

华北电力大学

专业硕士学位论文

交直流混联电网动态无功补偿优化方法研究

Research on Optimization Method for Dynamic
Reactive Power Compensation in Hybrid AC/DC
Grids

郝屹东

2025 年 7 月

国内图书分类号：TM721
国际图书分类号：621.3

学校代码：10054
密 级：公开

专业硕士学位论文

交直流混联电网动态无功补偿优化方法研究

硕 士 研 究 生：郝屹东

导 师：刘崇茹

企 业 导 师：杨冬梅高级工程师

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：2025 年 7 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM721

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

**Research on Optimization Method for Dynamic
Reactive Power Compensation in Hybrid AC/DC
Grids**

Candidate:	Hao Yidong
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Enterprise mentor:	Yang Dongmei
Academic 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:	July, 2025
Degree-Confering-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

当前,清洁能源的开发与应用已成为全球关注的焦点。为实现其在远距离、大容量和跨区域输送方面的需求,我国正积极建设多直流馈入、运行方式灵活的交直流混联电网。凭借快速响应能力与良好的调节特性,动态无功补偿技术在保障交直流混联电网的电压稳定性方面发挥着重要作用。然而,受限于其较高的投资与运维成本,该类设备难以实现大范围部署。因此,合理规划动态无功补偿装置的选址和配置容量,是降低整体运行成本和改善电压稳定性的关键。本文围绕交直流混联电网中动态无功补偿装置的规划问题,从选址和定容两个方面开展系统性研究。

为合理选取设备型号,理论分析了静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)和静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)。对比了两种设备的关键性能,得出静止同步补偿器虽在无功响应能力、响应速度等方面具备优势,但其在经济性上弱于其他两种设备的结论。

为选取无功补偿装置安装的最优位置,首先构建了薄弱区域划分模型,运用了分层分区理念,在交直流混联电网中定位了静态电压稳定性相对薄弱的节点。接着,以这些节点为研究主体,构建了先导节点划分模型。通过改进轨迹灵敏度方法,将对提升电网暂态电压稳定性作用最为显著的节点作为配置点。经仿真验证,该方法操作简便、切实可行,有效降低了无功补偿点选取过程中的冗余性。

为确定无功补偿装置的配置容量,建立了考虑暂态电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型。将电网经济成本最小化和改善电压稳定性作为寻优目标,通过将 MATLAB 的数据处理能力与 PSD-BPA 精确的计算模拟相结合,构建了 STATCOM 和 SVC 无功补偿前后的模型,接着结合鸚鵡寻优算法的对 SVC 和 STATCOM 的最优配置容量进行了求解。相较于传统遗传算法,PO 收敛速度更快,能够避免过度依赖初始参数导致结果单一,容易陷入局部最优解的问题。仿真实验选取了我国广东地区的交直流混联电网区域作为研究对象,将所提方法应用于该区域电网,通过实际电网数据模拟不同运行工况,对比规划前后电网电压稳定性指标、无功补偿设备投资成本等关键参数。结果表明,所提求解算法可寻优至最优解,算法超参数设置合理。采用本文所提的选址和定容方法,电网暂态电压失稳风险有效降低,设备全生命周期成本节约 22%,充分证明了该方法在实际工程中的有效性与经济性,可为交直流电网中动态无功

补偿设备的规划工作提供重要参考。

关键词：动态无功补偿；交直流混联电网；改进轨迹灵敏度；鸚鵡算法

Abstract

At present, the development and application of clean energy have become a global focus. To meet the demands of long-distance, high-capacity, and cross-regional transmission, China is actively constructing hybrid AC/DC power grids characterized by multiple DC feeds and flexible operating modes. With its fast response and excellent regulation performance, dynamic reactive power compensation technology plays a vital role in maintaining voltage stability in such systems. However, due to the high investment and operational costs, large-scale deployment of these devices remains challenging. Therefore, the rational planning of the installation locations and capacity configurations of dynamic reactive power compensation devices is essential for reducing overall operational costs and improving voltage stability. This thesis conducts a systematic study on the planning of dynamic reactive power compensation devices in hybrid AC/DC power grids, focusing on site selection and capacity allocation.

