

华北电力大学

专业硕士学位论文

考虑柔性直流承载能力的受端电网动态无功
补偿优化

**Dynamic Reactive Compensation Optimization of
Receiving-end Power Grid Considering MMC-HVDC
Carrying Capacity**

牛纪伟

2022 年 5 月

国内图书分类号：TM713
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

考虑柔性直流承载能力的受端电网动态无功 补偿优化

硕士研究生：牛纪伟

导师：刘崇茹教授

企业导师：孙珂

申请学位：工程硕士

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：2022年5月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM713

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

**Dynamic Reactive Compensation Optimization of
Receiving-end Power Grid Considering MMC-HVDC
Carrying Capacity**

Candidate:	Niu Jiwei
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Enterprise mentor:	Sun Ke
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
Cultivation ways:	Full-time
School:	School of Electrical & Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2022
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

由于我国能源资源与负荷需求呈逆向分布，东中部受端地区直流外受电规模不断增长。柔性直流输电技术因其控制灵活、无换相失败以及可提供静态/动态无功补偿等优点，在海上风电远距离输送领域得到了广泛应用。随着柔性直流的不断推广应用，研究发现接入受端电网的柔性直流最大传输能力不仅仅受限于柔性直流系统本身的功率传输极限，同时也受限于受端交流系统，因此在合理规划柔性直流的接入时必须充分考虑其与交流系统以及近区常规直流的交互影响。为了使受端电网能有效接纳柔性直流，必须准确分析电网对柔性直流的承载能力，特别是研究无功补偿装置对受端电网柔直承载能力的影响，并进行受端电网的动态无功补偿优化，避免出现柔性直流“送不出、落不下”的问题。本文围绕受端电网柔直承载能力进行研究，并结合动态无功补偿设备能够提高受端电网暂态电压稳定性的特点以及 STATCOM 对受端电网柔性直流承载能力的影响，提出一种考虑受端电网柔直承载能力的动态补偿优化配置方案，主要工作如下：

首先，在 MMC-HVDC 稳态相量模型的基础上，对含有 STATCOM 以及常规直流的受端电网进行等效处理，不断改变 STATCOM 的接入容量，求解稳态下柔性直流的最大传输功率，通过计算分析证明 STATCOM 对于柔直最大传输功率的影响，同时证明对受端电网进行等效处理求解 MMC-HVDC 稳态下极限传输功率的可行性；

其次，利用电压跌落指标描述节点电压的不稳定严重度，筛选严重故障集，以提升受端电网电压稳定性、减少建设成本为优化目标建立考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型，按照柔直接入点优化和动态无功补偿装置配置优化分步进行，在保证受端电网柔性直流承载能力能够满足规划需求的前提下，配合世界杯优化算法和局部遍历的方法寻找配置方案的最优解集。

最后，对比无功补偿优化结果的有效性，同时进行暂态下柔性直流恢复特性的校验，提出综合考虑受端电网电压稳定性、经济性以及柔性直流承载能力特性的无功补偿优化配置的最优方案。

建立考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化方案，合理规划柔性直流接入方案，充分发挥动态无功补偿装置的作用，对于整个受端电网的稳定性以及海上风电经柔性直流馈入受端电网的规划建设都具有极为重要的意义。

关键词：动态无功补偿；柔性直流规划；受端电网；承载能力；世界杯优化算法

Abstract

Due to the reverse distribution of energy resources and load demand in my country, the scale of DC external power reception in the east and central receiving areas continues to grow. Flexible DC transmission technology has been widely used in the field of offshore wind power long-distance transmission due to its advantages of flexible control, no commutation failure, and static/dynamic reactive power compensation. With the continuous promotion and application of flexible DC, the study found that the maximum transmission capacity of flexible DC connected to the receiving end grid is not only limited by the power transmission limit of the flexible DC system itself, but also limited by the receiving end AC system. When the flexible DC is connected, its interaction with the AC system and the nearby conventional DC must be fully considered. In order to enable the receiving end grid to effectively accept the flexible DC, it is necessary to accurately analyze the carrying capacity of the power grid on the flexible DC, especially the influence of the reactive power compensation device on the flexible direct bearing capacity of the receiving end grid, and perform dynamic reactive power compensation of the receiving end grid. Optimization to avoid the problem of flexible DC "can't send, can't drop". This paper focuses on the research on the flexible DC carrying capacity of the receiving-end power grid, and combines the characteristics that dynamic reactive power compensation equipment can improve the transient voltage stability of the receiving-end power grid and the influence of STATCOM on the flexible DC carrying capacity of the receiving-end power grid. The dynamic compensation and optimal configuration scheme of the flexible and direct bearing capacity of the power grid, the main work is as follows:

First, based on the MMC-HVDC steady-state phasor model, equivalent processing is performed on the receiving-end power grid containing STATCOM and conventional DC, and the access capacity of STATCOM is continuously changed to solve the maximum transmission power of the flexible DC in steady state. The calculation analysis proves the influence of STATCOM on the maximum transmission power of the flexible DC, and at the same time proves the feasibility of performing equivalent processing on the receiving end power grid to solve the limit transmission power under the steady state of MMC-HVDC;

Secondly, the voltage sag index is used to describe the instability severity of the node voltage, and the severe fault sets are screened. With the optimization goal of improving the voltage stability of the receiving end grid and reducing the construction cost, a dynamic reactive power compensation optimization model

considering the flexible DC carrying capacity is established. The flexible direct entry point optimization and the dynamic reactive power compensation device configuration optimization are carried out step by step. On the premise that the flexible DC carrying capacity of the receiving end power grid can meet the planning requirements, the optimal solution of the configuration scheme is found with the help of the optimization algorithm and the method of local traversal.

Finally, comparing the effectiveness of the optimization results of reactive power compensation, and verifying the flexible DC recovery characteristics under transient conditions, the optimal configuration of reactive power compensation that comprehensively considers the voltage stability, economy and flexible DC carrying capacity characteristics of the receiving end grid is proposed.

Establish a dynamic reactive power compensation optimization scheme considering the flexible DC carrying capacity, rationally plan the flexible DC access scheme, and give full play to the role of the dynamic reactive power compensation device. The planning and construction of power grids are of great significance.

Keywords: Dynamic reactive power compensation optimization, MMC-HVDC, Receiving power grid, Carrying capacity, World Cup optimization algorithm

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.1.1 课题背景	1
1.1.2 目的和意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本文主要工作	6
第 2 章 STATCOM 对受端电网柔直承载能力的影响研究	7
2.1 引言	7
2.2 受端电网对柔性直流的承载能力	7
2.3 含柔性直流的受端电网等效模型	9
2.4 稳态下 STATCOM 对柔直极限传输能力影响分析	14
2.4.1 MMC-HVDC 选取定无功功率控制方式	15
2.4.2 MMC-HVDC 选取定交流电压控制方式	21
2.4.3 稳态下等效模型求解结果对比	27
2.5 故障下 STATCOM 对柔直功率恢复的影响	27
2.6 本章小结	28
第 3 章 考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型	29
3.1 引言	29
3.2 动态无功补偿优化模型	29
3.2.1 考虑柔直承载能力的多目标优化模型	30
3.2.2 柔性直流接入以及动态无功补偿配置优化策略	33
3.2.3 柔性直流接入以及动态无功补偿配置优化模型	36
3.2.4 柔性直流的系统无功配置以及接入优化实现方法	39
3.3 本章小结	40
第 4 章 基于省级电网的无功补偿方案实证算例	41
4.1 引言	41
4.2 江苏海上风电场接入受端电网的无功补偿方案实证算例	41
4.2.1 严重故障集筛选	41
4.2.2 江苏风电接入受端电网接入点优化	41

4.2.3 受端电网动态无功补偿优化的遍历求解方法.....43

4.2.4 基于世界杯优化算法的动态无功补偿优化.....44

4.3 动态无功补偿方案对比以及柔直功率恢复特性仿真验证46

4.3.1 动态无功补偿优化方案对比.....46

4.3.2 柔性直流功率恢复特性仿真验证.....47

4.4 本章小结49

第 5 章 总结与展望50

5.1 总结50

5.2 展望51

参考文献52

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果56

致 谢57

第1章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

1.1.1 课题背景

由于我国能源资源与负荷需求呈逆向分布,近年来东中部地区的直流受电规模不断增长,直流输电在远距离大容量输电方面得到了广泛应用,在我国广东、华东地区均有多条直流输电线路馈入^[1];与此同时,柔性直流输电技术因其控制灵活、无换相失败、可提供静态/动态无功补偿等优点,在我国电网发展中不断推广应用^[2],进而实现支撑电网安全可靠、服务新能源送出的功能。

目前,我国南汇、南澳、舟山以及厦门等工程已经投运,白鹤滩-江苏混合级联直流工程和江苏海上风电柔直送出工程正在开展前期工作,从地理分布上来看,上述柔性直流工程主要布局于长三角等大型交直流电网。在未来的柔性直流规划建设当中,江苏等东部沿海省份作为新能源消纳的主要受端电网,在其电网规划中将进一步推广柔性直流技术以满足大规模海上风电的消纳需求,推动电网的高质量发展。然而,就目前的工程实际来看,当前柔性直流工程仍存在注入受端电网的功率不能被有效消纳等诸多障碍,这些问题主要是由于对柔性直流实际运行特性以及接入电网适应性的认识不够充分造成的。

在已经启动的江苏如东等海上风电柔性直流送出工程中,由于难以明确柔性直流的实际可输送功率,大大增加了定量分析柔性直流接入交流电网后与受端电网常规直流相互影响的难度。正在开展规划和前期工作的厦门——金门联网工程以及浙江第四直流也拟采用柔性直流方案,但同样因为受端电网对于柔性直流的承载能力没有具体的求解方法,系统方案论证存在较大的制约。从目前碳达峰、碳中和的中长期目标来看,沿海省份的受端电网亟需大规模开发海上风电,就地就近满足负荷需求已经成为共识。最新研究表明,对于大规模海上风电场群,当离岸距离小于 73km 时宜选用交流输电方式,而超过该距离后柔性直流输电技术的经济性开始显现^[3]。以江苏电网为例,江苏海上风电输电对于离岸 70 公里以上的海上风电场均建议采用柔性直流送出,因此未来江苏海上风电送出柔直将持续增加,进一步扩大电网的承载规模。因此,客观评价受端电网对柔性直流的承载特性与能力已经成为电网高质量发展亟待解决的问题。

从受端系统特性来看,由于常规直流输电技术需要一定量的无功功率电源作为支撑^[4],在系统故障后无功需求会增大,而多直流馈入的受端电网在柔性

直流接入后,特性将发生明显变化。与传统交流电网相比,一方面柔性直流良好的无功特性使得电网稳定性得到提升,且运行控制更加灵活,而另一方面其复杂的运行模式与控制逻辑也使得电网运行面临新的挑战。目前柔性直流的有关研究发现,受端电网短路比较小时会制约柔性直流向交流电网传输的最大有功功率,甚至引发柔性直流输电系统振荡失稳^[2]。随着柔性直流在受端电网不断推广应用,不能再简单地将柔性直流考虑为理想工况,必须充分考虑其与交流系统以及近区常规直流的交互影响,合理规划接入方案。因此,目前亟需具体分析电网接纳柔性直流的能力,为柔直接入工程提供理论指导,规避直流建设过程中出现的“落不下”等问题,充分发挥柔性直流的输电能力,推动交直流电网高质量发展。

近年来随着电网高压直流输电的建设,受端电网的结构开始产生较大的变化。尽管高压直流输电工程具有较好的灵活性和控制性,但在电网发挥较大作用的同时,高压直流输电故障导致的电网电压失稳问题也极为严重^[5]。根据《电力系统安全稳定导则》^[6],在电网遭遇严重的直流故障、交流 N-1 以及 N-2 故障时,必须保证系统节点电压的暂态稳定性。目前提升暂态电压稳定性的主要方法为就地补偿无功补偿装置,合适的无功补偿装置可以较好的保持电压稳定,其中动态无功补偿装置在维持电压稳定性方面具有较好的表现^[7]。除此之外,随着柔性直流的广泛接入,柔性直流良好的无功特性也能够提升电网的暂态电压稳定性,因此选择合适的柔性直流接入点,也可以视为提升受端电压暂态稳定性的方法。

为保证系统在合理、稳定的水平下运行,应当具有充足的无功功率储备^[4]。STATCOM 作为目前应用最为广泛的动态无功补偿装置,能够有效增强受端电网强度。目前的研究发现,改善受端电网强度能够进一步提升 MMC-HVDC 在稳态下的传输极限^[8],因此可以认为 STATCOM 在提高受端电网电压稳定性的同时,也具有提高受端电网对于柔性直流承载能力的作用,然而目前的相关研究较少。

1.1.2 目的和意义

基于当前课题的研究背景,可以明确沿海地区电网在向交直流混联的方向不断发展,对我国的静态和暂态电压稳定带来巨大的影响,而无功补偿配置作为改善电网局部无功流动和分布^[7]的有效手段,常用于提升受端电网的电压稳定性。

柔性直流作为海上风电送出的重要手段,接入受端电网的柔性直流最大传输能力不仅仅受限于柔性直流系统本身的功率传输极限,同时也受限于受端交

流系统，如何正确评估受端电网对于柔直的承载能力，对于柔直的规划建设具有重要意义，同时在对系统无功补偿优化过程中，发挥其对电网的增强效果，进而能够保障受端电网对于柔性直流的承载能力满足规划需求。借助 MMC-HVDC 的稳态模型以及包含 STATCOM 的受端电网模型进行定量分析，证明利用等效模型求解 MMC-HVDC 稳态传输功率极限方法的可行性，同时证明 STATCOM 接入对于柔性直流稳态传输能力的影响，进而证实在柔直近端接入动态无功补偿装置能够提升柔性直流的最大传输能力，此研究内容为提出考虑柔直承载能力的受端电网动态无功补偿优化策略奠定基础。

考虑柔性直流承载能力的受端电网动态无功补偿配置策略不仅仅能够有效地提升受端电网的电压稳定性，同时能兼顾优化柔性直流的接入方案，保障柔性直流输送功率满足系统规划需求，对于整个受端电网的稳定性以及海上风电经柔性直流馈入受端电网的规划建设都具有极为重要的意义。

1.2 国内外研究现状

国内柔性直流工程不断投运的同时，其额定输送功率也在不断提升，近几年国内投运的柔性直流工程及其输送功率^[9]如表 1-1 所示。

表 1-1 近些年国内投运的柔性直流工程

工程名称	投运 年度	端数	额定直	额定直流功率(MW)	地区	目的
			流电压 (kV)			
上海南汇柔直	2011	2	±30	18	中国	风电并网
南澳多端柔直	2013	3	±160	200/100/50	中国	风电并网
浙江舟山柔直	2014	5	±200	400/300/100/100/100	中国	岛屿互联
福建厦门柔直	2015	2	±320	1000	中国	城市供电
云南鲁西柔直	2016	2	±350	1000	中国	电网互联
渝鄂柔直	2019	2	±420	4×1250	中国	电网互联
张北柔直电网	2020	4	±500	3000/3000/1500/1500	中国	新能源并网
昆柳龙（混合直流）	2020	3	±800	8000/5000/3000	中国	水电外送

为了准确评价受端电网对柔性直流的承载能力，并对柔直接入点以及动态无功补偿配置方案进行优化，更好地服务于柔性直流输电工程的规划建设，本节从柔性直流本身的功率传输极限问题、柔性直流的接入优化以及动态无功补偿装置配置优化三个方面对目前国内外的研究现状进行总结。

在柔性直流本身功率传输极限的研究方面，为准确分析柔性直流在稳态下

的传输极限,众多学者对柔性直流接入不同受端电网时的稳态运行范围不断展开研究。目前国内外学者对于柔性直流稳态下运行范围的研究,主要思路是对柔性直流进行等效建模以求解不同临界条件下柔直所能达到的有功传输值。文献[10]提出综合考虑小干扰稳定性和交流母线电压约束条件,利用临界运行短路比 COSCR 定量描述 MMC 系统的临界运行稳定裕度。文献[11]以柔性直流交流侧潮流有可行解为约束条件,分析柔性直流传输极限与短路比和交流系统等效阻抗角的关系。文献[12]以交流侧稳态潮流方程为基础,归纳两种不同控制方式下交流侧的稳定性约束条件,给出求取临界短路比 CSCR 的步骤流程,根据 CSCR 求解柔直的稳态运行极限。文献[13]通过建立 MMC 功率运行图与电气相量图间的映射关系,从映射关系中直观地找出了 MMC 的功率传输极限。文献[14]在建立不同运行方式下柔性直流连接受端电网的线性化传递函数模型基础上,通过分析开/闭环传递函数的零极点分布,获得了柔直接入后系统的失稳解析判据。文献[2]以交流电网强度为出发点,从时域和频域两方面研究其对直流功率传输能力的影响,明确提出受端电网强度是柔性直流功率传输受限的主要原因。文献[8]以相量形式推导了 MMC 系统在 dq 坐标系下交流侧电压与电流的表达式,并提出一种电容与电压源串联的 MMC 稳态等效模型。文献[15]相较于前者增加了考虑锁相环特性,并将其加入到 MMC-HVDC 接入交流电网的稳态等值模型中,用灵敏度分析方法研究了 MMC-HVDC 的静态稳定特性,提出 MMC-HVDC 在静态下的稳定判据,根据系统静态稳定临界点和 MMC 换流器的工作极限等推导出 MMC 输送功率极限具体的计算方法,本文在此基础上进行稳态下 MMC 功率极限的求解,并通过对复杂受端电网进行等效处理验证该方法的有效性。

在柔性直流接入优化的研究方面,国内外学者主要根据柔性直流对受端电网电压稳定性的提升效果进行接入点的选择,很少关注受端电网对于柔性直流的承载能力。文献[16]基于柔性直流在不同控制方式下 RVSF 的解析计算方法,对比分析 RVSF 以及有效短路比等评价指标,总结出柔性直流对受端系统电压支撑强度的影响规律,并证明可以将柔性直流作为提高受端电网电压稳定性的支撑设备。文献[17]分别采用常规直流输送新能源并配置动态无功补偿的方法和柔性直流直接输送的方法进行对比,进一步证明柔性直流可以作为电压稳定性的支撑设备。文献[18]针对交直流混联馈入受端电网关键断面输电能力受限的问题,以支撑断面输电能力最大化为目标,提出了柔性直流的布局方法。文献[19]充分考虑直流与直流以及交流与直流之间的交互影响,利用直流换相失败风险和受端电网电压失稳风险的线性加权法指标择优选取柔性直流接入点。文献[20]综合考虑送受端分区选择、接入容量优化、直流落点选择以及安全稳

