机发出的无功功率响应曲线, 与现有抑制策略对比, 在本文抑制策略下, 调相机在低电压期间能够多发出 133Mvar 无功功率, 在过电压期间能够多吸收 306Mvar 无功功率, 能够柔性的适应电压变化, 有效抑制暂态过电压。

(2) 新能源汇集点侧过电压抑制效果对比

针对工况 2, 建立新能源汇集点侧过电压抑制模型, 引入无功-电压附加控制, 得到结果分别见表 4-9 所示。

表 4-9 新能源汇集点侧过电压抑制模型结果

抑制策略	调相机励磁控制参数	
	K_C	T_C
本文策略	50.00	0.04
现有策略	20.00	1.00

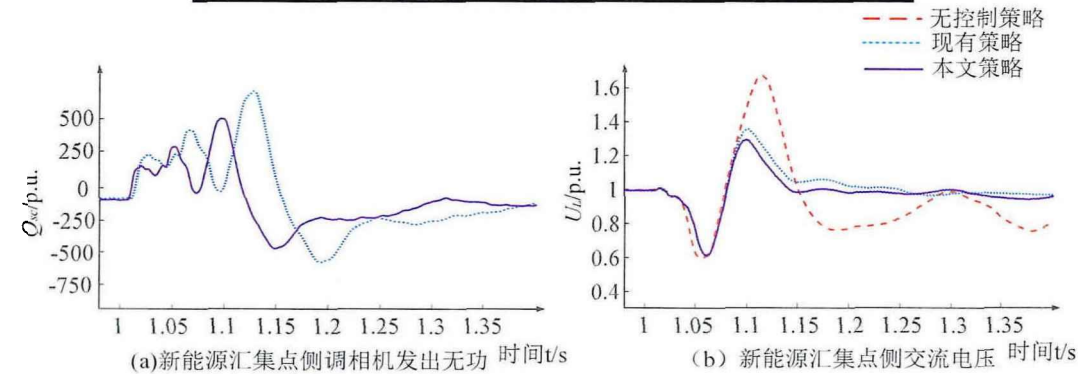


图 4-16 新能源汇集点侧电气量响应图 (工况 2)

如图 4-16 为工况 2 下的新能源汇集点侧电气量响应图。整流站侧过电压首先传导至新能源汇集点侧交流母线, 使得新能源汇集母线处流过电压水平达到 1.635p.u., 如图 4-16 (b) 所示, 在现有抑制策略的作用下, 可将过电压水平抑制到 1.351p.u., 无法将过电压抑制于 1.3p.u.以下, 但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.266p.u., 相较于无抑制策略下降了 0.369p.u., 相较于现有抑制策略下降了 0.085p.u., 能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下。如图 4-16 (a) 为新能源汇集点侧调相机发出无功响应曲线, 在本文抑制策略的控制下, 调相机在低电压时能发出更多的无功功率, 在过电压时能吸收更多的无功功率, 能够柔

性的适应电压变化，充分发挥了调相机的无功-电压动态特性，有效抑制暂态过电压。

(3) 新能源场站侧过电压抑制效果对比

针对工况 2，建立新能源场站侧过电压抑制模型，引入改进快速调控模块，求解模型，得到结果分别见表 4-10 所示。

表 4-10 新能源场站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	SVC 励磁控制参数			
	K_{SVC}	T_{S6}	K_{SD}	ΔV_{ref}
本文策略	3.00	0.008	0.03	0.05
现有策略	10.00	0.06	0	0