To reasonably select the appropriate device type, a theoretical analysis was conducted on the Static Var Compensator (SVC) and the Static Synchronous Compensator (STATCOM). A comparison of the key performance characteristics of the two devices indicates that although STATCOM offers advantages in reactive power response capability and response speed, it is less economical compared to the other two types of devices.

To determine the optimal capacities of the compensation devices, a multi-objective mathematical optimization model is established that considers both transient voltage improvement and economic cost. The optimization goals include minimizing power system costs and improving voltage stability. By combining MATLAB's data processing capabilities with the precise simulation functions of PSD-BPA, models before and after STATCOM and SVC compensation are built. The optimal configuration capacities of STATCOM and SVC are then determined using the Parrot Optimization Algorithm (POA). Compared to traditional genetic algorithms, POA has a faster convergence speed and avoids issues such as overreliance on initial parameters, solution singularity, and local optima. The simulation study uses the hybrid AC/DC grid in Guangdong, China, as a case study. The proposed method is applied to this region's grid and tested under different operating conditions using real grid data. Key parameters such as voltage stability indicators and investment costs of reactive power compensation devices are

compared before and after planning. The results show that the proposed algorithm effectively identifies the optimal solution with well-tuned hyperparameters. By applying the proposed site selection and capacity allocation methods, the risk of transient voltage instability is significantly reduced, and the total lifecycle cost of equipment is decreased by 22%, proving the method's effectiveness and economic feasibility in real-world engineering. This work provides important guidance for planning dynamic reactive power compensation devices in hybrid AC/DC grids.

Keywords: Dynamic Reactive Power Compensation; AC/DC Hybrid Power Grid; Improved Trajectory Sensitivity; Parrot Optimization Algorithm

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 动态无功补偿选址规划方法.....	2
1.2.2 动态无功补偿容量规划方法.....	2
1.3 主要研究内容及框架.....	3
第 2 章 考虑无功补偿的电网稳定运行有效性分析	5
2.1 引言.....	5
2.2 无功补偿基本原理.....	5
2.2.1 并联补偿器.....	5
2.2.2 静止无功补偿器.....	6
2.2.3 静止同步补偿器.....	8
2.3 静止无功补偿器与同步补偿器比较分析	10
2.4 无功补偿器经济性分析.....	12
2.5 本章小结.....	14
第 3 章 交直流混联电网动态无功补偿设备选址规划研究	16
3.1 引言.....	16
3.2 薄弱区域划分模型.....	16
3.2.1 基于戴维南动态等值的阻抗模裕度	16
3.2.2 阻抗模裕度计算方法.....	17
3.3 基于动态仿真的改进轨迹灵敏度	18
3.4 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址	20
3.4.1 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址策略	20
3.4.2 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址求解流程	21
3.5 算例分析.....	22
3.6 本章小结.....	24
第 4 章 交直流混联电网动态无功补偿设备容量规划研究	25
4.1 引言.....	25
4.2 考虑暂态电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型	25
4.2.1 目标函数.....	25
4.2.2 约束条件.....	26
4.3 基于鸚鵡寻优算法的多目标优化算法	28
4.3.1 鸚鵡寻优算法流程.....	29
4.3.2 基于鸚鵡寻优算法的动态无功规划方法	32