定性评估等因素,给出了柔性直流容量和选点的具体确定方法。

在动态无功补偿优化方面,随着国内高压直流输电工程的不断建成投运,受端电网的无功支撑能力在多直流馈入后明显降低,在受端交流电网遭遇严重故障时,高压直流输电逆变侧换流母线电压跌落极为明显,进而导致高压直流输电的换相失败问题频发。对受端电网进行合理的无功补偿配置是提高受端交流电网电压稳定性、抵御常规直流换相失败的重要措施,对交直流系统的稳定运行具有重要意义^[21]。例如,文献[22]提出一种工程实用的减少常规直流换相失败的动态无功补偿配置方案,根据多馈入直流交互因子指标评价直流之间的相互影响,筛选故障下直流恢复能力较差的直流节点及与其联系紧密的区域,并根据无功-电压灵敏度分析确定动态无功补偿最佳接入地点。文献[23]利用轨迹灵敏度分析提供合理的补偿点选择方法。文献[24]以暂态电压安全为约束,以节点电压越限的轨迹灵敏度指标作为选择补偿节点的依据。文献[25]基于故障特征进行电网故障的聚类分析,同时参考暂态电压安全约束进行严重故障辨识,在分区配置的前提下进行两阶段优化方法的研究。文献[26]从静态和暂态电压稳定两个方面进行电网电压薄弱点的辨识,并将直流的多馈入交互作用因子以及经济性作为无功补偿优化配置的目标,利用 MOEA/D 求解算法获取最优解集。文献[27]以系统潮流约束、节点电压约束以及无功补偿装置容量约束等为约束条件,采用改进的自适应遗传算法求解含分布式电源及无功补偿装置的优化配置模型。文献[28]以电压偏差值、装置安装运行维护、购电成本以及有功网损为目标函数,运用多目标灰靶决策算法寻求最优的优化方案。文献[29]在电力系统动态分析原理的基础上,结合动态阻抗矩阵和功率权重值选取补偿节点,再考虑系统节点电压的自稳性和致稳性,求解得到电网的无功补偿配置方案。文献[30]分别基于电压综合涨幅 CVM 指标和电压支撑强度 VSF 指标提出无功补偿装置的选点方法,并以动态无功补偿装置安装总费用为目标,基于电网安全性和经济性提出了动态无功补偿装置的容量优化方法。文献[31,32]使用优化算法减少控制次数和控制器数量达到无功功率快速优化的目的。在文献[4]中,作者以电压稳定性为指标,量化无功补偿装置在不同位置 and 不同容量下对节点电压稳定性影响的强弱,配合 NSGA-II 算法求解模型最优解 Pareto 前端,并进一步求解最优配置方案。文献[5]利用暂态电压越限积分描述节点电压波动情况,在筛选严重故障集的基础上构建以提升系统电压稳定性和减少经济花销两方面的多目标优化模型,在对帝国竞争算法改进后提出一种对补偿容量和接入点的最优方案的求解方法。

受端电网强度是影响柔性直流运行范围的关键因素,而 STATCOM 接入后将会对整个受端电网强度产生影响,进而改善柔直的运行范围。目前学者对于

柔性直流接入以及动态无功补偿方案的优化大多单独考虑二者对受端电网电压稳定性的提升效果，并未关注两者之间的相互影响。因此，本文在研究 STATCOM 对受端电网柔直承载能力的影响基础上，提出一种柔直接入和动态无功补偿配置的优化方案。

1.3 本文主要工作

本文围绕受端电网对柔性直流的承载能力展开研究，提出一种能够准确求解 MMC-HVDC 功率传输极限的等效处理方法，并证明 STATCOM 能够有效改善受端电网柔直承载能力，在此基础上结合动态无功补偿设备能够提高受端电网暂态电压稳定性的特点，提出一种考虑受端电网柔直承载能力的动态补偿配置优化方法。各章节主要内容如下：

第 2 章，以 MMC-HVDC 稳态相量模型为基础，提出对含有常规直流 LCC-HVDC、交流电源以及 STATCOM 的受端电网进行等效处理的方法并构建等效的两端电网，在 MMC-HVDC 不同控制方式和 STATCOM 不同接入点下，根据系统静稳判据求解 MMC-HVDC 的最大传输极限，并对比没有 STATCOM 接入下的传输极限。通过仿真验证暂态下 STATCOM 对柔直功率恢复特性的影响，证明 STATCOM 对受端电网柔直承载能力的提升效果。

第 3 章，首先根据《电力系统安全稳定导则》梳理电网故障集，根据电压跌落指标 TVDI 进行严重故障集和无功补偿节点的筛选，在综合考虑电网电压稳定性指标和无功补偿装置经济性指标的前提下，提出一种考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型，并借助世界杯优化算法以及遍历的方法依次进行柔直接入点和动态无功补偿装置配置的优化，求解最优解集。

第 4 章，针对严重故障集，通过故障仿真对比最优解集中各种方案的优劣。同时，验证柔性直流在严重故障下的功率恢复能力，保证受端电网柔直承载能力满足规划需求，最终选择出考虑柔直承载能力的动态无功补偿配置的最优方案。

第 5 章，对全文进行总结。

第2章 STATCOM 对受端电网柔直承载能力的影响研究

2.1 引言

在柔性直流的发展过程中, MMC-HVDC 由于其模块化的优势, 已成为目前柔性直流输电的主流拓扑^[33]。然而柔性直流输电受限于其内部调制比、受端系统的稳定性约束以及控制器限幅, 在馈入不同强度的电网时存在输电功率上限, 达到 MMC-HVDC 的传输功率极限, 即接入受端电网的柔性直流最大传输能力不仅仅受限于柔性直流系统本身的功率传输极限, 同时也受限于受端交流系统。

动态无功补偿装置在抑制常规直流输电换相失败和提高受端电网电压稳定性方面有较好的效果, 其中 STATCOM 运用最为广泛。除此之外, STATCOM 优良的无功特性还能够有效改善受端电网强度^[34], 提高 MMC-HVDC 的极限传输能力, 但是该结论缺少严格的分析论证。

针对上述问题, 本章在对受端电网柔直承载能力进行定义后, 以 MMC-HVDC 稳态相量模型为基础, 对包含常规直流 LCC-HVDC、交流电源以及 STATCOM 在内的受端电网进行等效处理。以 MMC 换流器自身的工作极限、静态稳定判据以及控制器限幅为限制条件, 求解 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限, 并进一步分析 STATCOM 接入后对受端交直流电网等效短路比以及 MMC 稳态功率传输极限的影响, 最后通过仿真研究 STATCOM 对柔性直流故障下功率恢复效果的影响。

2.2 受端电网对柔性直流的承载能力

为更好的评估受端电网对柔性直流的接纳效果, 本节对受端电网柔性直流承载能力进行详细阐述。由于接入受端电网的柔性直流最大传输能力不仅仅受限于柔性直流系统本身的功率传输极限, 同时也受限于受端交流系统, 本节根据柔直稳态功率传输极限以及故障下的柔直最大功率恢复能力, 提出一种受端电网对柔性直流的承载能力的评估方法, 具体步骤如图 2-1 所示。

首先, 从稳态角度看, 应该保证在系统的典型运行方式下, 柔性直流均能满功率的运行; 其次, 从暂态角度看, 故障后电力系统的安全稳定特性与故障恢复特性需要满足要求。综合上述要求, 本文将系统对于柔直的承载能力定义为保障柔直满功率运行且系统满足安全稳定运行要求的最大柔直接入规模。计算方法如下:

首先根据第 2 章内容，计算柔性直流接入电网的稳态极限输送功率。其次筛选受端电网的柔直近区故障作为典型故障集，在典型故障集下判断柔直能否恢复稳态功率传输极限，若其能够完全恢复，则选取其为受端电网的柔直最大承载能力；若未能完全恢复，选取最大恢复功率作为实际的受端电网柔直承载能力。

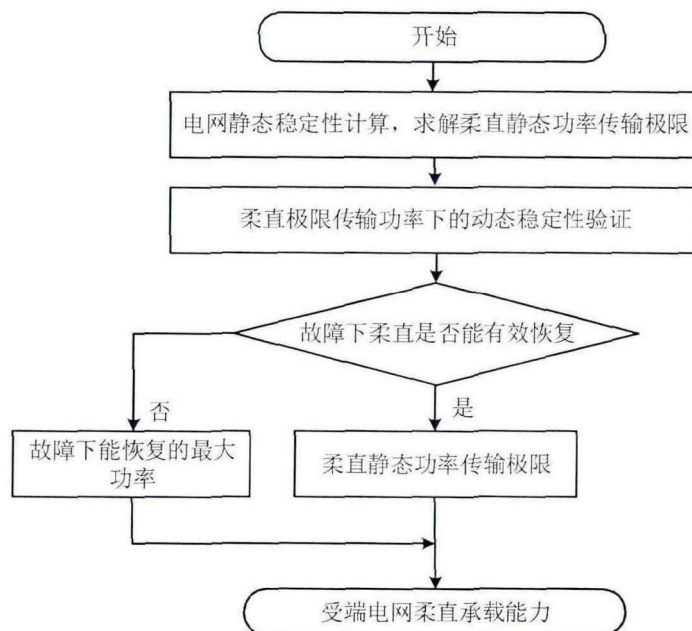


图 2-1 柔直承载能力计算方法

在对受端电网的柔性直流承载能力分析过程中，有以下两类关键因素：

(1) 稳态下受端电网对于柔性直流的承载能力分析：

柔性直流接入受端电网后的静态稳定问题是基础，根据 MMC 的稳态运行区域边界，研究 MMC 换流器参数以及受端交流电网短路比对 MMC 运行范围的影响。针对目前工程常用的 MMC 换流器模型，探讨接入受端电网的 MMC-HVDC 功率传输能力与静态稳定判据以及 MMC 换流器自身工作极限的关系，采用灵敏度分析方法从代数方程的角度研究 MMC-HVDC 接入受端电网后的静态稳定特性。在换流器自身工作极限范围内，根据静态稳定判据可以求解出稳态下的最大传输极限，这是从稳态的角度分析受端电网对柔直的承载能力。

(2) 受端电网在暂态下柔性直流故障后的恢复能力的分析：

暂态下受端电网对柔性直流的承载能力主要指受端电网故障后的柔性直流恢复能力，即 MMC-HVDC 接入受端交流电网后抵抗受端电网大扰动的能力。柔性直流在受端电网故障后的恢复能力可以作为受端电网柔直承载能力的验证手段，配合静态下柔性直流的理论传输极限值到受端电网柔直承载能力。

本节从稳态下受端电网对于柔性直流的承载能力和柔性直流故障后的恢复能力两个角度，对受端电网柔直承载能力进行定义，提出受端电网对柔性直流承载能力的评估方法，为下文的研究奠定基础。

2.3 含柔性直流的受端电网等效模型

本章主要研究 STATCOM 接入受端电网后 MMC-HVDC 的最大传输能力，首先构建包含 MMC-HVDC、LCC-HVDC、STATCOM 以及交流电源的四端网络，如图 2-2 所示。为方便分析，将除 MMC-HVDC 以外的剩余三端进行等效处理后再将 MMC 接入，形成图 2-3 所示的等效电路图。接入受端电网的 MMC-HVDC 互联模型可以用图 2-4 表示^[35]，MMC 交流侧等效为等效电容电抗 X_{mmc} 串联等效电压源 E_{mmc} 的形式，将等效电容电抗 X_{mmc} 串联等效电压源 E_{mmc} 的表达式进行坐标变换，变换至电压以 U_t 相角为参考的坐标系中，如式 (2-1) 所示。

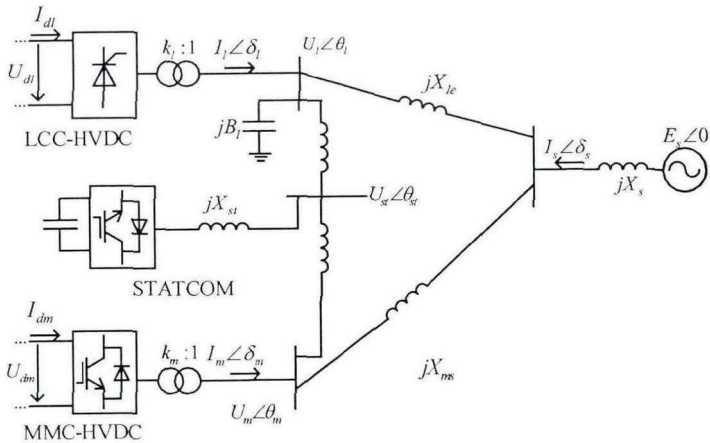


图 2-2 四端交直流电网拓扑图

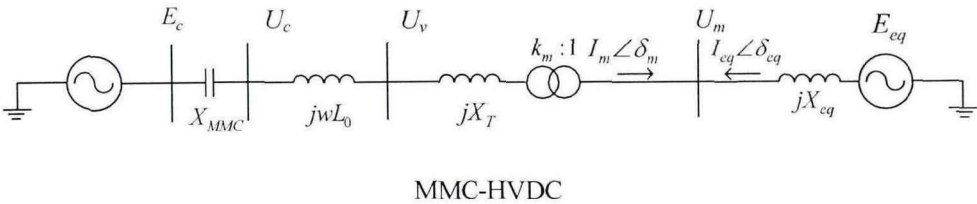


图 2-3 含 MMC-HVDC 两端等效电路

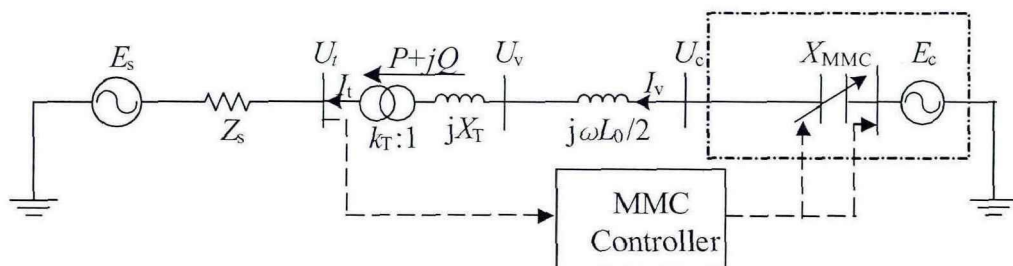


图 2-4 MMC 接入电网的互联模型

图 2-4 中 E_s 和 $Z_s \angle \theta_s$ 分别为等效的交流系统内电势和等效阻抗, P 和 Q 分别为 MMC-HVDC 实际输出的有功功率和无功功率, U_t 和 U_v 分别为变压器交流电网侧和 MMC 侧电压相量, I_t 和 I_v 分别为变压器交流电网侧和 MMC 侧电流相量, X_T 为变压器漏抗值。整个系统以电压 U_t 作为参考点, 即 $\delta_t=0$ 。

$$\begin{cases} X_{mmc} = -\frac{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3}{64(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3)} X_{ceq} \\ E_{mmc} = \frac{M_e U_{dc}}{m_k M_{dc}} \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\zeta_3}{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3} X_{ceq}\right) \cos(\theta_e - \theta_{pll}) + \frac{3M_{dc}^2 M_2 X_{ceq}}{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3} \cos(\theta_2 - \theta_e - \theta_{pll}) \\ -\left(1 - \frac{\zeta_3}{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3} X_{ceq}\right) \sin(\theta_e - \theta_{pll}) - \frac{3M_{dc}^2 M_2 X_{ceq}}{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3} \sin(\theta_2 - \theta_e - \theta_{pll}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中,

$$\begin{cases} \zeta_1 = 32M_{dc} (8M_{dc}^2 - 3M_e^2 - 2M_2^2) X_{L0} \\ \zeta_2 = -M_{dc} (16M_{dc}^4 + 3M_e^4 + 2M_2^4 - 16M_{dc}^2 M_e^2 - 12M_{dc}^2 M_2^2 - 2M_e^2 M_2^2) X_{ceq} \\ \zeta_3 = M_e^2 M_2 [32X_{L0} - (12M_{dc}^2 - 2M_e^2 + M_2^2) X_{ceq}] \cos(2\theta_e - \theta_2) \\ \zeta_1 = 32M_{dc} X_{L0} \\ \zeta_2 = -M_{dc} (2M_{dc}^2 + M_e^2 - M_2^2) X_{ceq} \\ \zeta_3 = M_e^2 M_2 X_{ceq} \cos(2\theta_e - \theta_2) \end{cases} \quad (2-2)$$

式中 E_{mmc} 、 X_{mmc} ——交流侧等效内电势和等效阻抗;

M_{dc} ——直流调制比, 正常运行状态一般为 1;

M_e ——交流调制比;

M_2 ——环流分量调制比;

θ_e 、 θ_2 ——交流调制分量和环流调制分量的相角;

m_k ——换流变压器空载变压比, 通常为 0.85;

θ_{pll} ——锁相环输出相角。

根据式 (2-1), MMC 交流侧等效阻抗 X_{mmc} 与锁相环输出相角 θ_{pll} 无关, 内电势 E_{mmc} 也改写为 $E_{mmc} \angle (\delta_{mmc} + \theta_{pll})$ 的形式^[15], δ_{mmc} 为内电势 E_{mmc} 相对 θ_{pll} 的

相角，故幅值 E_{mmc} 可写为式(2-3)的形式。

$$E_{mmc} = \frac{M_e U_{dc} \sqrt{(\zeta_1 + \zeta_2)^2 + (3M_{dc}^2 M_2 X_{Ceq})^2 + 2(\zeta_1 + \zeta_2)(3M_{dc}^2 M_2 X_{Ceq}) \cos(2\theta_e - \theta_2)}}{m_k M_{dc} (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3)} \quad (2-3)$$

在完成 MMC-HVDC 侧的等效处理后，按照高斯消去法^[37]进行受端电网的等效处理，式 (2-4)为四端电网的电压电流方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_l \\ \dot{I}_{st} \\ \dot{I}_s \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} & \dot{Y}_{14} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} & \dot{Y}_{24} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} & \dot{Y}_{34} \\ \dot{Y}_{41} & \dot{Y}_{42} & \dot{Y}_{43} & \dot{Y}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_l \\ \dot{U}_{st} \\ \dot{U}_s \\ \dot{U}_m \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

令 $\dot{I}_N = [\dot{I}_l \quad \dot{I}_{st} \quad \dot{I}_s]^T$ ； $\dot{U}_N = [\dot{U}_l \quad \dot{U}_{st} \quad \dot{U}_s]^T$ ，则式 (2-4)等效为式 (2-5)：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_N \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{13} & A_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_N \\ \dot{U}_m \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

化简可得：

$$\dot{U}_m - \dot{E}_{eq} = Z_{eq} \dot{I}_m \quad (2-6)$$

$$\dot{E}_{eq} = (A_{21} A_{11}^{-1} A_{12} - A_{22})^{-1} A_{21} A_{11}^{-1} \dot{I}_N \quad (2-7)$$

$$Z_{eq} = (A_{22} - A_{21} A_{11}^{-1} A_{12})^{-1} \quad (2-8)$$

式中 E_{eq} ——受端电网等效电动势；

Z_{eq} ——受端电网等效阻抗。

结合等效后的受端电压源 E_{eq} 和 MMC-HVDC 的稳态模型，建立含柔性直流的交直流互联模型，以此为基础分析 STATCOM 接入后 MMC-HVDC 受端电网的等效短路比变化，进而求解 MMC-HVDC 的最大传输能力。