如图 4-17 为工况 2 下的新能源场站侧电气量响应图。

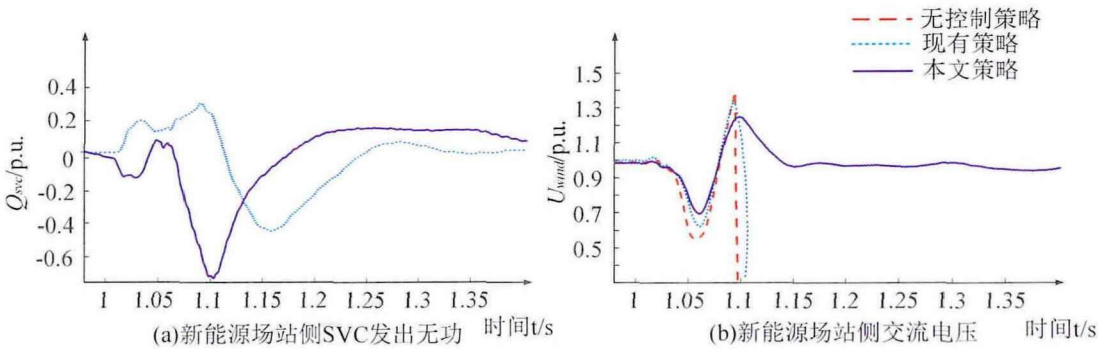


图 4-17 新能源场站侧电气量响应图（工况 2）

如图 4-17 (b) 所示，整流站侧过电压经过新能源汇集点侧传导至新能源场站侧交流母线，使得新能源场站侧过电压水平达到 1.3p.u.以上，导致风机脱网。在现有抑制策略的作用下，也无法将过电压水平抑制到 1.3p.u.以下，风机依然脱网，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.253p.u.，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下，保障新能源机组安全稳定运行。如图 4-17 (a) 为新能源汇集点侧静止无功补偿器（SVC）发出无功响应曲线，由于 SVC 的错位补偿效应，现有策略控制下的 SVC 在 1.1s 左右过电压峰值到来时仍发出无功，助增了过电压峰值。而在本文抑制策略的控制下，SVC 在低电压时及时发出无功功率，在过电压时能够及时吸收更多的无功功率，避免了 SVC 的“错位补偿”效应，能够柔性的适应电压变化，充分发挥了 SVC 的无功-电压动态特性，有效抑制了暂态过电压。

4.5.3.3 工况 3

(1) 整流站侧过电压抑制效果对比

针对工况 3，建立整流站侧过电压抑制模型，采用 4.4 节提出的联合调用算法求解模型，得到结果分别如表 4-11 所示。

表 4-11 整流站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	定电流控制参数		调相机励磁控制参数	
	K_{rI}	T_r	K_C	T_C
本文策略	0.42	0.07	45.00	0.45
现有策略	0.30	0.03	20.00	1.00