4.4 算例分析.....33

4.5 本章小结.....37

第 5 章 结论与展望39

参考文献.....40

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

随着电力技术的持续革新，我国直流输电技术近年来快速发展。在多种直流输电方式中，采用电网换相的高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)系统尤为常见，其核心设备为线路换流器(Line Commutated Converter, LCC)。早在 1954 年，全球首条 LCC 直流输电线路便在瑞典与哥特兰岛之间建成投运，标志着该技术正式进入实用阶段。LCC 型直流输电工程也已广泛应用于我国的多个地区^[1]。自 1989 年±100kV/100MW 舟山直流工程投运以来，我国在 LCC 型高压直流输电领域持续推进，截至目前已建成 40 余项工程，建立了“西电东送”中承担大容量远距离输电的主干系统，总输送能力达 1.8 亿千瓦^[2]，占全国直流输电比重的 60%以上，提升了清洁能源跨区域调配的时效性。自 2011 年上海南汇±30kV/20MW 示范工程投入运行以来，我国在电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)的高压直流输电领域也取得了快速发展，已建成超过 10 项相关工程^[3]。其中包括世界首个多端柔性直流系统—南澳三端项目^[4]，以及全球首个柔性直流电网工程—张北项目^[5]，这标志着我国直流输电技术逐步从传统点对点传输拓展至多端互联和直流组网阶段。此外，2020 年我国启动了全球首个特高压等级的多端混合直流输电工程—昆柳龙项目^[6]；2022 年，建成了世界首个采用混合级联技术的特高压直流线路—白鹤滩江苏工程^[7]，推动了混合直流技术在实际工程中的落地。

随着电网结构的日益复杂，各输电线路之间的耦合逐步增强。例如，在两个非同步电网之间引入交流输电线路，与原有直流输电通道形成 AC-DC 并联结构；高压直流输电的发展推动了多端直流送出系统的形成；越来越多的直流线路接入交流系统则，构建了多馈入直流网络^[8]。尽管直流输电的应用在一定程度上缓解了能源输送与负荷分布之间的矛盾，但多样化的电网连接方式也为系统的稳定运行带来了新的挑战^[9]。

在电网遭遇大规模扰动时，首要任务是确保系统的暂态稳定。大量研究表明，电力系统多数不可控的连锁故障源于节点电压骤降^[10]。针对暂态条件下的电压稳定问题，局部无功补偿被证实是一种有效手段，适当的无功注入能够有效维持电压水平。目前，虽然静态无功补偿技术已得到了广泛研究，但传统设备仍难以应对无功功率的快速动态变化，无法完全满足现代电网对动态调节的需求。而柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)技术^[11]的飞速发展为实现快速且动态的无功功率调节提供了有力的技术保障。FACTS 控

制器的最大特点在于, 无需改变电网结构, 就可通过电力电子器件以及传统控制手段, 灵活调节电压、线路阻抗和功角这三个决定功率潮流的关键因素, 从而有效提升电网的输电能力^[12]。目前应用较为广泛、具备良好无功补偿能力的 FACTS 控制器^[13]主要包括静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)以及统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)等。合理选择 FACTS 控制器, 可有效挖掘电网的潜在输电能力。而 FACTS 控制器的选址、容量配置优化对电网的经济性和电压稳定性具有重要影响, 不同的方案会导致电网性能和运行成本的显著差异^[14]。因此, 通过引入 FACTS 技术对交直流混联电网进行动态无功补偿优化, 不仅可以有效改善电力系统的电压稳定性, 还可增强系统在突发情况下的暂态稳定能力^[15,16]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 动态无功补偿选址规划方法

无功补偿装置的选址在提升电网电压稳定性、优化无功资源配置和增强系统暂态响应能力方面发挥着关键作用^[17-20], 国内外开展了大量相关研究推动该领域的发展。文献[21]基于向量场引入非线性参与因子, 将提升系统的静态电压稳定性作为目标, 研究 SVC 的最优接入节点。文献[22]则从灵敏度参数出发, 考虑关键母线的响应特性, 划定补偿装置的调控范围, 并通过雅可比矩阵的奇异值特性识别最优部署位置。文献[23]则综合考虑了系统最大负荷能力与设备投资成本, 利用粒子群优化算法对含可控串联补偿设备的多目标选址问题进行建模求解。文献[24]引入调和搜索算法, 面向统一潮流控制器的布设问题, 旨在调控无功以维持母线电压, 实现潮流分布的优化, 以缓解线路过载现象。文献[25]则采用遗传算法构建联合优化框架, 在电网拓扑重构条件下, 同时优化多类动态无功补偿设备的安装位置与配置数量。