其中等效阻抗只与实际的电网结构相关，而等效电动势与电网的运行状态相关，即与电网中常规直流以及接入的 STATCOM 运行状态有关。为更好的研究 STATCOM 对于受端电网的影响，需要根据实际的接入情况计算受端电网等效电路，针对不同的电路情况，求解各个节点的电压、电流的幅值与相角 (U 、 I 、 θ 、 δ)：

(1) 等效节点：电压幅值 E_{eq} 、电压相角 θ_{eq} 未知；

(2) LCC-HVDC 节点：控制方式采用定直流电流、定 γ 角控制^[36]，因此 U_l 、 θ_l 、 δ_l 、 I_l 均未知， I_d 为已知，并满足式(2-9)、(2-10)、(2-11)；

$$\cos(\varphi_l) = \cos(\gamma) - \frac{\omega L_c I_d}{\sqrt{2} k_f E_l} \quad (2-9)$$

$$\theta_l - \delta_l = \varphi_l \quad (2-10)$$

$$I_l = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2-11)$$

式中 L_c ——换相电感；

k_l ——换流变压器变比。

(3) 交流系统节点：取为平衡节点，假定交流电网的母线电压不变，其电网强度主要依靠内电抗来决定，其中 I_s 、 δ_s 未知；

(4) MMC-HVDC 节点：MMC-HVDC 的控制方式相对于 LCC-HVDC 要复杂一些，因此 MMC-HVDC 的外电路模型也和控制方式有关。当逆变侧选择为定交流电压、定直流电压控制时，交流侧的 I_m 、 θ_m 、 δ_m 未知，直流侧 I_{dc} 、 P_m 、 Q_m 未知，但是其中未知量关系如式(2-12)所示；当逆变侧选择为定无功功率，定直流电压控制时，交流侧的 U_m 、 I_m 、 θ_m 、 δ_m 未知，直流侧的 I_{dc} 、 P_m 未知，同时其中未知量满足关系如式(2-13)、(2-14)所示。在整个等效的过程中，不会涉及使用 MMC-HVDC 节点的电流值，因此 I_m 、 δ_m 无需求解，减少未知变量。

$$P_m = \frac{U_m^2}{|Z_{eq}|} \cos \phi_{eq} - \frac{U_m E_{eq}}{|Z_{eq}|} \cos(\theta_m - \theta_{eq} + \phi_{eq}) \quad (2-12)$$

$$P_m = \frac{U_m^2}{|Z_{eq}|} \cos \phi_{eq} - \frac{U_m E_{eq}}{|Z_{eq}|} \cos(\theta_m - \theta_{eq} + \phi_{eq}) \quad (2-13)$$

$$Q_m = \frac{U_m^2}{|Z_{eq}|} \sin \phi_{eq} - \frac{U_m E_{eq}}{|Z_{eq}|} \sin(\theta_m - \theta_{eq} + \phi_{eq}) \quad (2-14)$$

(5) STATCOM 节点：STATCOM 在接入点交流侧选择定交流电压控制，直流侧采用定直流电压控制，因此 I_{st} 、 θ_{st} 、 δ_{st} 未知。在稳态下，dq 轴下的 q 轴分量为 0，忽略桥臂电阻，因此 STATCOM 的功率因数角为 90° [38]，如式 (2-15) 所示。

$$\theta_{st} - \delta_{st} = \pi / 2 \quad (2-15)$$

(6) 约束条件：式 (2-16)为 MMC-HVDC 调制比约束，要求调制比 M_c 介于 0~1 之间；式 (2-17)为 MMC-HVDC 的直轴交轴电流约束。

$$0 \leq M_c \leq 1 \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} I_q &> -SCR \cdot V_{MMC} \\ |I_d| &\leq SCR \cdot E_{eq} \end{aligned} \quad (2-17)$$

(7) MMC-HVDC 接入受端电网的稳定判据[15]：

1) MMC-HVDC 采用定无功功率控制

$$\begin{cases} S_d = \frac{dP}{dI_d} = \frac{U_t \lambda_{scr} (E_s - 2U_t \cos \delta_s)}{\lambda_{scr} (E_s - 2U_t \cos \delta_s) + I_d \cos(\delta_s - \theta_s)} > 0 \\ S_q = \frac{dQ}{dI_q} = -\frac{U_t \lambda_{scr} (E_s - 2U_t \cos \delta_s)}{\lambda_{scr} (E_s - 2U_t \cos \delta_s) + I_q \sin(\delta_s - \theta_s)} < 0 \end{cases} \quad (2-18)$$

2) MMC-HVDC 采用定交流电压控制

$$\begin{cases} S_d = \frac{dP}{dI_d} = U_t > 0 \\ S_q = \frac{dU_t}{dI_q} = -\frac{U_t \sin(\delta_s - \theta_s)}{\lambda_{scr} (E_s - 2U_t \cos \delta_s) + I_q \sin(\delta_s - \theta_s)} < 0 \end{cases} \quad (2-19)$$

(8) 求解方程：式 (2-20) 在定交流电压控制方式下，含有 15 个未知量，外加节点电压方程，共 15 个方程，可求出稳态解；在定无功功率控制方式下，含有 15 个未知量，外加节点电压方程，共 15 个方程，可求出稳态解。

$$\begin{cases} E_{eq} \sin \theta_{eq} + (A_{21} A_{11}^{-1} A_{12} - A_{22})^{-1} A_{21} A_{11}^{-1} [I_{LCC} \cos \delta_{LCC} \quad I_{AC} \cos \delta_{AC} \quad I_{ST} \cos \delta_{AC}] = 0 \\ E_{eq} \cos \theta_{eq} + (A_{21} A_{11}^{-1} A_{12} - A_{22})^{-1} A_{21} A_{11}^{-1} [I_{LCC} \sin \delta_{LCC} \quad I_{AC} \sin \delta_{AC} \quad I_{ST} \sin \delta_{ST}] = 0 \\ I_{LCC} \cos \delta_{LCC} + (Y_{22} + Y_{23} + Y_{24}) V_{LCC} \sin \theta_{LCC} - Y_{23} V_{AC} \sin \theta_{AC} - Y_{24} V_{ST} \sin \theta_{ST} = 0 \\ I_{LCC} \sin \delta_{LCC} - (Y_{22} + Y_{23} + Y_{24}) V_{LCC} \cos \theta_{LCC} + Y_{23} V_{AC} \sin \theta_{AC} + Y_{24} V_{ST} \cos \theta_{ST} = 0 \\ I_{AC} \cos \delta_{AC} - Y_{13} V_{MMC} \sin \theta_{MMC} - Y_{23} V_{LCC} \sin \theta_{LCC} + (Y_{13} + Y_{23}) V_{AC} \sin \theta_{AC} = 0 \\ I_{AC} \sin \delta_{AC} + Y_{13} V_{MMC} \cos \theta_{MMC} + Y_{23} V_{LCC} \cos \theta_{LCC} - (Y_{13} + Y_{23}) V_{AC} \cos \theta_{AC} = 0 \\ I_{ST} \cos \delta_{ST} - Y_{24} V_{LCC} \sin \theta_{LCC} - Y_{14} V_{MMC} \sin \theta_{MMC} + (Y_{24} + Y_{14}) V_{ST} \sin \theta_{ST} = 0 \\ I_{ST} \sin \delta_{ST} + Y_{24} V_{LCC} \cos \theta_{LCC} + Y_{14} V_{MMC} \cos \theta_{MMC} - (Y_{24} + Y_{14}) V_{ST} \cos \theta_{ST} = 0 \\ \delta_s - \theta_{MMC} + \theta_{eq} = 0 \\ \varphi_{LCC} - \theta_{LCC} + \delta_{LCC} = 0 \\ \varphi_{ST} - \theta_{ST} + \delta_{ST} = 0 \\ Q_m - \frac{V_{MMC}^2}{zeq} \sin \varphi_{eq} + \frac{V_{MMC} E_{eq}}{zeq} \cos(\delta_s + \varphi_{eq}) = 0 \\ P_m - \frac{V_{MMC}^2}{zeq} \cos \varphi_{eq} + \frac{V_{MMC} E_{eq}}{zeq} \sin(\delta_s + \varphi_{eq}) = 0 \\ P_m - V_{MMC} I_d = 0 \\ P_m - \frac{U_{dc} I_{dc}}{3} = 0 \end{cases} \quad (2-20)$$

根据上述的稳态模型，按照三个角度进行分析：第 1 个角度为按 STATCOM 插入点的不同，引入插入点变量 d 描述 STATCOM 接入点与 LCC 以及 MMC 馈入点的距离；第 2 个角度为修改 MMC-HVDC 的 I_d 大小；第 3 个角度为修改控制方式。求解在不同的变量条件下的等效模型，在满足约束条件的前提下，根据式 (2-18)、(2-19) 判断 MMC-HVDC 的最大传输功率，求解结果中主要关注

以下变量：(1) MMC 调制比；(2) MMC 最大传输功率；(3) 等效短路比。

2.4 稳态下 STATCOM 对柔直极限传输能力影响分析

本节按照图 2-5 所示的流程对不同运行工况下的模型进行求解，整个求解过程采用标么值的形式进行计算。

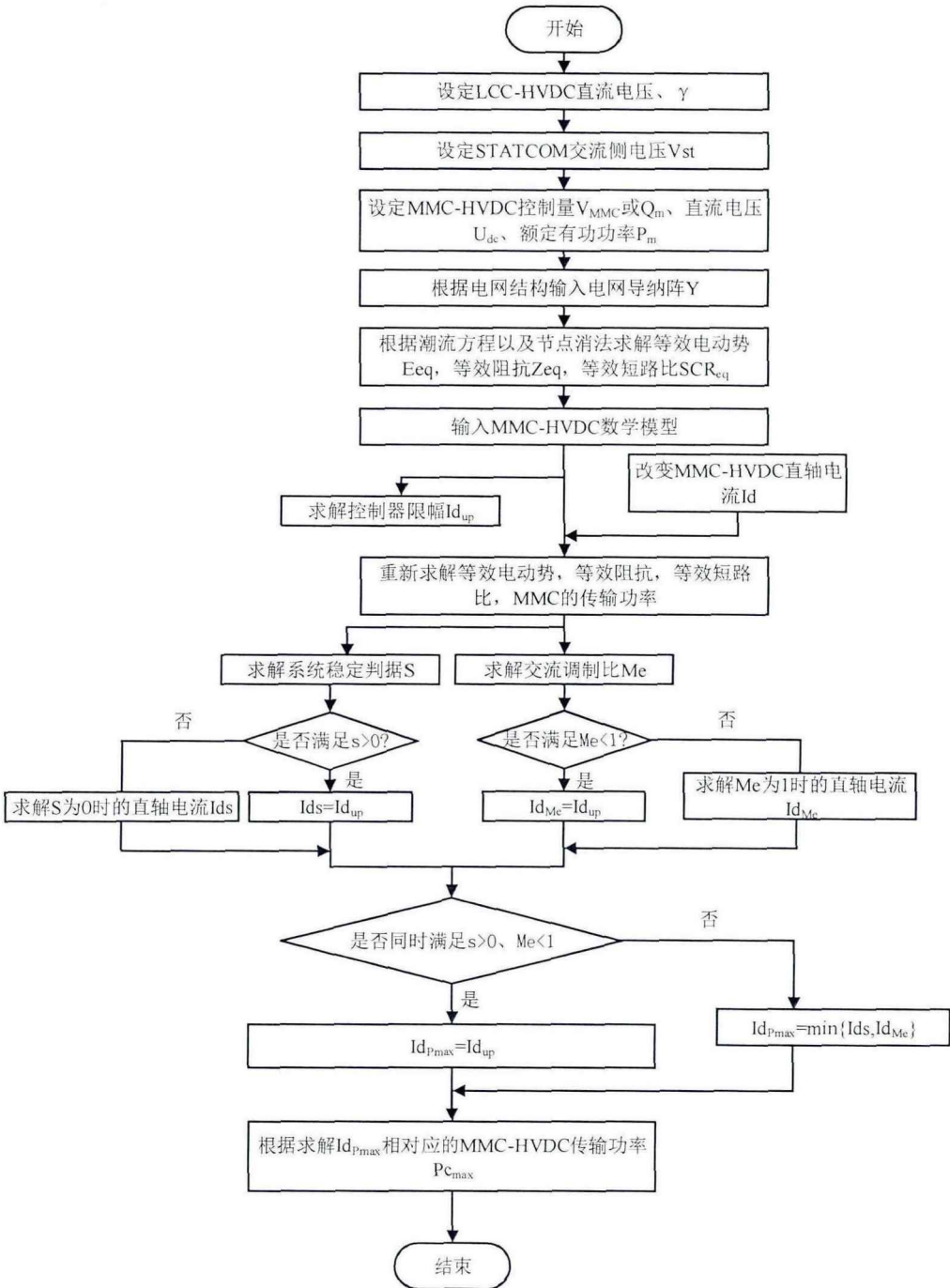


图 2-5 模型求解流程图

2.4.1 MMC-HVDC 选取定无功功率控制方式

2.4.1.1 无 STATCOM 的三节点模型求解

MMC-HVDC 选择为定无功功率控制方式，其中，无功功率 Q_c 控制在 $-0.1 \sim 0.1\text{pu}$ 之间。首先求解在没有 MMC-HVDC 接入时 MMC-HVDC 的最大传输功率结果。

在不同运行工况下 MMC-HVDC 的调制比求解结果如图 2-6 所示，由图 2-6 可知，在 I_d 允许范围内， M_c 均介于 $0 \sim 1$ 之间，满足约束要求，且有无环流抑制对于系统定性结论影响不大，因此仅在考虑无环流抑制情况下进行求解。在整个运行范围内，MMC-HVDC 传输功率可以达到的最大值即为 MMC-HVDC 的传输功率极限。

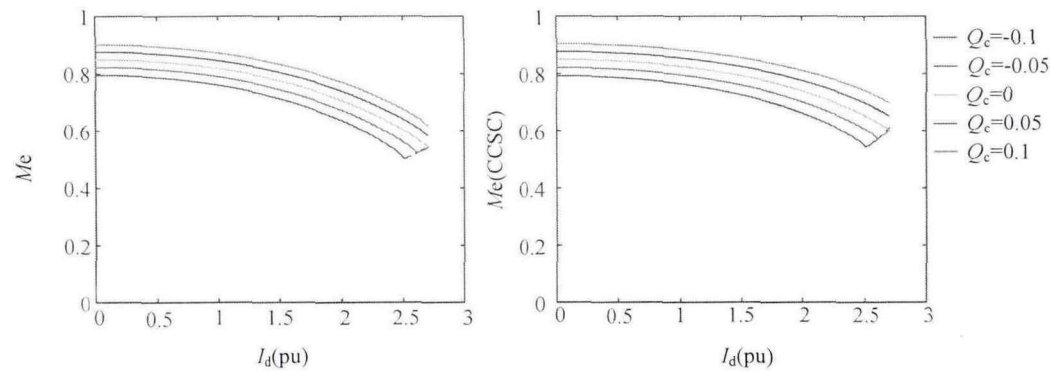


图 2-6 M_c 随 I_d 变化曲线

如图 2-7 所示，MMC-HVDC 在允许的运行范围内具有明显的最大值，如图 2-8，利用稳定判据 S 与 0 的交点即可获得 P_{c_max} 对应的 I_{d_max} ，结合图 2-7，即可求解 MMC-HVDC 的功率传输极限 P_{c_max} 。

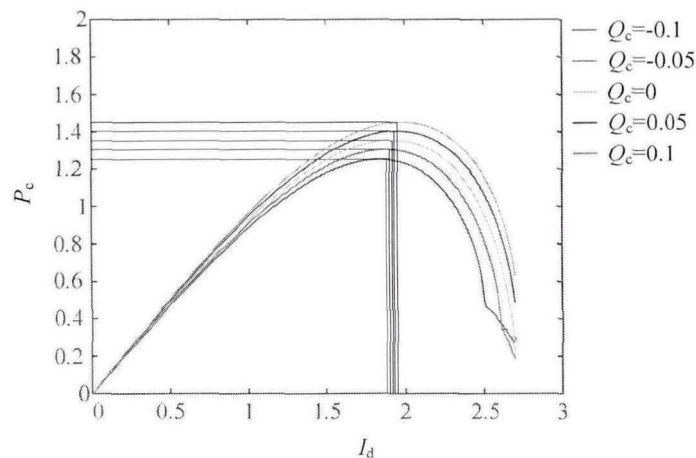


图 2-7 P_c 随 I_d 变化曲线

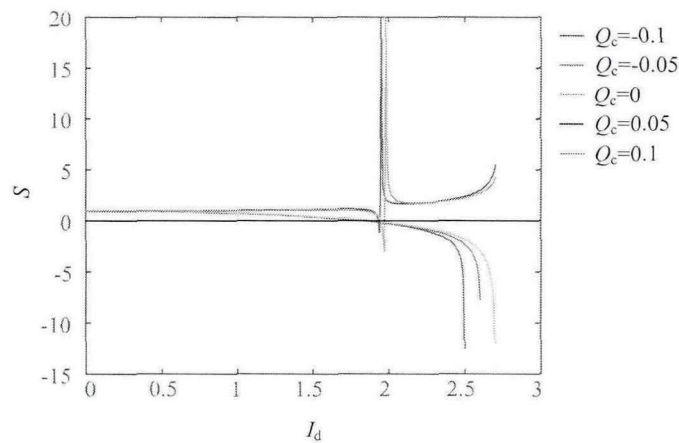


图 2-8 S 随 Id 变化曲线

为更好的对比 STATCOM 接入后受端电网的等效短路比变化，将不同控制方式下受端电网的等效短路比列于表 2-2 中，在控制量保持为 0 时，无 STATCOM 接入的受端电网等效短路比为 2.7085。同时，如图 2-9 所示，可以发现随着 MMC-HVDC 注入系统的无功功率不断变大，受端电网的等效短路比减小。

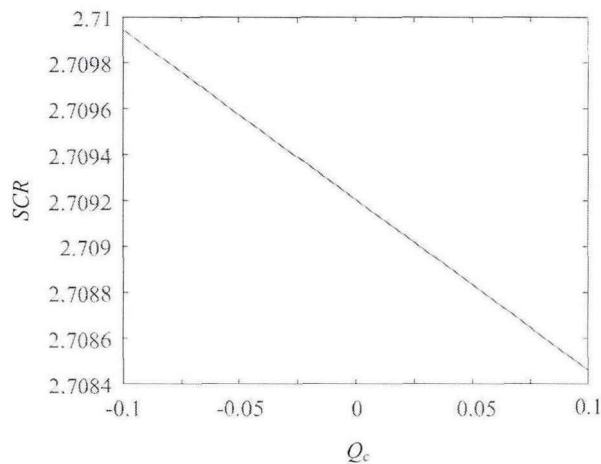


图 2-9 受端等效短路比 SCR

如表 2-1 所示，在不同的控制量下均可求解出 MMC-HVDC 的最大传输功率，并且在 $Q_c=0.1$ 时能够求得 MMC-HVDC 的最大传输功率 $P_{c_max}=1.4501$ 。