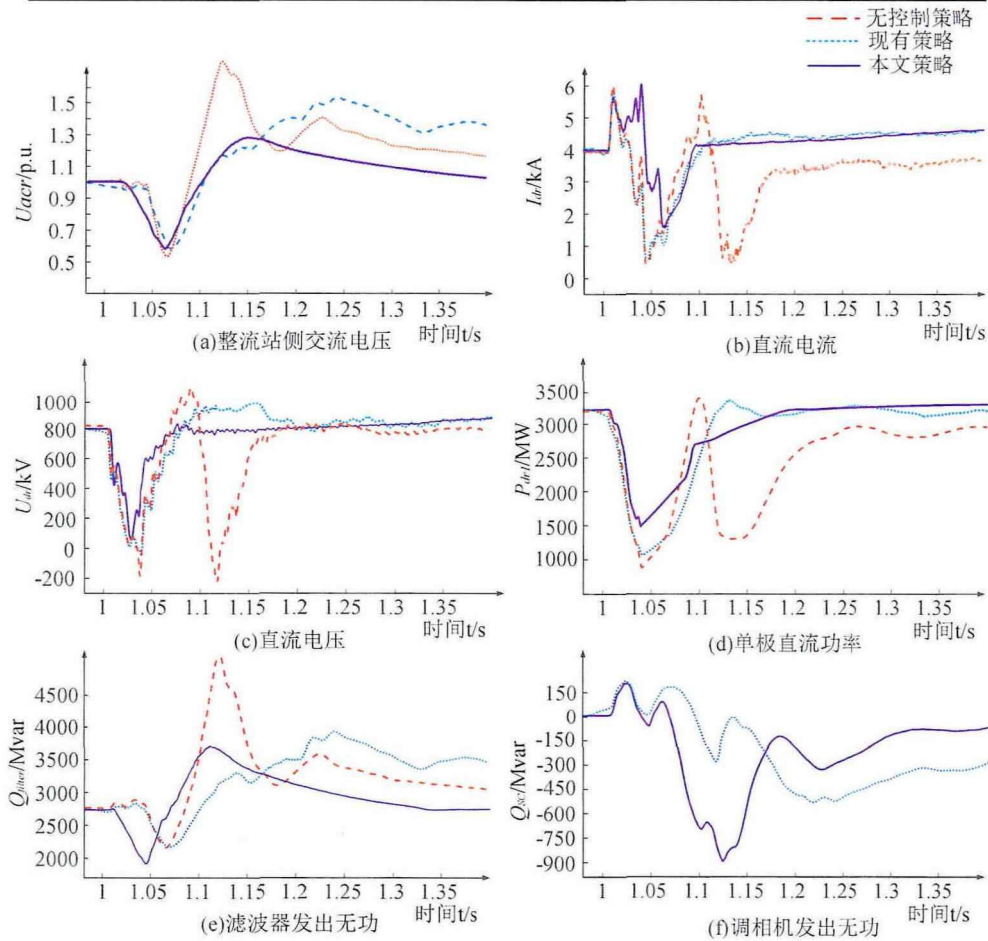


图 4-18 整流站侧电气量响应图（工况 3）

如图 4-18 为工况 3 下的整流站侧电气量响应图。如图 4-18（d）、（e）所示，随着直流传输功率的进一步增大，稳态时整流站单极消耗的无功功率达到 2700MW 左右，则故障期间，将会有更多冗余的无功功率涌入送端交流系统，从而加剧暂态过电压峰值。如图 4-18（a）所示，发生换相失败后，无抑制策略下的整流站侧暂态过电压水平达到 1.6p.u.以上，在现有抑制策略的作用下，只能将过电压水平抑制到 1.5p.u.左右，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.273p.u.，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下；如图 4-18（b）、（c）、（d）所示，同时在本文抑制策略的作用下，较现有抑制策略，直流功率、直流电流和直流电压能够更快的恢复正常水平，并且避免了二次换相失败，进一步验证了本文

抑制策略的优越性，增强了整流站侧电压安全裕度。

如图 4-18 (e) 为整流站侧交流滤波器发出的无功功率响应曲线，在本文抑制策略的作用下，滤波器发出无功峰值由 5000MW 减少至 3600MW，无功冗余大量减少。如图 4-18 (f) 为整流站侧投入的调相机发出的无功功率响应曲线，与现有抑制策略对比，在本文抑制策略下，调相机在过电压期间能够多吸收 360Mvar 无功功率，能够柔性的适应电压变化，有效抑制暂态过电压。

(2) 新能源汇集点侧过电压抑制效果对比

针对工况 3，建立新能源汇集点侧过电压抑制模型，引入无功-电压附加控制，求解模型，得到结果分别如表 4-12 所示。

表 4-12 新能源汇集点侧过电压抑制模型结果

抑制策略	调相机励磁控制参数	
	K_C	T_C
本文策略	50.00	0.05
现有策略	20.00	1.00

如图 4-19 为工况 2 下的新能源汇集点侧电气量响应图。整流站侧过电压首先传导至新能源汇集点侧交流母线，使得新能源汇集母线处流过电压水平达到 1.635p.u.，如图 4-19 (b) 所示，在现有抑制策略的作用下，可将过电压水平抑制到 1.4p.u.左右，无法将过电压抑制于 1.3p.u.以下，但在本文抑制策略的作用下，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下。如图 4-19 (a) 为新能源汇集点侧调相机发出无功响应曲线，在本文抑制策略的控制下，调相机在低电压时能发出更多的无功功率，在过电压时能及时吸收更多的无功功率，能够柔性的适应电压变化，充分发挥了调相机的无功-电压动态特性，有效抑制暂态过电压。