然而, 现有的动态无功补偿装置选址研究多集中于单一变电站或较小规模的配电网, 面对节点密集、结构复杂的大型受端电网时, 往往因计算复杂度高而难以使用^[26-29]。此外, 交直流混合系统本身具有运行方式多变、直流馈入路径多样以及高度随机性等特点, 因此在进行无功补偿装置部署时, 必须充分考虑交直流系统之间的动态耦合效应。而现有普遍侧重于静态或暂态电压稳定性的单一视角, 缺乏面向交直流受端系统中同时考虑二者协同影响的选址优化策略^[30,31]。

1.2.2 动态无功补偿容量规划方法

动态无功补偿装置的安装容量选择与选址具有同等重要性, 不同容量配置

对电网电压稳定性的影响存在明显差异。文献[32,33]分别利用改进粒子群算法和量子粒子群优化算法，基于节点电压和有功损耗，确定了配电网中静止同步补偿器的最优容量。文献[34]通过构建电气介数模型，结合潮流约束，以最小投资、最大损耗降低及裕度提升为目标，寻优求得 N-1 故障条件下的补偿容量。文献[35]通过仿真验证了同步调相机在电压骤降时的动态无功装置的补偿能力，但未对其补偿效果进行量化分析。文献[36]则以最小化投资成本为目标，建立了容量规划模型。文献[37]运用改进的多种群量子粒子群算法规划了 STATCOM 容量，尽管该模型同时考虑了降低网损和提高电压稳定性两个目标，但未进行故障状态下的动态响应分析。

然而，现有的定容研究的大多以稳态潮流分析为背景，缺少对故障情况下动态无功补偿性能的定量分析。事实上，系统故障时动态无功装置的无功注入最大值远高于稳态出力^[38]，而现有模型大多未能体现这一特性，导致容量规划与实际需求脱节。多馈入短路比(Multi-Infeed Short Circuit Ratio, MISCR)是衡量受端电网强度的关键指标，可有效描述交直流系统交互作用及电压稳定性^[39-41]。文献[42-47]基于 MISCR 开展了混联系统电压稳定、光伏多馈入系统容量优化、直流外特性影响分析，验证了同步调相机和静止同步补偿器对系统强度的提升作用。然而，现有 MISCR 计算方法存在显著缺陷：文献[48]表明，传统短路电流计算程序仅考虑 STATCOM 的稳态潮流出力，未计入其动态响应过程，导致 MISCR 指标不随 STATCOM 额定容量变化而改变。在改进 IEEE39 节点多馈入直流系统中，增大 STATCOM 容量时，短路电流计算所得交流系统短路容量恒定，进而使 MISCR 指标失效^[49,50]。这种计算方法无法准确反映动态无功装置对系统稳定性的实际提升效果。为解决该问题，需考虑以下两方面：

(1) 改进多馈入短路比指标：建立计及动态无功补偿装置动态响应过程的新型指标^[51,52]，替代仅基于稳态潮流的传统计算方法；

(2) 构建融合动态特性的定容方法：以改进后的短路比指标为基础，提出融合动态特性的 STATCOM 容量规划方法^[53-55]，实现交直流混联电网中补偿容量的精准优化。

本文重点分析了现有定容方法在动态工况下的适用性及其补偿效果，为工程实践中平衡稳定性提升与成本控制提供理论支撑。

1.3 主要研究内容及框架

本文针对交直流混联电网中动态无功补偿的配置方法，主要从选址规划和定容规划以及配置选型三方面进行了讨论。总共分为五个章节，全文的思路和基本组织结构图如图 1-1 所示。

第 1 章：介绍了无功补偿技术在提升电网电压稳定性和运行安全性方面的

重要作用，并从选址规划、容量配置两方面介绍了该领域的国内外研究进展。

第 2 章：基于并联型 FACTS 装置的运行机制，分析了其在提升电压稳定性和增强暂态稳定性方面的作用，并对 STATCOM 与 SVC 的性能特点进行对比，明确其对关键运行参数的影响，为后续无功补偿设备的容量配置提供理论支撑。

第 3 章：综合考虑阻抗模裕度与节点负荷权重，并结合分层分区策略，对大型交直流混联电网中的薄弱区域进行了划分，缩小选址范围；随后通过动态仿真计算薄弱节点的改进轨迹灵敏度，筛选出最佳动态无功补偿安装点，并基于 IEEE39 系统进行算例验证。