表 2-1 不同控制量下的 P_{c_max}

Q_c	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
P_{c_max}	1.2496	13035	1.3546	1.4033	1.4501
I_{d_max}	1.88	1.90	1.93	1.93	1.95

表 2-2 不同控制量下的等效短路比 SCR_{eq}

Q_c	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
SCR_{eq}	2.7099	2.7095	2.709	2.7088	2.7084

2.4.1.2 接入 STATCOM 的四节点模型求解

按照 2.2 节的内容，首先将受端电网进行等效处理，利用等效模型求解 MMC-HVDC 的极限传输功率，并观察其变化规律。如表 2-3 所示，随着接入点的不断变化，受端电网的等效短路比也不断变化。

表 2-3 不同接入点以及 MMC-HVDC 不同控制量下的等效短路比

$d \backslash Q_c$	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
0.1	3.520809	3.028369	2.614728	2.283159	2.037166
0.15	3.534388	3.041118	2.627848	2.298034	2.055388
0.2	3.543858	3.050222	2.637412	2.309067	2.069105
0.25	3.550446	3.056774	2.644504	2.31746	2.079778
0.3	3.554894	3.061439	2.649782	2.323945	2.088291
0.35	3.557658	3.064629	2.653661	2.328984	2.095205
0.4	3.559023	3.066605	2.656403	2.332872	2.100884
0.45	3.559157	3.067524	2.658172	2.335798	2.105565
0.5	3.558146	3.067469	2.659057	2.337873	2.109399
0.55	3.556009	3.066464	2.65909	2.339145	2.11247
0.6	3.552702	3.064476	2.65825	2.339608	2.114798
0.65	3.548118	3.061412	2.656454	2.339194	2.11634
0.7	3.54207	3.057109	2.653549	2.337755	2.116965
0.75	3.534268	3.051301	2.649277	2.335032	2.116423
0.8	3.52427	3.043578	2.643224	2.330589	2.114258
0.85	3.511403	3.033295	2.634719	2.323687	2.109652
0.9	3.494619	3.019418	2.622636	2.313023	2.101085

通过表 2-2 可以发现，在 STATCOM 接入后，不同控制量下的 MMC-HVDC 受端等效短路比变化极为明显，尤其是在 MMC-HVDC 无功控制量为负值即吸收无功功率时，能够有效地提高受端电网等效短路比。

对含有 MMC-HVDC 的等效模型求解各运行工况下的调制比，如图 2-10 所示。在 STATCOM 接入后，在控制器限幅下 MMC-HVDC 的电压调制比将不再完全满足限制条件，因此必须将 I_d 限制在某个范围内，使得调制比小于 1，求取 I_d 在不同工况下的满足调制比限制的最大取值，并标注于图 2-11 中。

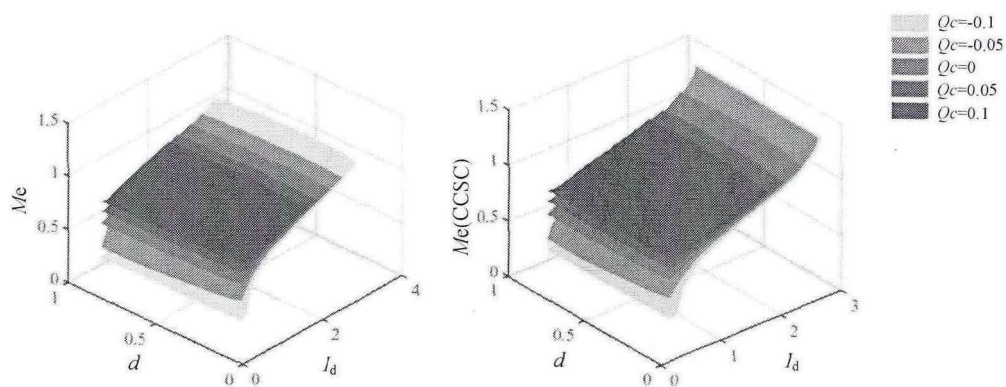


图 2-10 四端电网不同工况下的 MMC-HVDC 电压调制比 M_e

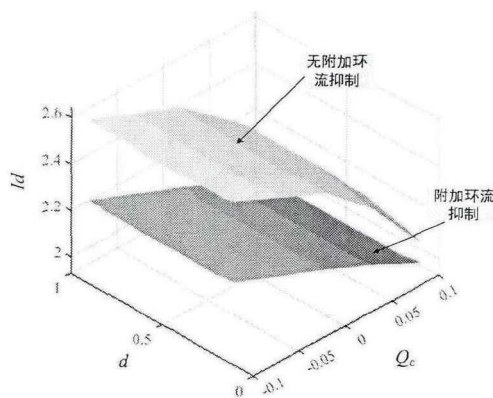


图 2-11 不同运行工况下的 I_d 取值范围

为方便直接求解在 I_d 允许范围内 MMC-HVDC 的传输极限，利用图 2-12 所示的稳定判据进行判断。从图中可以发现，整个 I_d 较大的运行范围内，稳定判据均与 0 无交点，即能满足稳定条件。因此，如图 2-13 所示，在允许的运行工况下，MMC-HVDC 传输功率的最大值即为其传输极限。

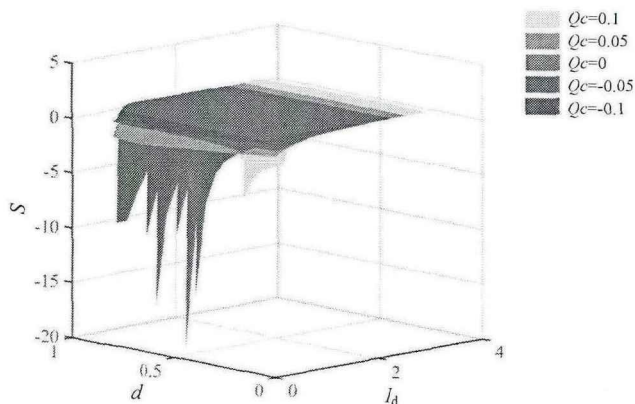


图 2-12 不同运行工况下的 MMC-HVDC 稳定判据

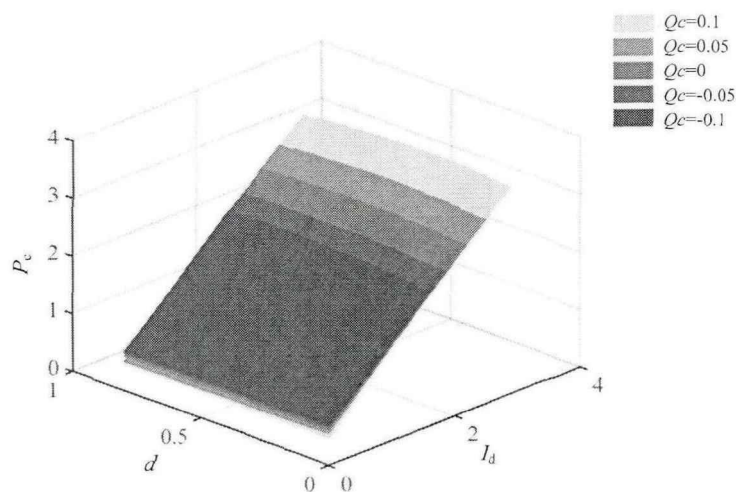


图 2-13 不同运行工况下的 MMC-HVDC 传输功率 P_c

如表 2-4 所示，求解所有工况下的 P_{c_max} ，并将无环流抑制部分绘制于图 2-14 中。

通过表 2-4 P_{c_max} 的计算结果可以明显发现，在定无功功率控制方式下，无功控制量在由负变正时，MMC-HVDC 所能达到的传输极限逐渐变小；并且在定无功功率控制方式下， I_d 在控制器限幅范围内取值时，系统均能满足系统稳定判据，对 MMC-HVDC 传输极限产生影响的是交流调制比 M_c 限制；STATCOM 的接入点变化会对 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限产生影响。

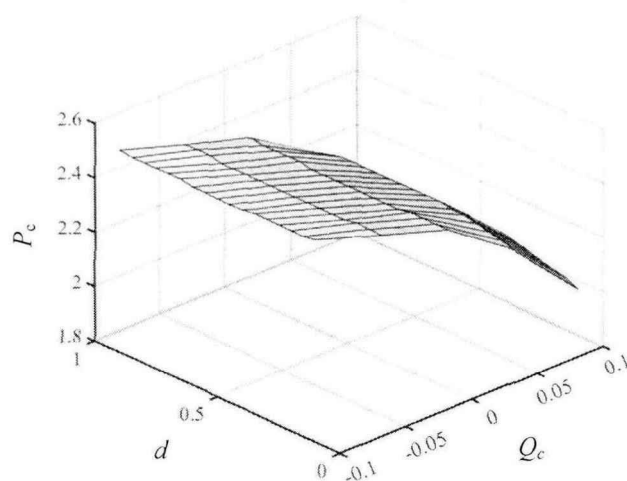


图 2-14 无附加环流抑制的下的 P_{c_max}

表 2-4 无附加环流抑制的下的 P_{c_max}

$d \backslash Q_c$	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
0.1	2.543382	2.462265	2.381719	2.209738	1.967581
0.15	2.535266	2.464338	2.383667	2.221832	1.989802
0.2	2.536751	2.465737	2.384981	2.233309	2.001213
0.25	2.537785	2.456437	2.385894	2.244397	2.012249
0.3	2.53851	2.457121	2.376292	2.255219	2.023027
0.35	2.539008	2.45759	2.376731	2.255632	2.033616
0.4	2.529028	2.45789	2.377011	2.266107	2.044058
0.45	2.529196	2.458047	2.377158	2.266243	2.044184
0.5	2.529227	2.458075	2.377183	2.266264	2.0442
0.55	2.529125	2.457977	2.377089	2.266174	2.054299
0.6	2.528883	2.457748	2.376872	2.265967	2.054094
0.65	2.538785	2.45737	2.376515	2.265629	2.053762
0.7	2.538199	2.456815	2.386236	2.265132	2.053276
0.75	2.537372	2.45603	2.385498	2.264431	2.052592
0.8	2.536214	2.465212	2.384465	2.26345	2.051636
0.85	2.534569	2.463656	2.382998	2.251828	2.040073
0.9	2.542471	2.461368	2.391101	2.239532	2.03807

将 MMC-HVDC 接入有无 STATCOM 的受端电网下能够取得的最大传输功率列于表 2-5、表 2-6。通过对比分析可以发现，在 STATCOM 接入后 MMC-HVDC 的传输极限有较大的变化，在各种工况下，均能有效的提升 MMC-HVDC 的传输功率极限。

表 2-5 接入无 STATCOM 的受端电网下的 P_{c_max}

Q_c	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
P_{c_max}	1.2496	13035	1.3546	1.4033	1.4501
I_{d_max}	1.88	1.90	1.93	1.93	1.95

表 2-6 接入有 STATCOM 的受端电网下的 P_{c_max}

Q_c	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
P_{c_max}	2.5434	2.4657	2.3911	2.2662	2.0542
I_{d_max}	2.64	2.55	2.45	2.33	2.11

2.4.2 MMC-HVDC 选取定交流电压控制方式

2.4.2.3 无 STATCOM 的三节点模型求解

MMC-HVDC 选择为定交流电压控制方式，其中，换流器母线电压 U_l 控制在 0.9~1.1pu 之间。

首先求解在没有 MMC-HVDC 接入时的三节点下的 MMC-HVDC 最大传输功率结果。

为更好的对比 STATCOM 接入后受端电网的等效短路比变化，将不同控制方式下受端电网的等效短路比列于表 2-7 中，在控制量保持为 1 时，无 STATCOM 接入的受端电网等效短路比为 2.29。同时，如图 2-15 所示，随着 MMC-HVDC 交流侧电压的控制量不断变化，受端电网的等效短路比也在不断变化。

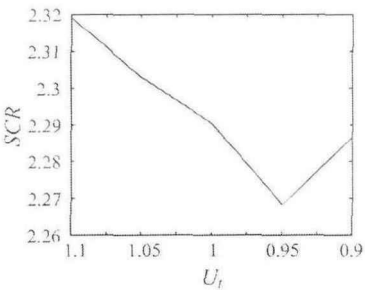


图 2-15 受端电网等效短路比 SCR_{eq}

表 2-7 不同控制量下的受端电网等效短路比 SCR

U_l	1.1	1.05	1	0.95	0.9
SCR_{eq}	2.3191	2.303	2.29	2.268	2.287

在不同的换流母线电压下 MMC-HVDC 调制比如图 2-16 所示，由图可知，在 I_d 允许范围内， M_c 不能完全满足要求，因此求解 MMC-HVDC 的传输功率极限需要在调制比的限制范围内进行。

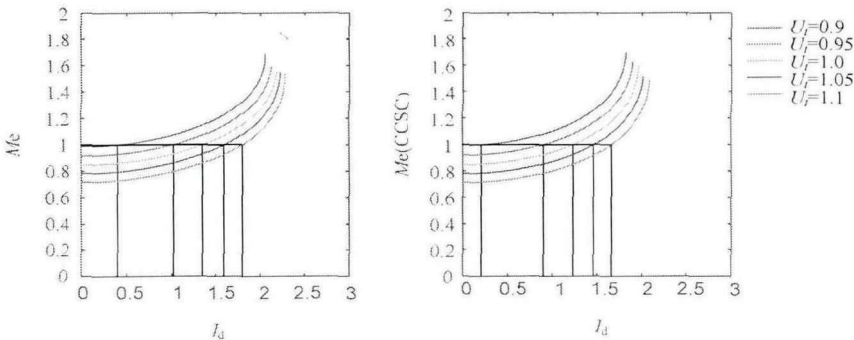


图 2-16 M_c 随 I_d 变化曲线

在 I_d 允许范围内，MMC-HVDC 的传输极限取决于稳定判据 S ，如图 2-17 所示，MMC-HVDC 的传输极限对应的 I_d 明显大于调制比允许范围的直轴电流值，因此，如图 2-18 所示的根据稳定判据求解的 I_d 对应的 MMC-HVDC 的传输功率并非 MMC-HVDC 的传输功率极限。

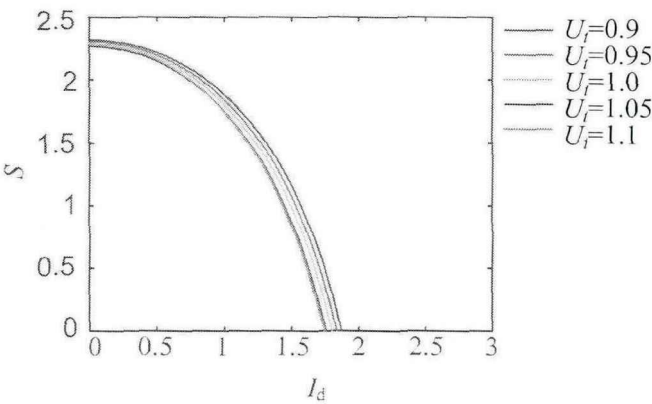


图 2-17 I_d 允许范围内的稳定判据 S

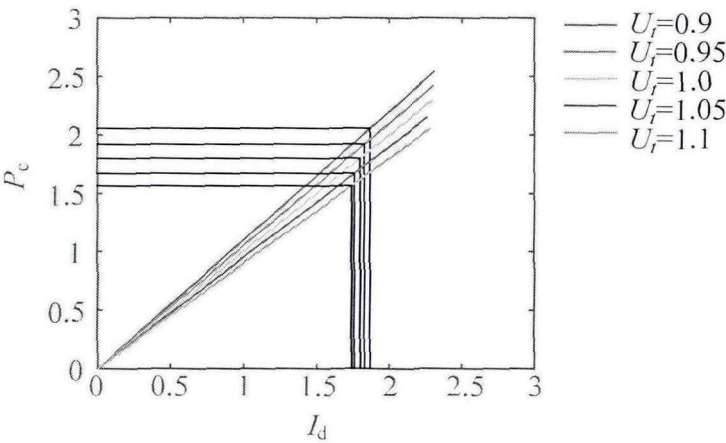


图 2-18 稳定判据下的最大传输功率值

将 I_d 能取得最大值 I_{d_max} 以及 I_d 在调制比限制下能取到的最大值，均列写在中表 2-8，选取较小者计算 MMC-HVDC 的传输极限 P_{c_max} ，方便与 STATCOM 接入后进行比较。

表 2-8 不同限制下的 I_{d_max}

U_f	1.1	1.05	1	0.95	0.9
Me_cir_id	0.4	1.02	1.35	1.59	1.80
Id_max	1.87	1.83	1.8	1.76	1.74

取上述表格中较小的 I_d 作为各运行工况下的 I_d 极限值，并求解 MMC-HVDC

的传输功率极限，列于表 2-9。

表 2-9 不同控制量下的 P_{c_max}

U_l	1.1	1.05	1	0.95	0.9
P_{c_max}	0.4095	1.070	1.4175	1.659	1.89
I_{d_max}	0.4	1.02	1.35	1.59	1.80

2.4.2.4 接入 STATCOM 的四节点模型求解

首先，将受端电网进行等效处理，如表 2-10 所示，随着接入点的不断变化，受端电网的等效短路比也不断变化，不仅与 MMC 的控制量有关，与 STATCOM 的接入点关系更为紧密，为方便观察，将其绘制于图 2-19。

表 2-10 受端电网等效短路比 SCReq

$\begin{matrix} U_l \\ d \end{matrix}$	1.1	1.05	1	0.95	0.9
0.1	3.520809	3.028369	2.614728	2.283159	2.037166
0.15	3.534388	3.041118	2.627848	2.298034	2.055388
0.2	3.543858	3.050222	2.637412	2.309067	2.069105
0.25	3.550446	3.056774	2.644504	2.31746	2.079778
0.3	3.554894	3.061439	2.649782	2.323945	2.088291
0.35	3.557658	3.064629	2.653661	2.328984	2.095205
0.4	3.559023	3.066605	2.656403	2.332872	2.100884
0.45	3.559157	3.067524	2.658172	2.335798	2.105565
0.5	3.558146	3.067469	2.659057	2.337873	2.109399
0.55	3.556009	3.066464	2.65909	2.339145	2.11247
0.6	3.552702	3.064476	2.65825	2.339608	2.114798
0.65	3.548118	3.061412	2.656454	2.339194	2.11634
0.7	3.54207	3.057109	2.653549	2.337755	2.116965
0.75	3.534268	3.051301	2.649277	2.335032	2.116423
0.8	3.52427	3.043578	2.643224	2.330589	2.114258
0.85	3.511403	3.033295	2.634719	2.323687	2.109652
0.9	3.494619	3.019418	2.622636	2.313023	2.101085

通过表 2-10 可以发现，在 STATCOM 接入后，不同控制量下的 MMC-HVDC 受端等效短路比变化极为明显，尤其是在 MMC-HVDC 交流侧电压控制量大于 1 时，能够有效地提高受端电网等效短路比。