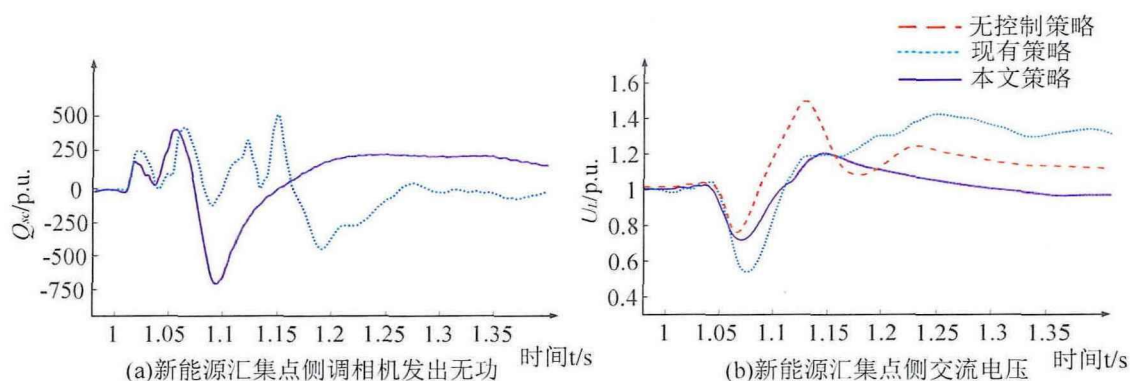


图 4-19 新能源汇集点侧电气量响应图 (工况 3)

(3) 新能源场站侧过电压抑制效果对比

针对工况 2，建立新能源场站侧过电压抑制模型，引入改进快速调控模块，求解模型，得到结果分别见表 4-13 所示。

表 4-13 新能源场站侧过电压抑制模型结果

抑制策略	SVC 励磁控制参数			
	K_{SVC}	T_{S6}	K_{SD}	ΔV_{ref}
本文策略	3.00	0.008	0.03	0.05
现有策略	10.00	0.06	0	0

如图 4-20 为工况 3 下的新能源场站侧电气量响应图。如图 4-20 (b) 所示，整流站侧过电压经过新能源汇集点侧传导至新能源场站侧交流母线，使得新能源场站侧过电压水平达到 1.3p.u.以上，导致风机脱网。在现有抑制策略的作用下，也无法将过电压水平抑制到 1.3p.u.以下，风机依然脱网，但在本文抑制策略的作用下可将过电压水平抑制到 1.258p.u.，能够有效抑制过电压幅值于 1.3p.u.以下，保障新能源机组安全稳定运行。如图 4-20 (a) 为新能源汇集点侧静止无功补偿器 (SVC) 发出无功响应曲线，由于 SVC 的错位补偿效应，现有策略控制下的 SVC 在 1.11s 左右过电压峰值到来时仍发出无功，助增了过电压峰值。而在本文抑制策略的控制下，SVC 在低电压时及时发出无功功率，在过电压时能够及时吸收更多的无功功率，避免了 SVC 的“错位补偿”效应，能够柔性的适应电压变化，充分发挥了 SVC 的无功-电压动态特性，有效抑制了暂态过电压。