第 4 章：针对各分区及其典型故障类型，采用改进的灵敏度指标对无功注入在提升系统暂态电压方面的实际效果进行量化评估。并基于此构建了考虑电压改善情况和经济成本的多目标优化模型，并采用鸚鵡寻优算法进行求解，最终通过计算与仿真验证了模型和算法的有效性。

第 5 章：对本文研究内容进行了总结，并对未来的研究方向进行了展望。

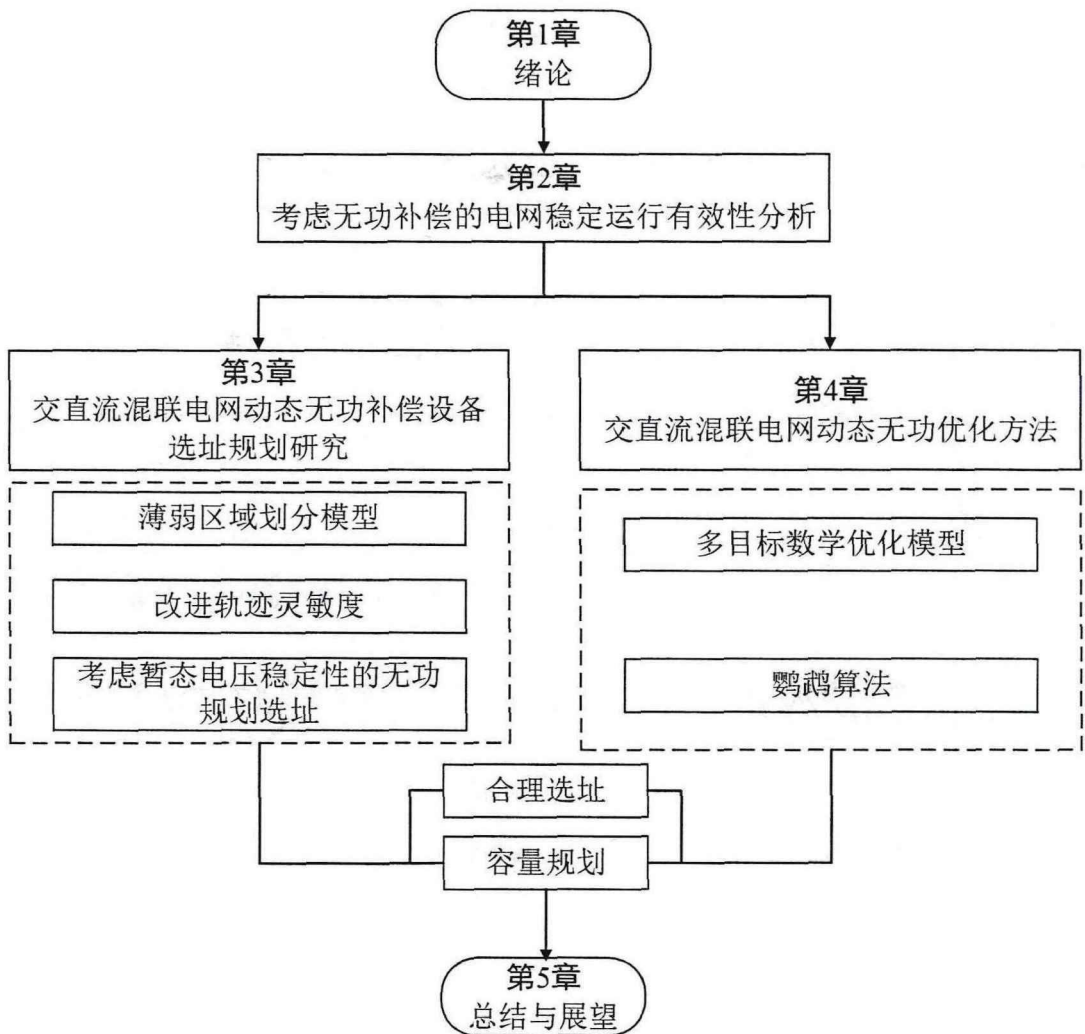


图 1-1 基本组织结构图

第2章 考虑无功补偿的电网稳定运行有效性分析

2.1 引言

当今电力系统已演变为大规模交直流混合结构的高度复杂互联系统。其网络结构庞大、负荷水平高，同时还面临电能质量、市场机制、环保要求等多重目标约束，给电网的安全性、稳定性与经济性运行带来巨大挑战。传统的机械式控制方式由于自身局限性，难以实现对电力传输过程的有效调控，影响系统的运行灵活性，也限制了传统能源设备的高效利用。在此背景下，提升输电系统的运行性能与调控水平，已成为当前电网发展亟需突破的重要方向。

随着 20 世纪 60 年代晶闸管技术的突破，科研人员迅速捕捉到电力电子发展的机遇，通过不断创新，成功研制出 SVC、STATCOM、可控串联电容器 (Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC) 和统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) 等一系列先进灵活 FACTS 控制器。这一系列基于可关断电力电子器件的先进装置显著提升了电力系统的性能与稳定性，为电力行业发展带来革命性变革。FACTS 中，并联型补偿控制器被视为提升电网电压稳定性的创新手段，因其在调节能力和动态响应方面表现出色，已受到广泛关注并快速推广。目前，SVC 仍是应用最广泛的并联型 FACTS 设备。随着 FACTS 技术在电力系统中的持续推进，已有近 20 种不同类型的控制器被研发出来。尽管部分早期设计的控制器已进入商业化阶段，但其实际应用效率仍有待进一步优化和深入研究。