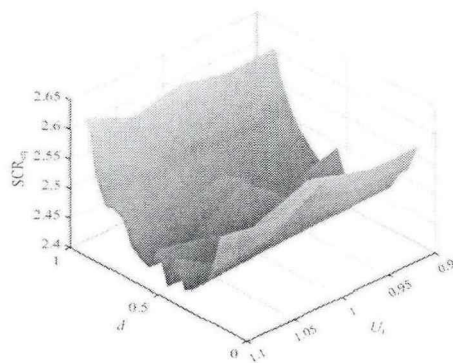


图 2-19 受端电网等效短路比 $SCReq$

按照 2.2 节所建立的模型，求解在调制比约束、 I_d 取值范围以及稳定判据 S 限制下的 P_{c-max} 。与定无功功率控制方式下的求解方式类似，如图 2-20 所示，不断调整 STATCOM 的接入点 d ，在 I_d 取值范围内求解 M_e ，由于 M_e 的取值限制，并非所有 I_d 都能满足要求，将不同工况下满足调制比限幅的 I_d 最大值绘制于图 2-21，可以发现在不同的电压控制量下会有极为明显的差异，同时随着 STATCOM 接入点的变化，亦有差异。

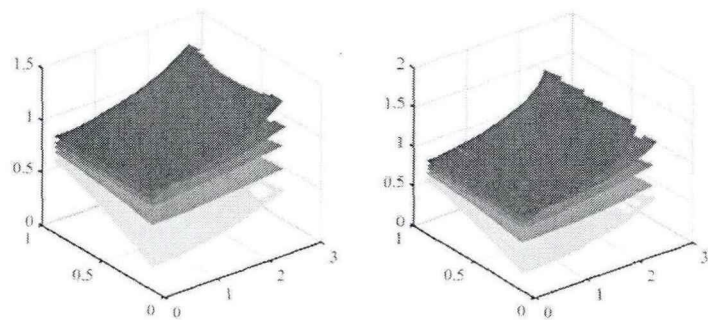


图 2-20 不同工况下的调制比 M_e

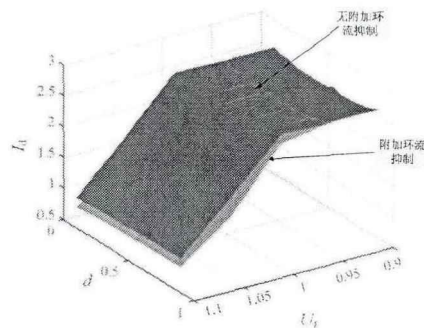


图 2-21 各工况下的 I_d 最大取值范围

在 I_d 的取值范围内，求解 MMC-HVDC 稳定判据 S 绘制于图 2-22，从图中可以发现， S 始终大于 0，结合所有工况下的 P_c ，进而求取 MMC-HVDC 所能达到的功率传输极限。

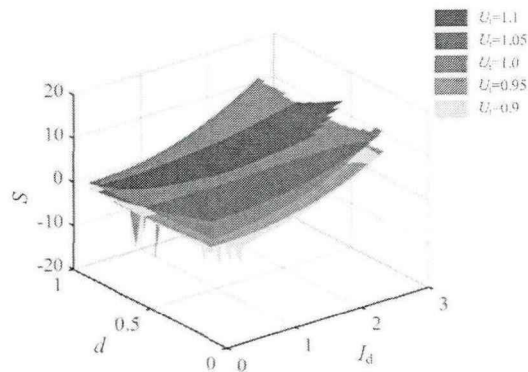


图 2-22 I_d 的取值范围内 MMC-HVDC 稳定判据 S

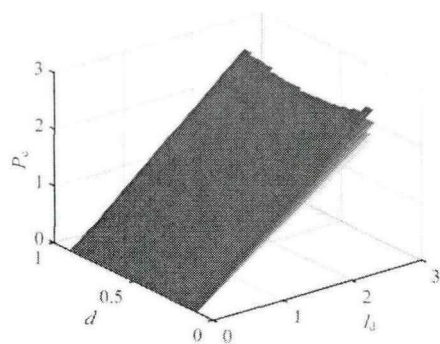


图 2-23 I_d 的取值范围内 MMC-HVDC 传输功率 P_c

由于稳定判据 S 始终大于 0，因此 P_c 随 I_d 增大不断增大，如图 2-23，在 I_d 取值范围内 MMC-HVDC 传输功率 P_c 最大值即为 MMC-HVDC 的功率传输极限。如图 2-24、表 2-11 所示，即为 MMC-HVDC 在 STATCOM 不同接入点，不同控制量下的极限传输功率。

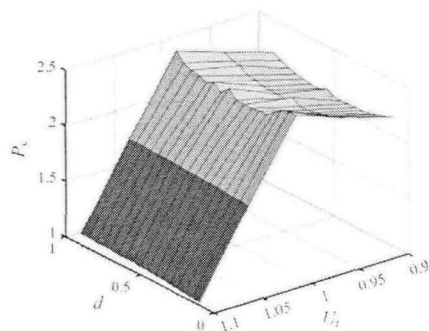


图 2-24 不同运行工况下的 MMC-HVDC 极限传输功率 P_{c-max}

表 2-11 不同运行工况下的 MMC-HVDC 极限传输功率 P_{c-max}

$\frac{U_i}{d}$	1.1	1.05	1	0.95	0.9
0.1	1.0290	1.7500	2.4415	2.2950	2.1675
0.15	1.0290	1.7700	2.4415	2.2500	2.1335
0.2	1.0395	1.7700	2.4225	2.2320	2.1165
0.25	1.0500	1.7800	2.3655	2.2140	2.0910
0.3	1.0500	1.7900	2.3180	2.1960	2.0825
0.35	1.0605	1.7900	2.3085	2.1870	2.0740
0.4	1.0605	1.7900	2.2990	2.1870	2.0740
0.45	1.0710	1.8000	2.2990	2.2320	2.0655
0.5	1.0710	1.8000	2.3085	2.1870	2.0740
0.55	1.0815	1.8100	2.3750	2.1960	2.1080
0.6	1.0815	1.8100	2.3085	2.1960	2.0740
0.65	1.0815	1.8100	2.3655	2.1960	2.0825
0.7	1.0920	1.8100	2.3275	2.2140	2.0910
0.75	1.0920	1.8100	2.3560	2.2230	2.1080
0.8	1.0920	1.8200	2.3750	2.2770	2.1250
0.85	1.1025	1.8200	2.4035	2.2860	2.1590
0.9	1.1025	1.8100	2.4795	2.3310	2.2015

通过表 2-11 中 P_{c_max} 的计算结果可以明显发现，在定交流电压控制方式下，当交流电压控制在 1 时，MMC-HVDC 所能达到的传输极限最大，随着电压偏离额定值，逐渐减小；在定交流电压控制方式下，在交流侧控制电压大于 1 时，MMC-HVDC 稳态功率传输极限的主要影响因素是交流调制比 Me ，在交流电压低于 1 时，MMC-HVDC 稳态功率传输极限的主要影响因素是 MMC-HVDC 的控制器限幅；STATCOM 的接入点变化会对 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限产生影响。

将 MMC-HVDC 接入有/无 STATCOM 的受端电网下能够取得的最大传输功率列于表 2-12、表 2-13。通过对比分析可以发现，在 STATCOM 接入后 MMC-HVDC 的传输极限有较大的变化，在各种工况下均能有效的提升 MMC-HVDC 的传输功率极限。

表 2-12 接入无 STATCOM 的受端电网下的 P_{c-max}

U_i	1.1	1.05	1	0.95	0.9
I_{c_max}	0.4095	1.070	1.4175	1.659	1.89
I_{d_max}	0.4	1.02	1.35	1.59	1.80

表 2-13 接入有 STATCOM 的受端电网下的 P_{c-max}

U_r	1.1	1.05	1	0.95	0.9
P_{c_max}	1.1025	1.8200	2.4795	2.3110	2.2015
I_{d_max}	1.06	1.83	2.62	2.60	2.60

2.4.3 稳态下等效模型求解结果对比

通过对比在不同控制方式下 STATCOM 接入受端电网后 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限可以得到以下结论：

(1)对于任意形式的受端电网，在得知受端电网等效短路比的情况下，均能够利用等效模型的处理方法求解 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限，此方法适用于任何可进行等效处理的受端电网。

(2)在不同的控制方式下，STATCOM 接入受端电网能够有效地提高 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限。

2.5 故障下 STATCOM 对柔直功率恢复的影响

根据前三节对稳态模型的研究，证明在 STATCOM 接入的条件下，能够有效的提升 MMC-HVDC 的功率传输极限并从稳态的角度证明受端电网等效处理方法的有效性。本节借助 2.3 节建立的四节点模型，在柔直近端发生短路故障的情况下，对比 STATCOM 对柔直功率恢复的影响。

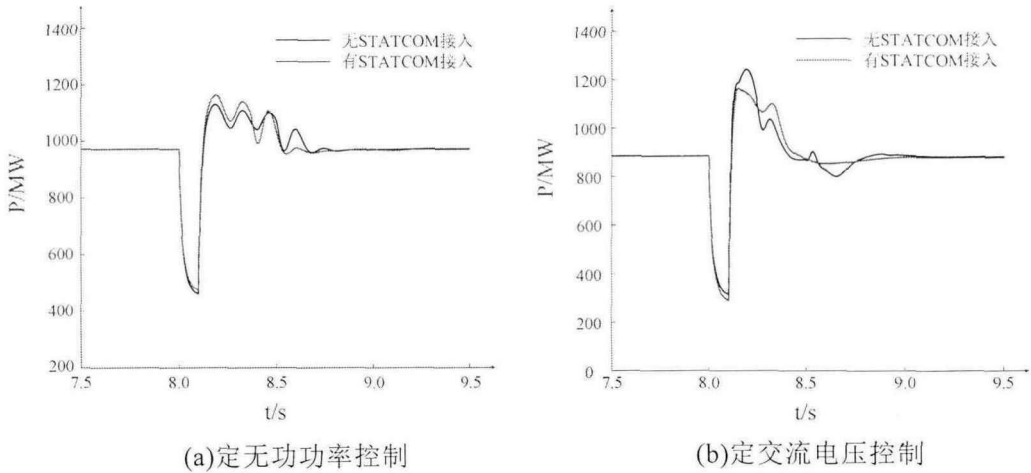


图 2-25 STATCOM 接入常规直流附近

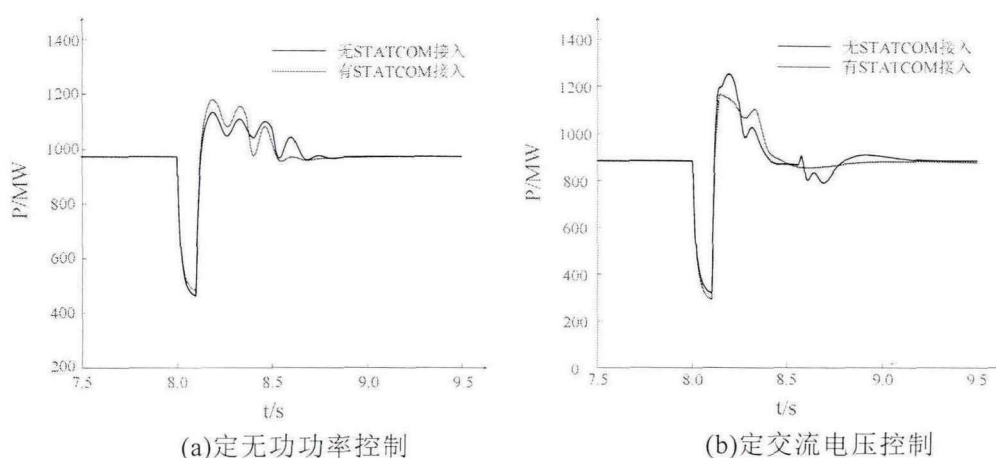


图 2-26 STATCOM 接入 MMC-HVDC 附近

如图 2-25 和图 2-26 所示，在不同的接入点以及柔直的不同控制方式下，STATCOM 的接入都能使 MMC-HVDC 在故障后以更快的速度恢复稳定，改善 MMC-HVDC 在故障下的功率恢复效果。

2.6 本章小结

(1)本章构建了含有 MMC-HVDC、LCC-HVDC、STATCOM 以及交流系统的四端电网，并结合 MMC-HVDC 等效模型和受端电网的等效模型求解 MMC-HVDC 的稳态功率传输极限，证明此求解方法适用于任何可等效处理的受端电网。同时对比 STATCOM 接入前后 MMC-HVDC 的功率传输极限，证明 STATCOM 的接入能够有效提升不同控制方式下的 MMC-HVDC 的传输极限。

(2)通过上述算例证明，对于 MMC-HVDC 的接入，仅需计算受端电网的等效短路比 SCR_{eq} 以及受端电网等效电压值，配合 MMC-HVDC 的等效模型，即可求解出 MMC-HVDC 所能达到的传输极限，对后续受端电网无功补偿优化过程中受端电网承载能力的求解具有重要意义。

(3)本章分析证明，为提升受端电网对柔性直流承载能力，可以选择进行 STATCOM 的配置。

第3章 考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型

3.1 引言

通过对第2章的分析与论证,证明STATCOM不仅仅能够提升受端电网的电压稳定性,还能够提升柔性直流的极限传输能力。

本章将构建考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型,模型相对于以往的动态无功补偿优化模型,最大的区别是优化过程中能够充分考虑柔性直流的接入以及柔性直流接入后能否满足规划需求的问题,在提升受端电网电压稳定性的同时,提升柔性直流的极限传输能力,保证受端电网的柔直承载能力满足柔直规划建设需要。

3.2 动态无功补偿优化模型

本节将整个动态无功补偿优化策略分为两步进行处理:

第一步,柔性直流接入优化策略。在整个受端电网系统中,选择出最合适的柔性直流接入点,充分发挥柔性直流的无功特性,并考虑柔性直流接入后受端电网稳态下对于柔性直流的承载能力,选择最佳的柔性直流接入点,为受端电网的无功补偿优化配置奠定基础。

第二步,在柔性直流接入点确定以后,对受端电网的薄弱节点进行动态无功补偿装置的优化。考虑关键故障对受端电网电压稳定性的影响以及动态无功补偿装置对于柔性直流承载能力的改善,将受端电网对系统柔性直流承载能力满足规划需求作为硬性约束,实现最终的动态无功补偿装置的优化。

为了使动态无功补偿装置的配置策略更加合理,在提高系统暂态电压稳定性的同时必须考虑动态无功补偿装置的建设成本等因素,提升动态无功补偿优化配置的经济性,因此动态无功补偿的优化配置不是一个单目标的优化问题,而是一个多目标优化问题。目前国内外在优化问题解决方法的选择方面,学者们主要集中于利用基本优化方法和智能算法进行解决^[39-40]。就基本优化方法而言,其优化方法仅仅适用于处理某种单一目标的优化问题,局限性比较大;智能算法相对于基本优化方法,适用范围就要广的多,但是也存在一些问题,例如局部最优等问题。因此对于多目标优化配置问题,目前仍需不断的研究和完善。

本章就受端电网对于柔性直流的承载能力以及改善受端电网电压稳定性等

问题, 根据动态无功补偿设备能够有效改善受端电网等效短路比以及具有提供动态电压支持的能力, 同时考虑动态无功补偿的经济性问题, 选择常用的动态无功补偿设备 STATCOM 进行优化配置, 建立多目标的优化配置模型。在基本优化分析的基础上, 提出两步法, 并结合智能算法解决动态无功补偿装置的地点和容量的选择问题, 证明动态无功优化配置方案在提升受端电网电压稳定性以及改善受端电网柔直承载能力方面的有效性。

3.2.1 考虑柔直承载能力的多目标优化模型

多目标数学优化问题 (Multi-objective Optimization Problem, MOP)^[41]主要指需要考虑两个及以上目标的问题, 在本文所需要研究的动态无功补偿优化配置问题中, 需要考虑动态无功补偿在暂态情况下对于电压稳定的提升情况, 动态无功补偿装置的建设费用, 而且还要考虑受端电网对于柔性直流的承载能力变化, 使配置方案具有较好的工程实用性。

本章建立的多目标优化问题具有一个明显的特征, 即各目标之间往往具有相反的效果, 某一个目标性能的极度优化会导致其他目标趋于劣势, 进而使得整体的优化效果较差。例如动态无功补偿装置容量的增加能够有效的提高受端电网的稳定性, 但是其投资成本将不断增大会使得经济性较差。同时由于目标与目标之间的度量单位不一致, 如何将其进行归一化处理以及归一化的标准是否合理也是问题之一, 因此很难有效地评价多目标优化问题结果是否为最优。

多目标优化的求解方法一般有以下几种: (1) 多目标函数优先处理法^[5], 即在优化求解之前利用某种规则或方法将多目标优化转化为单目标优化问题, 需要根据多目标函数的特点对其进行适当的处理, 通常采用阈值化、中心化、规格化、atan 函数化等方法进行去量纲化; (2) 在将不同目标函数的最优解组成最优解集合后, 由决策人员根据优化需求选择某种方案作为最优解^[42]; (3) 结合上述两种思路, 在算法过程中结合人员决策, 首先利用智能算法提供较优解群组, 再由决策人员根据较优解群确定新的优化进程方向, 二者不断交替进行逐步寻得最优解。

本文所提出的动态无功补偿优化配置问题需要考虑众多约束, 包括受端交流电网的系统平衡约束、发电机运行的微分约束以及无功补偿的容量约束等。与此同时, STATCOM 的容量以及安装位置均属于整数变量, 因此该问题属于一个规模庞大的混合整数非线性优化问题。但是就其两个主要的优化目标来看, 经济性目标属于单调性的优化函数, 同时随着补偿容量的增大, 对于电网电压稳定性的提升也是具有单调性的提升, 因此对于固定范围内的补偿容量, 会有相对明显的最优解。

实现 STATCOM 的补偿优化，首先需要了解 STATCOM 的工作原理。STATCOM 包括一个大容量的储能电容和基于电压源型换流器的换流系统，换流器通过换流变压器接入受端系统，如图 3-1 所示， U_{st} 表示系统母线电压， U_i 表示变换器输出的电压， I 分别表示系统流向 STATCOM 的电流， jX_{st} 表示 STATCOM 与电网之间连接电抗， U_{dc} 表示 STATCOM 直流侧的电容电压^[43]。

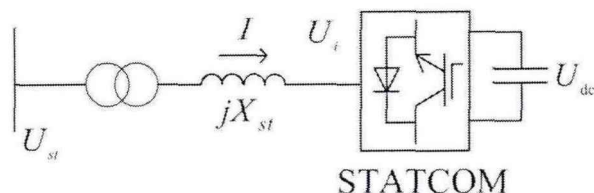


图 3-1 STATCOM 简化模型

根据第 2 章对 STATCOM 外特性的研究可知，STATCOM 采用定电压控制方式，因此可以将 STATCOM 等效成可控电压源，系统看做是理想的电压源。当 STATCOM 母线电压大于系统电压的时候，从系统向 STATCOM 流入的电流相位超前系统电压一定的角度，STATCOM 工作在容性区，输出感性的无功；当 STATCOM 母线电压小于系统电压的时候，从系统向 STATCOM 流入的电流相位滞后系统电压一定的角度，STATCOM 工作在感性区，输出容性的无功；当 STATCOM 母线电压等于系统电压的时候，STATCOM 不向系统有无功交换。 I 为 STATCOM 注入控制节点的电流幅值， U_i 为 STATCOM 侧的实际电压幅值， U_{st} 为系统侧控制节点的实际电压幅值，因此有 STATCOM 注入系统的视在功率 $S=U_i I$ ，其注入的视在功率可以视为 STATCOM 的容量^[5]。