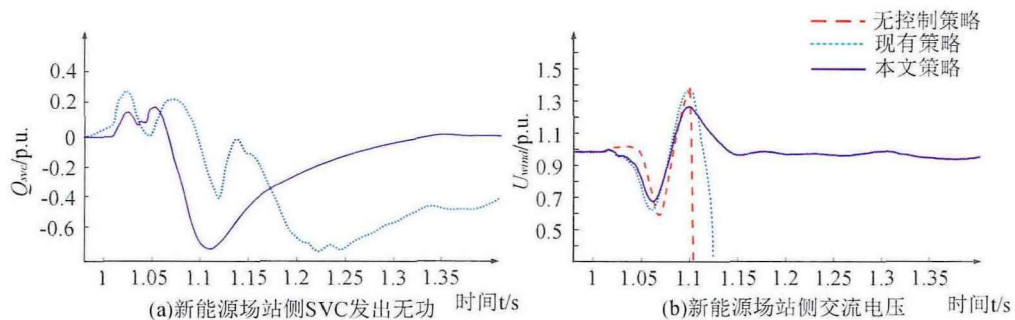


图 4-20 新能源场站侧电气量响应图 (工况 3)

4.6 本章小结

本章考虑了直流送端电压可控资源分布，提出了基于“整流站-新能源汇集点 (PCC 点)-新能源场站”的暂态过电压协调抑制模型，采用了 MATLAB-PSCAD 联合调用算法求解模型，并在三种不同工况下进行了仿真验证，得到以下结论：

(1) 直流送端由“整流站-新能源汇集点 (PCC 点)-新能源场站”构成，送端网架结构呈辐射状，整流站换流母线处的电压可控资源包括调相机、定电流控制环节和滤波器，新能源汇集母线处的电压可控资源包括调相机，新能源场站的电压可控资源包括静止补偿器 (SVC)。

(2) 针对直流送端暂态过电压的多时间尺度、多空间尺度的分布特性，本文提出了考虑多设备响应特性的送端暂态过电压协调抑制策略。整流站侧基于低

残压避雷器、定电流控制环节和调相机等设备协调抑制暂态过电压。新能源汇集点侧由于仅有调相机作为抑制设备，引入无功-电压附加控制改进调相机控制环节。新能源场站侧通过改进快速调控模块的 SVC 控制策略，缓解 SVC “错位补偿”效应，抑制新能源场站侧过电压。并基于 PSCAD-MATLAB 联合调用算法对各控制环节进行参数优化，得到最优参数。

（3）最后，本文基于我国某特高压直流示范工程，在三种不同工况下，对比验证本文策略、现有策略和无策略，结果表明，本文策略能够有效抑制换相失败后直流送端的暂态过电压问题，保障系统安全稳定运行。

第5章 结论与展望

5.1 结论

针对缺乏常规电源支撑且存在高比例新能源在直流近区集中接入的送端电网场景，直流系统换相失败引起的送端暂态过电压问题严重，进而增大了送端新能源发生高压脱网的风险，威胁电力系统的安全稳定运行。针对上述问题，本文提出了考虑多设备响应特性的暂态过电压协调抑制策略，得到以下结论：

（1）机理揭示与现有方法分析。从换相失败引起的直流送端暂态过电压的机理出发，揭示了其时间尺度和空间尺度特性；然后从时间滞后和电压调节特性角度，研究了直流控制系统、无功补偿设备和避雷器对暂态过电压的调节特性，并详细阐述了现有暂态过电压抑制方法的优缺点。

（2）提出了基于低残压避雷器的直流送端暂态过电压抑制方法。首先基于直流送端暂态过电压抑制要求，分析了抑制送端暂态过电压的能量耗散需求；考虑到普通避雷器难以满足能量耗散需求，提出了基于抑制需求的低残压避雷器参数设计方法，主要考虑了避雷器额定电压、额定电流、最大吸收能量、组数及响应时间等关键参数；并分析了低残压避雷器接入后对系统的影响，当系统正常运行时，避雷器处于高阻值（开路状态），对系统几乎没有影响，当直流系统发生换相失败，送端产生过电压时，避雷器阻值迅速减小，送端交流系统等值阻相当于减小了交流系统与直流系统的电气距离，增大了送端电网短路比。最后，基于 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电模型，验证了方法的正确性。