本章重点阐述了并联型 FACTS 控制器的运行机理，并对 SVC 与 STATCOM 在当代电力系统中的应用现状进行了系统梳理。在此基础上，对这两类典型动态无功补偿装置的关键性能指标展开对比分析，以评估其在提升系统稳定性方面的适用性与优劣。此外，章节还深入分析了无功补偿设备的成本效益，为下一阶段动态无功补偿技术的优选提供理论依据，确保研究成果兼具科学性与经济合理性。

2.2 无功补偿基本原理

2.2.1 并联补偿器

并联补偿器可被视为在指定系统接入点注入一种具备调节能力的电流源设备。该装置通过对电流源幅值与相位的调控，能够对无功功率的输送方向产生显著调控作用，并进一步间接影响有功功率的流动，从而达成对功率与电压的双重控制目的。相较于传统的单一线路无功补偿措施，并联补偿器通过覆盖整个变电站母线接线区域，优化了区域内所有电力设施的供电质量。该技术对于

维持变电站母线电压稳定性至关重要，显著提升了电力系统的综合供电效能与运行可靠性。

并联补偿器的部署策略主要有两种：一种是在电力系统的末端负载处设置，另一种是在距离变电站较远的输电线路关键节点安装。这两种方案均能显著提高电力传输效能，并增强系统的整体稳定表现。针对负载功率因数滞后的问题，配置并联补偿器可以显著改善滞后状况，从而大幅提升有功功率的传输效率。研究表明，在相同有功功率传输需求下，系统的稳定性与负荷电压偏离临界点的距离成反比关系。图 2-1 对比展示了引入并联补偿技术前后，负荷侧电压和有功功率的变化情况，其中图(a)表示未实施补偿技术的原始数据状态，而图(b)则清晰地呈现了补偿技术实施后的显著优化效果，充分证明了并联补偿技术在提升电力系统传输性能方面的关键作用。