电力系统运行过程中的动态约束方程如式 (3-1) 所示，其中 x 表示系统的状态变量， y 表示系统的代数变量。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= w(x, y) \\ g(x, y) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

微分方程主要包括考虑阻尼绕组的发电机动态过程、励磁系统控制动态过程、电力系统稳定器控制过程、原动机控制的动态过程、STATCOM 控制器的动态过程、柔性直流控制器的动态过程以及常规直流的动态过程等。等式约束包括电力系统网络方程、发电机平衡方程和静态负荷平衡方程。不等式约束包括发电机有功无功出力的上下限、有功无功负荷的上下限、线路输送功率的上限、柔性直流的输送功率限制、常规直流的输送功率限制、柔性直流/常规直流控制器限幅以及 STATCOM 接入容量范围限制等。

在具体的优化目标问题上，动态无功补偿问题需要充分考虑动态无功补偿装置对电压稳定的提升效果，同时注意动态无功补偿装置的成本问题以及第 2 章提出的动态无功补偿装置对受端电网承载能力的提升问题。因此在对动态无功补偿装置进行优化处理时，选取动态无功补偿装置对电压稳定的提升能力、动态无功补偿配置的经济性以及受端电网对柔直的承载能力三个角度作为优化的目标。

1、目标一：受端电网电压稳定性提升能力

提升受端电网的电压稳定性是动态无功补偿装置接入电网之后最主要的功能，也是众多学者主要考虑的问题，相关研究已经极为成熟。动态无功补偿装置的接入点以及接入容量都会对其提升效果有较大的影响，因此需要对接入的装置容量和位置进行调整，选择最优方案。为更好的评价其实际效果，需要对所有的故障和母线电压进行监控，此过程会给整个优化过程带来极大的困难，一般需要配合故障的筛选。本文使用一个已经极为成熟的评价指标对电网电压的稳定性进行定量分析，即轨迹灵敏度指标（trajectory sensitivity index, TSI）^[44]。

轨迹灵敏度指标的实质为故障期间暂态电压提升效果的累计值，即记录补偿前后所有时刻的暂态电压差进行累加。但是在实际的暂态过程中，需要考虑采样的时间间隔以及故障类型的不同，由于本文借助 PSD-BPA 进行仿真求解暂态数据，其采样时刻与仿真的步长一致，故采样时刻的权重均为 1。对于电网而言，为了方便地处理电网电压，只监控 500kV 母线的暂态电压，其重要程度一致，因此母线权重也均取为 1。但是故障对于受端电网的影响是不一致的，有些故障对于电网的影响极大，可能会导致系统失稳，因此本文需要对于故障的严重程度进行定量分析。在本文提出的动态无功补偿优化配置策略中，首先要处理故障权重的求解以及故障的筛选以简化计算。

2、目标二：无功补偿装置经济成本

动态无功补偿优化配置的主要优势是提高系统电压稳定性，但是进行无功补偿装置的配置就一定要付出较大的经济成本。通常来说，安装动态无功补偿设备的经济成本随着容量的增大，经济成本不断升高，即无功补偿设备的容量与投资成本不成线性关系。

3、目标三：柔性直流承载能力约束

柔性直流接入受端电网时会出现受端电网柔直承载能力不能完全满足规划需求的问题，通过第 2 章的研究发现，受端电网的柔性直流承载能力与受端电网动态无功补偿装置的配置有关，因此在无功补偿装置优化过程中，必须考虑无功补偿装置对受端电网柔直承载能力的影响。与常规动态无功补偿优化相比，

本文提出的优化处理必须在柔性直流接入受端电网的基础上进行，因此在无功补偿之前需要对柔性直流的接入点进行优化。在柔直接入优化过程中，只考虑柔直良好的无功特性，即只关注其对于电压稳定性的提升能力。为给无功补偿充分发挥的空间，在柔直接入优化时将受端电网对柔性直流的承载能力作为软约束处理，但在之后的无功补偿优化中将其作为硬性约束处理。

3.2.2 柔性直流接入以及动态无功补偿配置优化策略

柔性直流输电技术作为目前电力系统领域极具代表性的输电技术，我国在柔性直流输电领域的研究也愈发深入，目前已经具备将柔性直流输电进行大范围推广的技术基础。目前国内外学者在如何保证柔性直流输电稳定运行以及故障处理等方面做出了众多贡献，但就大规模的柔性直流在建设初期如何进行合理规划，寻求柔性直流并网的最佳接入方案，包括接在何处以及接入多少的问题相关研究仍然较少。柔性直流并网问题需要全面考虑柔性直流和受端电网之间的相互影响，同时需要考虑受端能否消纳柔性直流输送功率、受端电网强度能否保证柔直稳定运行、柔性直流故障期间对受端电网的影响、无功输送对于电网的支撑能力以及建设过程中的经济性问题。本节针对受端电网对柔性直流功率输送的约束，提出了受端电网对柔性直流承载能力的评估方法，并着重分析柔性直流在受端电网故障下对于受端电网稳定性的提升效果，选择出最合适的柔性直流接入方案。

柔性直流接策略的优化步骤如下：

(1)将柔直稳态模型与多馈入受端电网模型相结合，构成柔直接入的交直流电网模型；(2)选择交直流电网中的可行故障集，包括较高电压等级的线路三相短路故障、N-2 故障以及常规直流的故障问题等；(3)在可行故障集下进行故障仿真，通过记录暂态电压数据以及计算暂态电压跌落指标 TVDI，进行严重故障集的筛选；(4)根据实际的规划需求，例如地理位置和接入需求等，初步选定预配置方案；(5)在预配置方案中进行最优选择。

如图 3-2 所示，柔直接入优化以电压稳定性提升效果、经济性指标以及软约束惩罚项作为优化目标，优化约束包括柔性直流无功支撑能力限制即柔性直流本身的最大无功输出约束以及受端电网的柔直承载能力是否满足规划需求的软约束，软约束即允许柔直承载能力与规划需求之间具有一定的差额，将不满足的部分作为惩罚项加入到优化目标中。

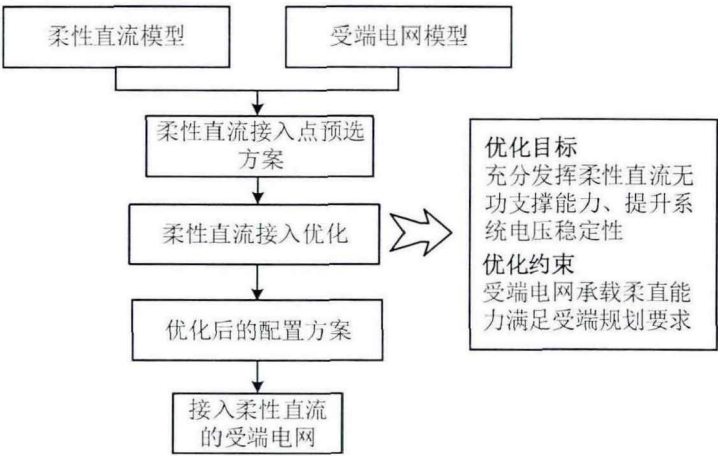


图 3-2 柔性直流接入优化流程

我国在常规直流输电和柔性直流输电方面都已具备一定的规模，使我国电网形态逐渐转变为交直流混联状态。直流输电确实给电网的跨区域输电带来了便利，但是交直流混联使得电网的结构发生了变化的同时也带来新的故障风险，给我国电网的暂态电压稳定带来更多的不确定性。动态无功补偿优化作为常用的有效增强电网电压稳定性的手段之一，能够在电网发生电压失稳时注入无功以改善电网的无功流动和分布，保证电网电压的稳定性。

在动态无功补偿问题上，补偿节点和容量优化是动态无功补偿的两个重要优化变量，无功补偿装置普遍按照就地补偿的原则进行。因此补偿地点主要选择在电网的薄弱节点，薄弱节点的判别主要根据电压稳定性指标，其中电压稳定性的评估分为静态电压稳定指标和暂态电压稳定指标两个方面。现有的众多研究中，主要着眼于静态电压稳定性，但随着电网规模的不断发展以及电网负荷的增加，电网的静态电压稳定性已经不再是电网稳定性的决定因素，保证电网的暂态电压稳定性成为无功规划的主要目的。静态电压稳定评估指标主要有短路比法、最大功率法^[45]、L 指标^[46]、模态分析^[47]、分岔理论^[48]等，暂态稳定分析主要有能量函数法、时域仿真分析法等。

目前国内外学者对动态无功补偿装置的优化配置的相关研究较多，从优化方法的角度可以分为两大类：一类属于启发式搜索算法，例如烟花算法^[49]、粒子群算法^[50,51]和遗传算法^[52]等，另一类基于最优化理论，包括线性规划、非线性规划、二次规划和拉格朗日松弛法等^[53]。第一类方法凭借其不受优化函数非光滑非连续影响的优点在动态无功补偿优化领域受到十分广泛的应用。第二类方法鲁棒性强，针对凸优化问题具有较好的效果，但是面对非光滑非连续函数时就很难进行，因此在非连续的整数优化模型的求解方面很少使用，多数用于

最优潮流的求解等。因此研究中绝大多数学者选择采用考虑受端电网电压稳定性和配置成本的优化模型，并配合智能优化算法对配置策略进行求解。

目前常用的暂态电压稳定性指标包括暂态电压跌落指标、暂态电压越限积分^[54]以及暂态电压轨迹灵敏度等。动态无功补偿优化的研究主要集中于利用轨迹灵敏度进行暂态电压稳定性的评估，稳定约束下的稳态潮流是轨迹灵敏度的求解基础，基于轨迹灵敏度可以对动态无功补偿装置进行规划选址。综上，本文提出了能够有效评估暂态电压稳定的指标，并提出了交直流混联系统动态无功补偿的选址和容量优化方法。

动态无功补偿策略的优化步骤如下：

(1)将柔直稳态模型与多馈入受端电网模型相结合，构成柔直接入的交直流电网模型；(2)选择交直流电网中的可行故障集，包括较高电压等级线路三相短路故障、N-2 故障以及常规直流的故障问题等；(3)在可行故障集下进行故障仿真，通过记录暂态电压数据和计算暂态电压跌落指标 TVDI 进行严重故障集的筛选；(4)根据暂态电压数据，寻找合适的无功补偿节点；(5)对各个节点分别补偿不同容量的动态无功补偿设备，进行严重故障集下的暂态仿真，并记录仿真数据；(6)求解优化目标，选择最佳补偿方案。

如图 3-8 所示，动态无功配置优化策略将以柔直接入后的交直流电网为基础，在柔直接入近区进行无功补偿接入点的配置优化，以提升电压稳定性，降低建设成本为优化目标，约束条件包括 FACTS 装置的容量限制、受端电网运行参数约束、柔性直流无功支撑能力约束以及受端电网承载能力满足规划需求约束。

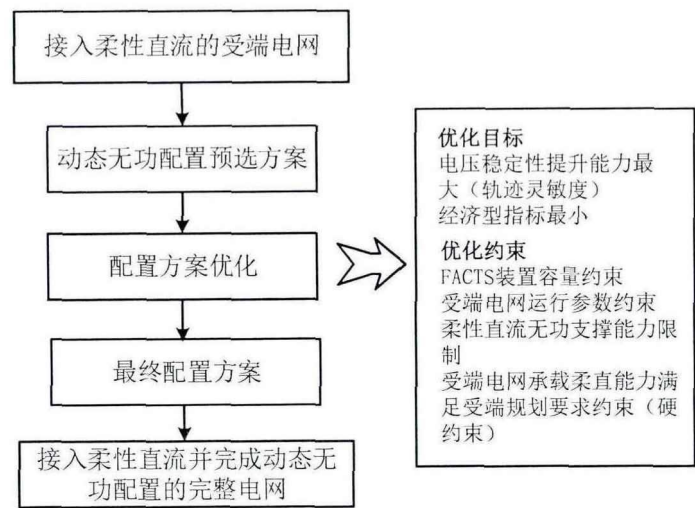


图 3-3 无功补偿接入优化流程图

3.2.3 柔性直流接入以及动态无功补偿配置优化模型

3.2.3.1 柔性直流接入优化模型

电网的故障多种多样，各种故障的严重程度也不完全一致，为更好地描述各种故障对电网稳定的影响，需要对不同的故障进行权重分析。由于并非所有的故障都会引起电网电压严重失稳，无需对所有故障都进行考虑。通过严重故障集的筛选以及不同故障的权重分析可以实现仿真和计算的简化，提高优化的准确性。

目前，国内外学者常通过指数边界下的暂态电压越限指标描述故障的严重程度，但是该指标对一些电压失稳较轻的节点没有明显的区分度。本文简化暂态电压失稳风险指标^[49]，使用暂态电压跌落指标 TVDI(Transient voltage drop indicator)描述电压失稳的严重程度。

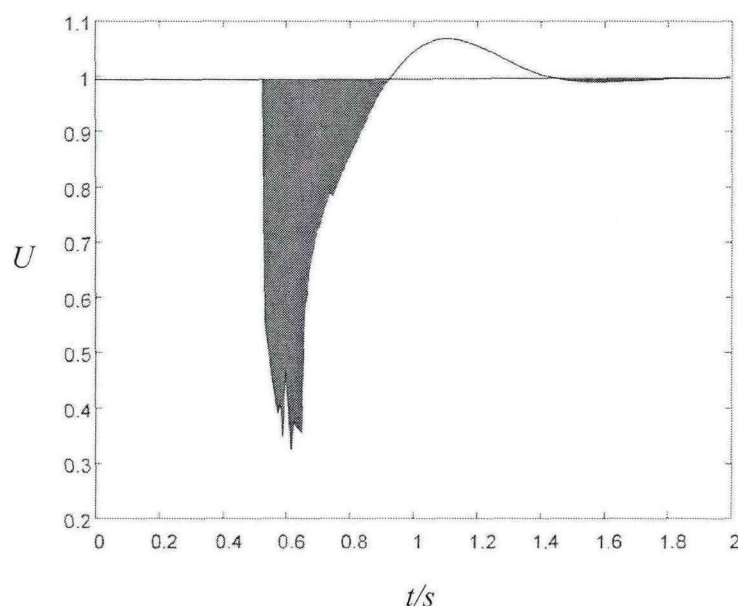


图 3-4 TVDI 示意图

TVDI 的具体表达式如下：

$$\text{TVDI} = S_k \times \rho_k \quad (3-2)$$

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r \Delta V_k^i(t) \Delta t \quad (3-3)$$

$$\Delta V_k^i(t) = \begin{cases} V_{k,t}^i - V_{k,0}^i & V_{k,t}^i \leq V_{k,0}^i \\ 0 & V_{k,t}^i \geq V_{k,0}^i \end{cases} \quad \forall t \in [t_s, t_e] \quad (3-4)$$

式中 S_k ——故障期间暂态与稳态电压差的积分值；

- n ——系统节点数；
 r ——从故障切除到仿真结束的步长数；
 ρ_k —— k 故障的发生概率；
 $V_{k,i}^i$ ——为 k 故障下 i 节点在 t 时刻电压值；
 V_0^i —— i 节点稳态电压值；
 $\Delta V_k^i(t)$ —— k 故障下 i 节点在 t 时刻电压跌落值；
 t_s ——故障切除时间；
 t_e ——仿真结束时间。

TVDI 越大证明在故障对系统的电压稳定性伤害越大，对 N 种故障下的 TVDI 值进行排序，选取 TVDI 较大的故障作为严重故障集。故障集的筛选可以大大减少优化的计算量，提高计算速度。

在柔性直流接入优化中，主要考虑其接入对于受端电网电压稳定性的影响以及受端电网对于柔性直流的承载能力，因此目标函数包括以下两项：

(1) 暂态电压的轨迹灵敏度指标 TSI

$$TSI_j = \sum_{l=1}^{N_k} W_l \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{N_k} U_{i,l} \left(t_k, Q_0 + \Delta Q_{j(MMC)} \right) - U_{i,l} \left(t_k, Q_0 \right) \right) \quad (3-5)$$

式中 ΔQ_{MMC} ——柔性直流对系统的无功注入量；

N_k ——仿真的总步长数；

N_F ——严重故障集数目；

$U_{i,l}$ —— i 节点在 l 故障下的电压值；

W_l —— l 故障的严重程度权重，计算方法见式(3-6)；

TSI_j —— j 节点在系统接入柔性直流后的轨迹灵敏度指标；

$$W_l = \frac{TVDI_l - \min(TVDI)}{\max(TVDI) - \min(TVDI)} \quad (3-6)$$

$$f_1 = TSI_j \quad (3-7)$$

(2) 受端电网柔性直流承载能力惩罚项

受端电网的柔性直流承载能力在实际的柔直接入过程中会因接入点的不同而发生改变，因此式 (3-8)将柔直稳态下下的输送功率极限与规划值之间的差额作为惩罚项加入到目标函数当中。若稳态下的柔直功率传输极限满足需求，则当做优化的约束条件加入到优化模型。

$$f_p = m \cdot (P_E - P_{\max}) \quad (3-8)$$

柔直模型的建立涉及的主要优化目标为柔直对受端电网的稳定性的提升，因此柔直接入优化目标为：

$$f_{acc} = \arctan(f_1) * (2 / \pi) \quad (3-9)$$

结合电网的运行约束和受端电网对柔直的承载能力约束建立完整的受端电网柔直接入优化模型：

$$\begin{aligned}
 \max \quad & f_{acc} = \arctan(f_1) * (2 / \pi) \\
 & h(x) \leq 0 \\
 & g(x, y) = 0 \\
 & P_{\max, st} \geq P_{PLAN} \\
 & P_{\max, dy} \geq P_{PLAN} \\
 & Q_d \leq Q_{\max}
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

式中 $P_{\max, dy}$ ——柔直承载能力（动态稳定性计算）；

$P_{\max, st}$ ——柔直承载能力（静态稳定性计算）；

P_{PLAN} ——电网规划柔直输入量；

若不能满足受端电网对柔直的承载能力约束，采用罚函数的形式进行处理，当含有惩罚项时，优化模型将涉及多个优化目标。因此，需要通过去量纲的方式进行多目标转化为单目标，本文选用 $\arctan$ 函数法进行处理。完整的受端电网柔直接入优化模型表示如下：

$$\begin{aligned}
 \max \quad & f_{acc} = (\arctan(f_1) + \arctan(f_p)) * (2 / \pi) \\
 & h(x) \leq 0 \\
 & g(x, y) = 0 \\
 & P_{\max, st} \geq P_{PLAN} \\
 & P_{\max, dy} \geq P_{PLAN} \\
 & Q_d \leq Q_{\max}
 \end{aligned} \tag{3-11}$$