（3）提出了多设备响应特性暂态过电压协调抑制策略。首先描述了直流送端电压可控资源分布，针对直流送端暂态过电压的多时间尺度、多空间尺度的分布特性，提出了基于“整流站-新能源汇集点（PCC点）-新能源场站”的暂态过电压协调抑制模型，并基于PSCAD-MATLAB联合调用算法对各控制环节进行参数优化。最后，基于我国某特高压直流示范工程，在三种不同工况下，对比验证本文策略、现有策略和无策略，结果表明，本文策略能够有效抑制换相失败后直流送端的暂态过电压，保障系统安全稳定运行。

5.2 展望

由于本人的水平和时间精力有限，本文的相关研究内容未来仍可在以下方面进行深入研究：

（1）低残压避雷器参数的优化。本文所设计的低残压避雷器参数还需经过大量动模实验和系统调试确定终值，完善低残压避雷器的参数，进而使低残压避

雷器达到最佳控制效果。

(2) 考虑受端和风机自身参与暂态电压调节。本文所考虑的暂态过电压抑制方法均在送端，后续研究可基于本文抑制策略进一步挖掘受端调控措施和风机在直流换相失败故障期间的调控能力，进一步抑制换相失败期间送端暂态过电压问题。

参考文献

- [1] 李德鑫, 宗崇林, 黄大为, 等. 大规模风电汇聚外送的区域送端电力系统两级优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 35-44.
- [2] 刘振亚. 中国特高压交直流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(03): 567-574.
- [3] Ho-lk S., Hak-Man K. An algorithm for effective mitigation of commutation failure in high voltage direct current systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1437-1446.
- [4] 胡杰, 许刚, 齐立忠, 等. 基于沙戈荒新能源送出特性的特高压工程知识图谱构建技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 1-8+19.
- [5] 陈国平, 李明杰, 许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10.
- [6] 刘耀, 赵小令, 吴佳玮, 等. 高压直流海缆工程应用现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(02): 1-8.
- [7] Chun Y., Li F.T. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4764-4777.
- [8] 于强, 孙华东, 仲悟之, 等. 扎鲁特—青州特高压直流输电工程投运后东北电网的稳定特性及控制措施研究[J]. 电网技术, 2018, 42(07): 2023-2029.
- [9] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(02): 499-513+647.
- [10] 马冯挺. 探讨特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电力设备管理, 2021, (01): 43-44+65.
- [11] Marcelo. A.E., Rui F., Harold K., et al. Interarea oscillation damping control using high-voltage dc transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6).
- [12] Zhou H., Yao W., Ai X., et al. Comprehensive review of commutation failure in HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 205: 1-23.
- [13] Wang F., Liu T., Li X. Decreasing the frequency of HVDC commutation failures caused by harmonics[J]. IET power Electronics, 2017, 10(2): 215-221.
- [14] Sohrab M., Dong X., Dimitrios T, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [15] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术, 2020, 14(02): 1-9.
- [16] 郑旭. 特高压直流输电对系统安全稳定的影响及对策[D]. 武汉大学, 2016.
- [17] Zheng Z., Ren J., Xiao X., et al. Response mechanism of DFIG to transient voltage

- disturbance under commutation failure of LCC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6). 2972-2979.
- [18] Yang Z., Yao D., Zhang B., et al. Study of coherency-based dynamic equivalent method for power system with HVDC[C]. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 2013-2016.
- [19] Hafeez K., A Khan S. High voltage direct current (HVDC) transmission: future expectation for Pakistan[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 92-86.
- [20] Zhang M., Yuan X., Hu J. Mechanism analysis of sub-synchronous torsional interaction with PMSG-based WTs and LCC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1708-1724.
- [21] Zhao Y., Yan G., Wang Z., et al. Analysis of sub-synchronous torsional vibration of wind-thermal bundling delivery system via LCC-HVDC[C]. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Hefei, China, 2023: 1139-1144.
- [22] 孙家豪. 高压直流换相失败对送端电网电压的影响研究[D].河北工业大学, 2020.
- [23] 赵晋泉, 朱尧靓, 潘尔生, 等. 适用于大规模新能源接入直流送端电网的暂态压升严重性指标研究[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 1-9.
- [24] Yin C., Li F. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021,36(5): 4764-4777.
- [25] 于思奇, 孙大卫, 吴林林, 等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J].电力自动化设备, 2023: 1-12.
- [26] Li X., Liu Y., Li. T., et al. Study on the impact of commutation failure on AC voltage of rectifier-side in UHVDC[C]. 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014: 2153-2161.
- [27] Zhang T., Yao J., Sun P., et al. Improved continuous fault ride through control strategy of DFIG-based wind turbine during commutation failure in the LCC-HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(1): 459-473.
- [28] Tu J., Zhang J., Ma S., et al. Mechanism analysis and control measures of wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies[C]. 12th IET international Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), Beijing, 2016: 1-7.
- [29] 拜润卿, 郝如海, 史玉杰等. 特高压直流送端近区风机暂态过电压实测与分析[J]. 电气自动化, 2019, 41(04): 14-15+60.
- [30] Wang T., Pei L., Wang J., et al. Overvoltage suppression under commutation failure

- based on improved voltage-dependent current order limiter control strategy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 4914-4922.
- [31] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [32] 屠竞哲, 张健, 曾兵, 等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2131-2139.
- [33] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 交流电网强度对模块化多电平换流器 HVDC 运行特性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 17-24.
- [34] Liang W., Shen C., Sun H., et al. Overvoltage mechanism and suppression method for LCC-HVDC rectifier station caused by sending end ac faults[J]. IEEE Transaction Power Delivery, 2022: 1-4.
- [35] 马为民, 蒲莹, 宫勋. 适应高比例新能源电源外送的特高压直流控制器[J]. 电网技术, 2023, 47(03): 1262-1268.
- [36] 崔洁豪. 交直流电网暂态电压特性评估和控制研究[D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [37] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(06): 1839-1844.
- [38] 腾予非, 汤涌, 张鹏, 等. 基于直流输电无功控制的多直流馈出电网交流系统过电压最优抑制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3846-3853.
- [39] 林圣, 兰菲燕, 刘健, 等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 3-16.
- [40] 刘超, 黎涛, 王华. 静止无功补偿器接入的配网短路故障特征及保护整定策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(06): 113-117.
- [41] 郑超. SVC 错位补偿对风机高电压脱网威胁及应对措施[J]. 电网技术, 2016, 40(09): 2750-2757.
- [42] Qi J., Zhao W., Bian X. Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration[J]. IEEE Access, 2020, 8:209878-209885
- [43] 郭春义, 张岩坡, 赵成勇, 等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 99-106+16.
- [44] Liang Z.H., Shi C., Li Y.S. Mechanism of STATCOM assisting transient voltage under commutation failure at weak sending end system and its optimization strategy[J]. Electric Power Construction, 2022: 66-74.
- [45] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(01): 22-28.
- [46] Chen X.J., Chen W.J., Shen H.B., et al. Flexible measures to depress switching