上式中 m 为惩罚系数，一般选取较大的正整数。

3.2.3.2 动态无功补偿优化模型

一般的多目标优化问题包含的目标函数具有不同的含义，其目标函数切入角度不同且量化单位也不统一，因此不适合利用简单的加权方法进行处理。动态无功补偿优化研究的两个优化目标函数，一个是动态无功补偿装置对受端电网电压稳定性的提升效果，与实际的动态无功补偿设备补偿容量有关，另一个是动态无功补偿设备的建设成本，随着补偿设备的容量增加而增加。考虑到安装动态无功补偿的主要目的是改善受端电网电压稳定性，因此本文提出在提升系统电压稳定能力的基础上加入经济成本因素的改进灵敏度指标函数，将优化配置的多目标问题转化为单目标优化问题。相比柔性直流接入方案的优化，在动态无功补偿优化的过程中涉及经济性问题，具体的优化指标如下：

（1）暂态电压的轨迹灵敏度指标 TSI

$$TSI_j = \sum_{l=1}^{N_F} W_l \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{N_k} U_{i,l}(t_k, Q_0 + \Delta Q_{j(\text{FACTS})}) - U_{i,l}(t_k, Q_0) \right) \quad (3-12)$$

式中 ΔQ_{FACTS} ——动态无功补偿对系统的无功注入量；

$$f_1 = TSI_j \quad (3-13)$$

(2) 经济性指标

根据文献[55]和文献[56]的内容，建立 STATCOM 的经济花销函数关系：

$$f_2 = \sum_{i=1}^a C_{F,i} \cdot S_{F,i} \quad (3-14)$$

$$C_F = 0.00378s_F^2 - 3.84426s_F + 1604.988 \quad (3-15)$$

式中 C_F ——无功补偿装置单位容量价格， C_F 的计算表达式见式 (3-15)；

s_F ——无功补偿装置总容量。

在动态无功补偿优化配置的过程中，目标函数可以表示为 $\max(f_1, f_2^{-1})$ ，具体形式如式 (3-16)，至此建立起完整的考虑受端电网柔直承载能力的动态无功补偿装置优化模型，如式 (3-17)所示，在动态无功补偿优化的过程中，要求受端电网对柔直的承载能力满足规划需求作为硬性约束条件，加入到优化模型当中。

$$f_{\text{FACTS}} = [\arctan(f_1) + \arctan(1/f_2)] * (2/\pi) \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \max \quad & f_{\text{FACTS}} = (\arctan(f_1) + \arctan(f_2)) * (2/\pi) \\ & h(x) \leq 0 \\ & g(x, y) = 0 \\ & P_{\max, st} \geq P_{PLAN} \\ & P_{\max, dy} \geq P_{PLAN} \\ & Q_d \leq Q_{\max} \end{aligned} \quad (3-17)$$

3.2.4 柔性直流的系统无功配置以及接入优化实现方法

目前对于轨迹灵敏度指标的应用，最大的困难就在于如何实现迭代。本文利用机电暂态仿真软件代替潮流的求解过程，对仿真数据进行读取和处理并求解优化目标，根据优化目标修改仿真参数实现迭代，直至寻找到最佳的配置方案。

如图 3-5 本文以 PSD-BPA 为工具进行配置方案的仿真计算，并将数据传递给 MATLAB 进行优化指标计算，若配置方案不满足需求，则对预配置方案进行修改，重复此过程直至获得最优结果。

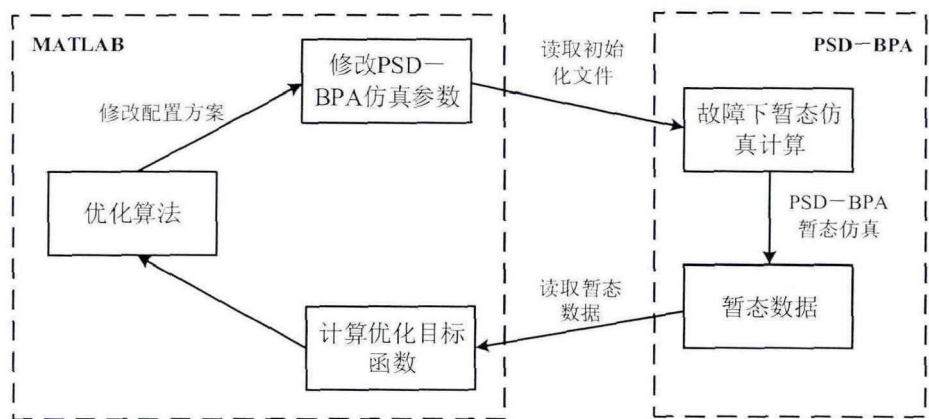


图 3-5 优化配置实现思路图

3.3 本章小结

- (1)本章从静态和暂态两个方面对受端电网的柔直承载能力进行定义。
- (2)本章建立了两步法实现柔直接入点优化以及动态无功补偿配置优化策略的模型以及实现方法。在柔直接入点优化问题中，考虑柔直对电网电压稳定性的贡献以及受端电网对于柔性直流的承载能力，在预选方案中寻找最优接入方案。在接入点优化问题解决后，充分考虑动态无功补偿对受端电网电压稳定性的提升作用、无功补偿装置的经济性问题以及受端电网对柔性直流的承载能力问题，在合理的配置容量范围内进行寻优，找到合适的动态无功补偿配置方案。
- (3) 在优化的实现方面，提出 MATLAB 与 PSD-BPA 相配合的模式进行对优化策略的实现。

第4章 基于省级电网的无功补偿方案实证算例

4.1 引言

从中长期电网发展来看，沿海受端地区大规模开发海上风电，就地就近满足负荷需求已经成为共识。江苏电网海上风电输电规划研究提出，离岸 70 公里以上的海上风电场，均建议采用柔性直流送出，故未来江苏海上风电送出柔直将进一步增加，电网承载规模将进一步加大。本文选择目前正在规划建设中的江苏如东直流接入作为应用算例，将其柔直规划需求设定为 4000MW。

4.2 江苏海上风电场接入受端电网的无功补偿方案实证算例

4.2.1 严重故障集筛选

根据《电力系统安全稳定导则》的内容，系统在进行安全稳定研究时，故障类型的选择过程中应特别注意如下问题：

(1)对于常规交流电网的故障类型选择：a)对于双回或多回线路、环网线路，应以线路的三相故障作为稳定校核的主要故障类型；b)同杆并架双回线具备分相重合能力时，应考虑异名相或同名相瞬时故障和永久故障，以及垂合闸的作用，必要时可考虑三永 N-2 故障。

(2)对于直流故障和扰动类型的选择：直流输电系统应考虑单换流器闭锁、单极闭锁、双极闭锁、功率突降、再启动以及换相失败等故障或扰动。

4.2.2 江苏风电接入受端电网接入点优化

按照第 3 章的研究内容，本章首先分析电网的备选接入点。如图 4-1 所示，为方便柔性直流的接入，选择沿海附近的几个 500kV 的电压母线作为备选接入点，备选接入点有通海、东台和丰汇三个节点。

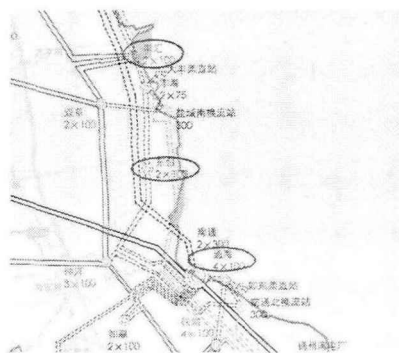


图 4-1 江苏电网地理接线图以及柔性直流备选接入点

根据《电力系统安全稳定导则》对电网可行故障集以及运行要求的梳理，目前江苏电网柔直接入方案的优化研究将基于以下三类故障进行，总共梳理出 68 种可行故障：

- （1）500kV 及以上线路三相故障：苏大丰-苏东台线路三相故障等；
- （2）500kV 及以上线路 N-2：泰州-苏州 N-2 故障等；
- （3）现有直流双极闭锁故障：锦苏直流闭锁故障等；

选择出柔性直流的备选接入点以及梳理完江苏电网的可行故障集后，江苏如东直流接入方案优化的具体实施步骤按图 4-2 进行。



图 4-2 柔直接入优化步骤

由于整个故障集下总共含有 68 个故障，计算较为繁重，因此首先按照 TVDI 值对可行故障集进行筛选，选择对电网电压稳定性影响最大的几种故障作为严重故障集。如表 4-1 所示，选择国淮南-国南京三相短路、雁淮直流闭锁、苏斗山-苏江阴三相短路、锦苏直流闭锁故障作为严重故障集。

表 4-1 严重故障集

严重故障名称	国淮南-国南京	雁淮直流闭锁	苏斗山-苏江阴	锦苏直流闭锁
故障权重	0.3099	0.4088	0.6139	1.000
电压跌落指标 TVDI	6.158	7.743	11.031	17.221

筛选出故障集后，按照规划需求在三个接入点（丰汇、东台、通海）依次接入 1000MW 的柔性直流，并在严重故障集下进行暂态仿真，记录重要母线电

压暂态数据，柔直接入优化目标值按照式(3-9)求解，计算结果如表 4-2 所示。

表 4-2 不同柔直接入点优化目标值

柔直接入点	大丰	东台	通海
优化指标	0.990389	0.990407	0.990414

通过上述优化目标计算可以明显发现，接入点选为通海时柔性直流对电网的电压稳定性的提升效果最佳，因此选择通海作为柔性直流的接入点。

经 BPA 计算，在通海处接入柔性直流，受端等效短路比为 2.4 左右，利用受端电网等效处理的方法求解得到柔直功率传输极限约为 5000MW，满足规划需求。

4.2.3 受端电网动态无功补偿优化的遍历求解方法

在对柔性直流接入点优化后,进行柔性直流受端电网的动态无功补偿优化。在优化过程中充分考虑动态无功补偿装置的优势，采用接入点、接入容量分步进行的遍历法以及世界杯优化算法两种方法进行无功补偿装置接入点和接入容量的优化，综合比较最优解集并确认最终优化方案，具体步骤如图 2-2 所示。



图 4-3 动态无功补偿优化步骤

利用 PSD-BPA 在筛选出的故障集下对江苏电网进行仿真，记录 165 个 500kV 以上母线的暂态电压。根据式 (3-2)计算各节点的 TVDI 值，按照 TVDI 越大电压稳定性越差的原则，在其中选择电压跌落最严重的三条母线作为补偿节点。

由表 4-3 所示, 通过比较 TVDI 值选择苏石牌 C2、苏石牌 C1 和苏熟南 51 三个节点作为补偿的预选节点。

表 4-3 补偿节点

补偿节点	苏石牌 C2	苏石牌 C1	苏熟南 51
电压跌落指标 TVDI	2.4958	2.5231	2.5908

根据实际经验, STATCOM 常以 50Mvar 为一个补偿单位, 因此在优化过程中, 首先选择以 50Mvar 为间隔, 在 0-200Mvar 之间以上述三个补偿节点作为补偿地点进行遍历择优。遍历方法的最大优点是能够对三个节点同时进行补偿, 可考虑同时对三个节点补偿的配置情况, 并且能够避免局部最优的问题, 优化结果如表 4-4 所示。

表 4-4 补偿方案以及优化指标

	方案一	方案二	方案三
苏石牌 C2	0	50	100
苏石牌 C1	0	0	100
苏熟南 51	50	0	100
优化指标	3.4975	3.4853	3.4849

4.2.4 基于世界杯优化算法的动态无功补偿优化

上节通过遍历的方法在固定的补偿范围内进行寻优, 但由于步长过大, 很难容易忽略更小步长范围内的最优解, 因此本节利用小步长下的世界杯优化算法对模型进行求解, 弥补遍历方法的缺陷。世界杯优化算法是一种基于国际足联世界杯比赛的数学函数优化方法, 具有收敛快、寻优能力强以及适用范围广的特点^[57]。

4.2.4.1 算法原理

本算法借鉴世界杯比赛的规则, 如式 (4-1)所示首先建立 M 个大洲, 每个大洲包含 N 个不同的国家, 在 (4-2)中每个国家都是一个队伍, 队伍含有不同的变量 x_i 。

$$continent = [country_1, country_2, \cdots, country_N] \tag{4-1}$$

$$country_i = [x_1, x_2, \cdots, x_{Nvar}] \tag{4-2}$$

其中 x_i 表示不同国家的第 i 只队伍, 即为实际问题中的变量数。如(4-3)所示每个大洲的比赛排名均通过目标函数值决定。

$$Rank = f_r(contient) = f_r(x_1, x_2, \cdots, x_{Ovar}) \tag{4-3}$$

$$O = M \times N \tag{4-4}$$

在本算法中，初始的团队均随机产生，初始迭代时不需要对初值有苛刻的要求。在团队初始化后需要根据目标函数进行冠军的争夺，为防止某大洲中在某个球队成绩非常优秀但是整体成绩一般使大洲排名具有争议，如式 (4-5) 采用标准差和平均值的形式描述各大洲的得分情况，之后如式 (4-6)、式 (4-7) 所示根据得分情况对所有大洲进行排序。

$$\text{Rank} = \frac{\beta\sigma + \bar{X}}{2} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= [X_{11}, \dots, X_{1n}]^T \\ X_2 &= [X_{21}, \dots, X_{2n}]^T \\ &\dots \\ X_5 &= [X_{51}, \dots, X_{5n}]^T \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$X_{\text{Total}} = [X_{11}, \dots, X_{1n}, X_{21}, \dots, X_{2n}, \dots, X_{51}, \dots, X_{5n}]^T \quad (4-7)$$

至此，整个比赛的洲冠军以及杯赛冠军 X_{champion} 均可以求出。

$$X_{\text{champion}} = \max(X_{\text{Total}}) \quad (4-8)$$

比赛结束之后就需要对下一次杯赛的参赛队伍进行更新，更新的队伍分为两个部分即上届杯赛的冠军 X_{Best} 和本届的新选手 X_{Rand} 。

$$\text{Pop} = X_{\text{total}} = [X_{\text{Best}}, X_{\text{Rand}}] \quad (4-9)$$

为了更好的寻找到最优的队伍，新挑选的队伍在式(4-10)范围内选取，新旧球队的数量由 CP 决定。

$$\begin{aligned} L &< X_{\text{Best}} < U \\ U &= \frac{1}{2} \times \text{ac} \times (\text{Ub} + \text{Lb}) \end{aligned} \quad (4-10)$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \times \text{ac} \times (\text{Ub} - \text{Lb}) \\ X_{\text{Rand}} &= \text{Pop}(1:\text{CP}, M) \\ X_{\text{Best}} &= \text{Pop}(\text{CP}+1:N, M) \end{aligned} \quad (4-11)$$

将新旧队伍全部选出后，按照式(4-12)重新分配组别，进行下一轮的比赛，直至选出最佳结果。

$$\begin{aligned} X_{1\text{new}} &= [\text{Pop}(1:k)] \\ X_{2\text{new}} &= [\text{Pop}(k+1:l)] \\ \text{Pop} = [X_{\text{Best}}, X_{\text{Rand}}] &\rightarrow X_{3\text{new}} = [\text{Pop}(l+1:r)] \\ X_{4\text{new}} &= [\text{Pop}(r+1:s)] \\ X_{5\text{new}} &= [\text{Pop}(s+1:t)] \end{aligned} \quad (4-12)$$

本文借鉴世界杯优化算法，设立两个独立变量，即动态无功补偿装置的接入容量 x_1 以及动态无功补偿装置的接入点 x_2 ，其中 x_1 的取值范围设定为 [10,200]， x_2 的取值范围设定为 TVDI 值最大的 10 个母线节点，即[1,10]，经过

世界杯优化算法的计算，最终得到在优化结果值为(50.1, 2.9)，其中 3 号节点对应的苏常熟 51，与遍历法当中的方案一配置方法一致。

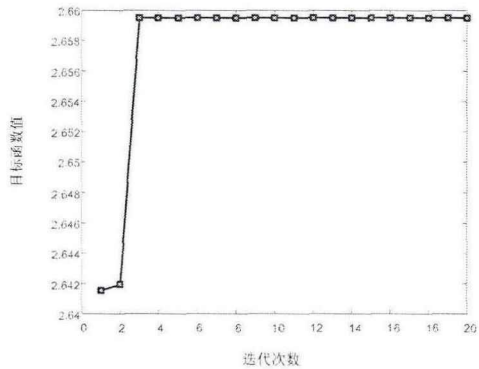


图 4-4 世界杯优化过程

4.3 动态无功补偿方案对比以及柔直功率恢复特性仿真验证

4.3.1 动态无功补偿优化方案对比

根据 4.2 节两种方法的优化结果，由于在世界杯优化算法下的求解结果与表 4-4 中的方案一几乎一致，因此本文的最优解集为表 4-4 所示的三种补偿方案。在严重故障集下，对比不同方案对于电压稳定性的提升效果，如图 4-5 和图 4-6 所示。

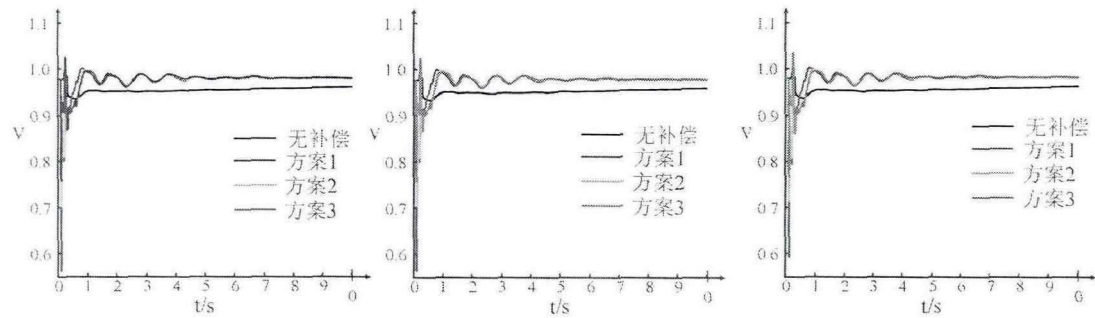


图 4-5 锦苏直流故障下各补偿方案效果

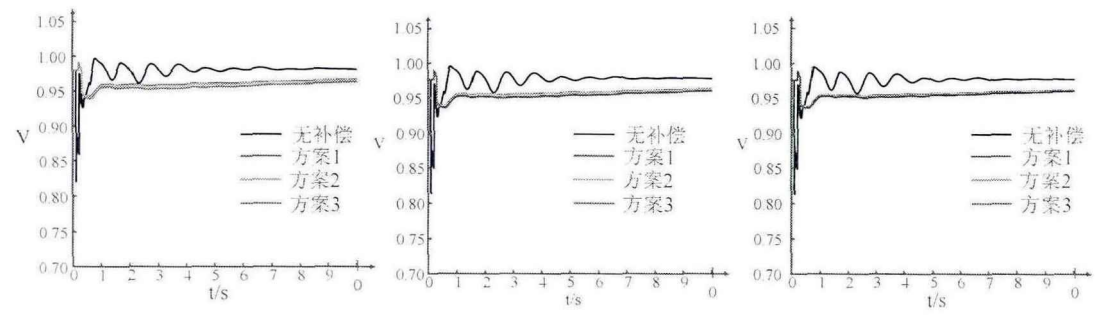


图 4-6 国淮南-国南京故障下各补偿方案效果

通过上述仿真对比,可以发现几个方案的实际效果差距不大,在锦苏直流闭锁故障下能够将节点电压提升至 0.95 以上,在国淮南-国南京故障下有效减少节点电压的跌落,进而对电网的电压稳定性产生较大的提升。因此选择经济性以及整体优化指标最好的方案一作为备选方案,在严重故障集下,验证直流的功率恢复情况,分别将直流的输送功率提到稳态功率传输极限,观察直流的恢复情况。