- overvoltage in UHV transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 1-5.
- [47] Chen X.J., Chen W.J., Shi W.D., et al. Parameter selection and prototype development of UHV AC switch type controllable arrester[J]. Power System Technology, 2018, 42(06): 1981-1986.
- [48] 陈秀娟, 陈维江, 时卫东, 等. 特高压交流开关型可控避雷器的参数选择和样机研制[J]. 电网技术, 2018, 42(06): 1981-1986.
- [49] Liu Z.H., Wang S.W., Zhong Z.Y. Controllable and adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. CSEE, 2021, 41(2): 514-524.
- [50] 张寒. 高比例新能源经直流送出系统的建模及暂态过电压问题研究[D]. 华北电力大学, 2022.
- [51] 刘杉, 谭开东, 姜喆, 等. 基于可控自恢复消能装置的直流送端暂态过电压抑制方法[J]. 电力系统自动化: 1-15.
- [52] Wang C., Zhang C., Kong X., et al. Procedure analysis of UHVDC commutation failure[J]. Eng, 2019, (16): 3132-3134.
- [53] Li D.D., Gao Y., Sun M.X. A general self-adaptive DC current control of LCC-HVDC for eliminating subsequent commutation failure[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2023, 38(3):2232-2235.
- [54] 谢爵昊. HVDC 控制系统动态性能影响因素分析与换相失败抑制策略研究[D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [55] Xiao H., Li Y., Lan T. Sending end AC faults can cause commutation failure in LCC-HVDC inverters[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2020,35(5): 2554-2557.
- [56] Xiao H., Duan X. and Li Y. Analytically evaluating the impact of voltage stability on commutation failure in multi-infeed LCC-HVDC systems[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2022,37(1):496-506.
- [57] 黄梦华, 汪娟娟. 低压限流环节优化控制策略综述[J]. 广东电力, 2018, 31(10):10-19.
- [58] 刘晓明, 慈文斌, 刘玉田. 直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J]. 电力系统自动化设备, 2017, 41(06): 154-158.
- [59] Rita M.M.P., Carlos M.M.F., Fernando M.B. Comparative study of STATCOM and SVC performance on dynamic voltage collapse of an electric power system with wind generation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(2).
- [60] 李志, 韩颖, 李岩松. 换相失败下直流送端 SVC 无功反调机理分析及控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(09): 153-159.
- [61] Jovcic D., Pahalawaththa N., Zavahir M. Investigation of the use of inverter control strategy instead of synchronous condensers at inverter terminal of an HVDC

- system[J]. IEEE Transaction Power Delivery, 2000,15(2): 704-709
- [62] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(07): 2095-2102.
- [63] 朱丽萍. 基于高压直流闭锁故障的新能源送端电网暂态过电压控制策略[D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [64] Zakir H.R., Zhe C., Paul T., et al. Dynamic reactive power compensation of large-scale wind integrated power system[J]. IEEE Transaction Power Systems, 2015, 30(5): 2516-2526.
- [65] He J., Li C., Hu J., et al. Elimination of closing resistors for breakers in 1000-kv UHV system by surge arresters[J]. IEEE Transaction Power Delivery, 2012, 27(4): 2168-2175.
- [66] Tamai S., Naitoh H., Ishiguro F., et al. Fast and predictive HVDC extinction angle control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1268-1275.
- [67] Ouyang J., Zhang Z., Li M., et al. A predictive method of LCC-HVDC continuous commutation failure based on threshold commutation voltage under grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 118-126.
- [68] 黄梦华, 傅闯, 汪娟娟等. 单相接地时高压直流换相电压相位偏移量特性[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 162-168.
- [69] 孙鹏伟, 姚文峰, 黄东启等. STATCOM 与新型调相机的技术性和经济性比较[J]. 南方电网技术, 2021, 15(01): 82-88.
- [70] Lucas R. Nahid A.M., Tapan K.S., et al. Optimal allocation of synchronous condensers in wind dominated power grids[J]. IEEE Access, 2020, 8: 45400-45410.
- [71] 曾赞. 基于换相失败的高比例新能源直流送端电网暂态电压控制策略[D]. 华北电力大学(北京), 2022.
- [72] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京:机械工业出版社, 2013:38-40.
- [73] Gacem A., Benattous D. Hybrid GA-PSO for optimal placement of static var compensators in power system[J]. International Journal of System Assurance Engineering & Management, 2017, 8(1): 247-254.
- [74] 谢国超, 凌博文. 基于改进 MOPSO 的 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化[J]. 现代电力, 2018, 35(04): 87-94.