4.3.2 柔性直流功率恢复特性仿真验证

将柔性直流向通海节点的输送功率额定值设定为 2500MW,共构建两条直流线路。分别在苏斗山-苏江阴三相短路故障、国淮南-国南京三相短路故障、锦苏直流闭锁故障以及雁淮直流闭锁故障下进行仿真,观察柔性直流得功率恢复情况。

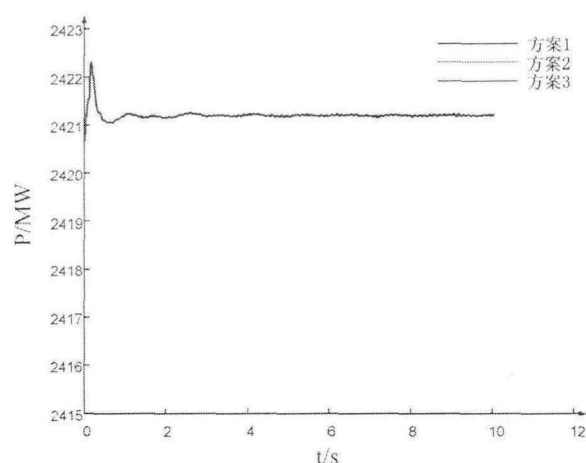


图 4-7 苏斗山-苏江阴故障下直流恢复情况

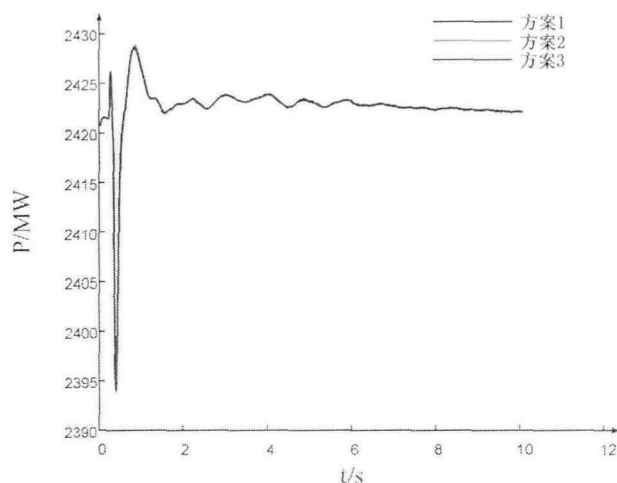


图 4-8 国淮南-国南京故障下直流恢复情况

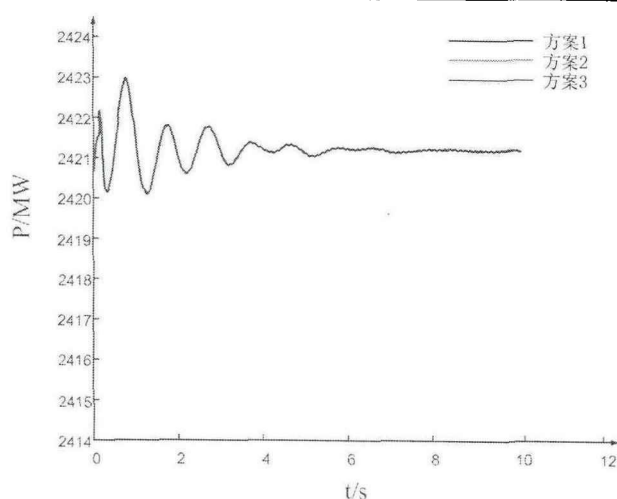


图 4-9 锦苏直流闭锁故障下直流恢复情况

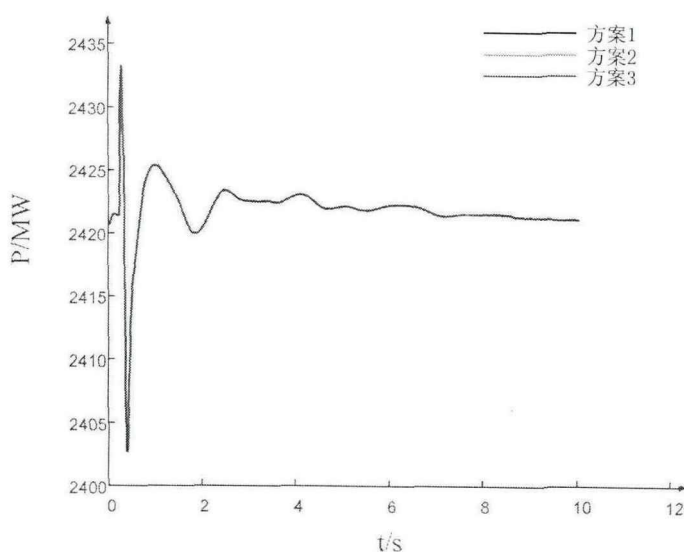


图 4-10 雁淮直流闭锁故障下直流恢复情况

通过仿真验证可以发现在严重故障集的四中故障下，单条柔性直流均能有效地恢复至 2500MW，充分证明暂态下受端电网对柔性直流的承载能力能够满足规划需求。

综上所述，建议在苏常熟节点接入 50Mvar 的 STATCOM 补偿设备，能够最好的提升受端电网的稳定性，并且能够使受端电网在苏通海节点承受 5000MW 的柔直接入，满足 4000MW 的规划需求。

4.4 本章小结

(1)本章以规划建设中的江苏电网如东柔直接入为算例，按照本文提出的动态无功补偿优化方法进行优化处理，验证优化模型的有效性。

(2)模型求解过程中，结合世界杯优化算法以及固定区域内的遍历法寻求最优补偿方案，一方面避免优化算法局部最优的问题，另一方面弥补遍历法步长过大的问题。

(3)对筛选出的方案进行仿真对比，在严重故障集下，对比各补偿方案对母线电压稳定性的提升效果，同时保证在配置方案下柔性直流的输送功率能够有效恢复。

(4)归纳总结出适用于江苏如东柔直接入的最优方案，对江苏如东柔性直流工程给出规划建议。

第5章 总结与展望

5.1 总结

柔性直流输电是目前海上远距离风电送出的主要手段，接入受端电网的柔性直流最大传输能力不仅仅受限于柔性直流系统本身的功率传输极限，同时也受限于受端交流系统，本文提出能够准确评估受端电网对柔性直流承载能力的方法，为柔性直流输电的规划建设提供理论支持。同时利用受端电网等效处理的方法准确求解 MMC-HVDC 功率传输极限，证明受端电网的动态无功补偿设备能够有效增强受端电网的强度进而可以提升柔直的稳态功率传输极限，并结合无功补偿对电网电压稳定性的提升效果和经济成本建立考虑柔性直流承载能力的动态无功补偿优化模型，配合世界杯优化方法和固定区域内的遍历方法，提出柔性直流接入以及无功补偿装置配置的建议。完成的核心工作如下：

(1)以 MMC-HVDC 稳态相量模型为基础，提出一种对包含常规直流 LCC-HVDC、交流电源以及 STATCOM 在内的受端电网进行等效处理的方法，构建等效的两端电网，在 MMC-HVDC 不同控制方式、STATCOM 不同接入点下求解 MMC-HVDC 的最大传输极限，证明等效处理方法求解 MMC-HVDC 功率传输极限的可行性。对比没有 STATCOM 接入下的传输极限，后通过仿真证明暂态下 STATCOM 对柔直功率恢复特性的影响，用分析计算加仿真的手段充分证明 STATCOM 对受端电网柔直承载能力具有明显提升效果。

(2)提出考虑电网电压稳定性指标、无功补偿装置经济性指标以及受端电网柔性直流承载能力的进行柔直接入点以及动态无功补偿装置配置的优化模型，并通过 PSD-PBA 与 MATLAB 相互调用的手段，借助世界杯优化算法和局部遍历的方法求解最优解集。

(3)在严重故障集下，利用仿真对比最优解集中各种方案的优劣，验证柔性直流在严重故障集下的功率恢复能力，保证受端电网的柔直承载能力满足规划需求，最终选择出考虑柔直承载能力的动态无功补偿配置的最优方案。

目前国内受端电网柔性直流接入量不断提升，本文提出的受端电网柔直承载能力的具体定义将对于柔性直流接入规划产生重要影响。通过具体的分析计算证明动态无功补偿装置 STATCOM 对于柔性直流的传输极限的影响效果，在动态无功补偿配置优化方面，充分考虑受端电网对柔性直流的承载能力，为动态无功补偿的研究领域提供了新的研究角度。

5.2 展望

在本文提出的模型中，仅仅将 STATCOM 对受端电网柔性直流承载能力的提升效果作为一种约束进行处理，没有对其进行一种定量的计算。在进一步的研究当中，可以在优化目标中对暂态下 STATCOM 对柔性直流恢复效果进行定量处理，从而达到更好的优化效果。其次，在模型当中也未曾考虑实际系统控制器参数的设定对优化结果的影响，因此可以在模型中充分考虑受端以及柔性直流的控制器参数，进一步提高模型的优化效果。

参考文献

- [1] 周仕豪. 多馈入直流系统动态无功补偿优化研究[D]. 武汉大学, 2018
- [2] 郭春义, 林欣, 王燕宁等. 联接弱交流电网 MMC-HVDC 系统的直流功率传输能力提升方法[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-11[2022-03-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220106.1515.002.html>
- [3] 刘卫东, 李奇南, 王轩等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(07): 55-71
- [4] 陈意. 受端电网动态无功补偿优化配置研究[D]. 华北电力大学(北京), 2017
- [5] 李欣蔚. 交直流电网动态无功补偿优化配置研究[D]. 华北电力大学(北京), 2019
- [6] GB 38755-2019, 电力系统安全稳定导则[S]
- [7] 杨堤, 程浩忠, 马则良等. 考虑静态和暂态电压稳定的交直流混联系统综合无功规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3078-3086+3363
- [8] 王洁聪, 郭琦, 刘崇茹等, 罗超. MMC 的稳态相量模型及功率运行区间计算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(06): 91-103
- [9] 喻建瑜. MMC-HVDC 的故障穿越控制策略研究[D]. 华北电力大学(北京), 2020
- [10] 王烨, 郭春义, 成勇. 基于小干扰稳定性和运行约束条件的 MMC 系统临界运行短路比评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2853-2864
- [11] Zhou J Z, Gole A M. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C]// 1st International Conference on Ac & Dc Power Transmission. IET, 2013
- [12] 刘昇, 徐政, 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(01): 133-144
- [13] 屠卿瑞, 陈志光, 曾耿晖等. 模块化多电平换流器稳态功率运行范围的确定方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 131-137
- [14] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋等. 连接弱交流电网的 VSC-HVDC 失稳机理及判据研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3884-3896
- [15] 王洁聪. 含 MMC 的交直流系统建模与稳定性分析[D]. 华北电力大学(北京), 2021
- [16] 夏成军, 王真, 周保荣等. VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 受端系统电压支撑强度的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(06): 2031-2038

- [17]姚文峰, 洪潮, 周保荣等. 采用常规直流配置动态无功补偿或柔性直流对受端广东电网稳定性影响的对比分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(07): 45-50
- [18]唐晓骏, 张正卫, 韩民晓等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 57-64
- [19]易杨, 龙霏, 林建熙等. 多馈入直流系统的 VSC-HVDC 落点优选方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 39-45
- [20]唐晓骏, 韩民晓, 谢岩等. 应用于城市电网分区互联的柔性直流容量和选点配置方法[J]. 电网技术, 2019, 43(05): 1709-1716
- [21]简文, 周自强, 唐飞等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(01): 169-177
- [22]张红丽, 刘福锁, 李威. 动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(05): 133-138
- [23]Paramasivam M, Salloum A, Ajjarapu V, et al. Dynamic Optimization Based Reactive Power Planning to Mitigate Slow Voltage Recovery and Short Term Voltage Instability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3865-3873
- [24]Wildenhues S, Rueda J L, Erlich I. Optimal Allocation and Sizing of Dynamic Var Sources Using Heuristic Optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 1-9
- [25]吴亮. 大电网动态无功补偿优化配置模型与算法研究[D]. 华南理工大学, 2019
- [26]向子墨. 大规模新能源接入的直流弱送端电网无功优化配置研究[D]. 华北电力大学(北京), 2020
- [27]曹全淼. 分布式电源与无功补偿装置的协同优化配置研究[D]. 郑州大学, 2020
- [28]邓先芳. 基于主动管理策略的分布式电源和无功补偿综合优化配置[D]. 重庆大学, 2019
- [29]胡臻, 崔挺, 吕虎等. 考虑电网动态特性的无功补偿配置方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 45-51
- [30]程志. 考虑电压稳定的广州电网无功补偿优化配置研究[D]. 华南理工大学, 2018
- [31]Soman S A, Parthasarathy K, Thukaram D. Curtailed number and reduced controller movement optimization algorithms for real time voltage/reactive power control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 9(4): 2035-2041
- [32]Shu J, Zhang L, Yi L, et al. An improved genetic algorithm for dynamic reactive power optimization in electricity market[C]// International Conference on Power System Technology. IEEE, 2004

- [33]Dekka A, Wu B, Fuentes R L, et al. Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, PP(4): 1-1.
- [34]马骞, 田宝焯, 邱建等. STATCOM 提升单 LCC-HVDC 馈入系统静态电压稳定裕度的机理分析[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 49-56
- [35]Wang J, Liu C, Annakkage U D, et al. Steady : tate power operation region of a modular multilevel converter connecting to an AC grid[J]. High Voltage
- [36]张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 清华大学出版社, 2012.
- [37]张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 清华大学出版社, 2007
- [38]杨健, 洪潮, 周保荣等. 受端弱系统条件下 STATCOM 提升直流输电能力机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5005-5014+5282
- [39]Shakib A D, Balzer G. Optimal location and control of shunt FACTS for transmission of renewable energy in large power systems[C]//Melecon IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2010
- [40]Najafi S R, Abedi M, Hosseinian S H . A Novel Approach to Optimal Allocation of SVC using Genetic Algorithms and Continuation Power Flow[C]// Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International. IEEE, 2006
- [41]马小姝, 李宇龙, 严浪. 传统多目标优化方法和多目标遗传算法的比较综述 [J]. 电气传动自动化, 2010, 32(03): 48-50+53
- [42]张骁. 基于粒子群算法的变电站工程项目多目标优化研究[D]. 华北电力大学, 2018
- [43]朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117+124
- [44]Sapkota B, Vittal V. Dynamic VAr Planning in a Large Power System Using Trajectory Sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 461-469
- [45]韩显芳. 交直流受端电网电压稳定性研究[D]. 山东大学, 2013
- [46]Kessel, P, Glavitsch, et al. Estimating the Voltage Stability of a Power System[J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 1986
- [47]Gao B, Morison G K. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542
- [48]赵兴勇, 张秀彬, 苏小林. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论[J]. 电工技术学报, 2008(02): 87-95
- [49]周仕豪, 唐飞, 刘涤尘等. 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置

- 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(07): 68-75
- [50]张竣淇, 冯婷婷, 陈永刚. 一种基于类电磁粒子群混合算法的无功补偿优化方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(05): 61-65+73
- [51]Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]// Icn95-international Conference on Neural Networks. IEEE, 1995
- [52]郑宽, 沈沉, 刘锋. 降低多回 HVDC 同时换相失败风险的交直流混联受端系统 STATCOM 配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(02): 564-570
- [53]李佩杰, 陆镛, 白晓清等. 基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2428-2435
- [54]Han T, Chen Y, Ma J, et al. Surrogate Modeling Based Multi-objective Dynamic VAR Planning Considering Short-term Voltage Stability and Transient Stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017: 622-633
- [55]陈大力. STATCOM 与 SVC 在某钢铁企业的应用选择[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(04): 15-18+64
- [56]Cai L J, Erlich I, Stamtsis G C. Optimal choice and allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms[C]// Power Systems Conference & Exposition. IEEE, 2004
- [57]Razmjoooy N, Khalilpour M, Ramezani M. A New Meta-Heuristic Optimization Algorithm Inspired by FIFA World Cup Competitions: Theory and Its Application in PID Designing for AVR System[J]. Journal of Control Automation & Electrical Systems, 2016, 27(4): 419-440

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）申请及已获得的专利

- [1] 蔡晖,刘崇茹,王洁聪,牛纪伟,李竹青,黎晓,罗金山,孙珂,辛蜀骏,许偲轩,赵菲菲,韩杏宁,祁万春,韩晓男,梁涵卿,曹阳. 一种 MMC-HVDC 的输送能力确定方法及系统[P]. 江苏省: CN113452062A,2021-09-28.
- [2] 蔡晖,刘崇茹,牛纪伟,李竹青,姜苑,黎晓,罗金山,孙珂,辛蜀骏,许偲轩,赵菲菲,韩杏宁,祁万春,韩晓男,梁涵卿,曹阳. 一种交直流电网分布式动态无功补偿优化方法及系统[P]. 江苏省: CN113067347A,2021-07-02.
- [3] 蔡晖,刘崇茹,李竹青,牛纪伟,黎晓,辛蜀骏,许偲轩,赵菲菲,韩杏宁,祁万春,罗金山,孙珂,韩晓男,梁涵卿,曹阳. 一种柔性直流补偿控制方法及系统[P]. 江苏省: CN113193586A,2021-07-30.

致 谢

首先,感谢我的父母在我人生的前 25 年里给予我物质的保障和精神上的教诲,让我能够顺利完成学业,渡过一个个难关。

其次,感谢从我初入校门到现在所有对我有过授道传业解惑之恩的老师,尤其是我的研究生导师刘崇茹教授以及我小学班主任老师刘元春老师,感谢他们在我的启蒙阶段以及踏入社会之前,在我为人处世、专业知识等方面的各种帮助。

除此之外,感谢在我读研期间给予我帮助的所有师兄师姐师弟师妹,包括在我初入师门教我基础技能的昊宇师兄、王超师兄,在我科研方向对我进行指导的黎晓师兄、洁聪师姐,以及聚在一起常打球运动的苏师兄、王宇师兄、李至峪师兄、谢爵昊师兄、左优师弟、巨峰师弟等等所有的同门。

最后,是我最值得庆幸的也是我读研期间的最大收获,感谢小姜能选择相信我,选择和我一起面对接下来的生活,感谢小姜在校期间对我的鼓励以及帮助,更感谢小姜在离开学校后多年的陪伴,祝愿在未来的日子里,她能够一直健健康康。

祝愿所有的人都能在接下来的日子里,一切顺利。