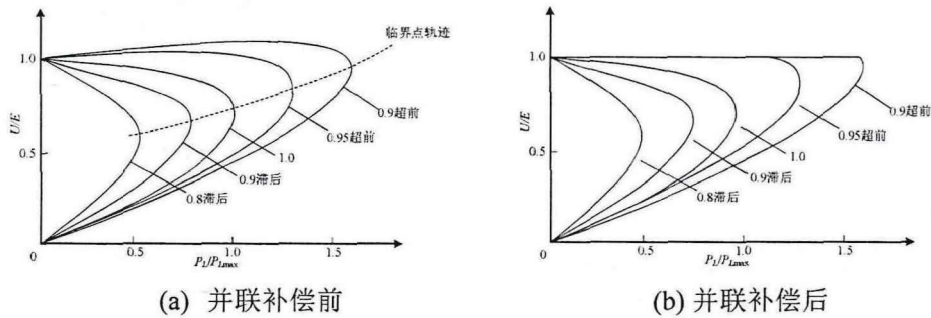


图 2-1 并联补偿前后系统 U-P 曲线

在不计配置储能装置的变换器情形下，并联补偿型控制器仅能通过精细调整感性或容性无功功率输出，从而实现电网节点电压的精确稳定，并显著调控电网系统的整体运行特性。并联补偿型控制器的核心功能在于维护特定参数的稳定性，其输出输出量需依据需求进行动态调整。因此，虽不同装置在提升系统性能方面存在性能差异，但其外部控制框架和所需参考信号在结构上高度统一。从可控无功电流源出发，并联补偿型控制器凭借其先进控制性能，可确保注入电网的电流与经过复杂算法生成的电流参考值保持高度同步，其中电流参考值是通过分析电网节点实际电压与基准参考电压的偏差结合特定控制策略计算得到。

2.2.2 静止无功补偿器

全控型晶闸管技术被广泛应用于 SVC 中，该技术取代了传统的开关部件，通过精准控制晶闸管的导通角度，实现了系统阻抗的有效调节，进而完成了对系统内无功功率的高效补偿。与常规技术相比，该技术展现出更快的响应时间与更优越的运行稳定性，同时具备技术成熟、可靠性高等优点，使其在电力系统中得到了广泛部署。从系统结构来看，SVC 由多个核心部件构成，包括晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Capacitor, TSC)、晶闸管投切电感(Thyristor

Switched Reactor, TSR)、晶闸管控制电抗器(Thyristor Controlled Reactor, TCR)以及滤波电容器(Filter Capacitor, FC)等模块,它们相互配合,共同保障了电力系统的稳定运行。此外,可控饱和电抗器(Saturable Reactor, SR)的加入进一步增强了系统的调节能力,使得无功补偿更加灵活高效。

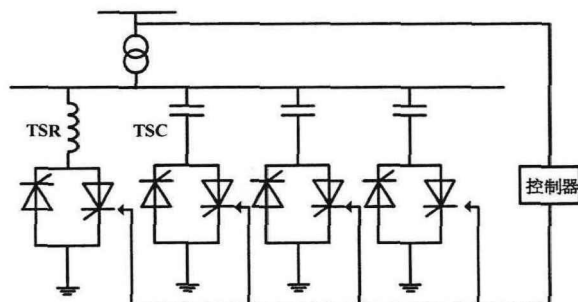


图 2-2 TSC+TCR 型 SVC 结构

TSC+TCR 型 SVC 具备较高的实用性被广泛采用,如图 2-2 所示。TCR 可实现感性无功补偿, TSC 能完成容性无功补偿,有效规避了单独配置 TCR 导致容量浪费或单独配置 TSC 造成无功补偿不连续的弊端,可实现感性和容性无功的平滑调节。

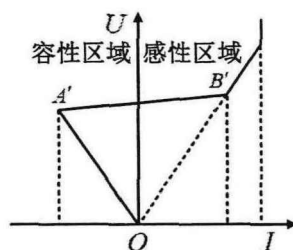


图 2-3 SVC 的 $U-I$ 特性曲线

图 2-3 清晰展示了 SVC 的 $U-I$ 特性曲线,该曲线突显了其在特定范围内对电压实现平滑、连续调节的显著性能。在稳态运行条件下, SVC 可近似看作一个受控电压源,通过明确的斜率控制特性来调整电压,从而精确保障系统稳定性。当调节达到其容量极限时,设备会转换为恒定阻抗工作模式。值得注意的是, SVC 发出的无功功率与电网母线电压的平方成正比。这意味着一旦电网电压出现扰动,其无功补偿作用会动态响应,若处理不当可能恶化电压水平,甚至诱发系统失衡。为了进一步分析其行为,式(2-1)与式(2-2)分别为 SVC 在容性和感性工作区域的无功响应的数学表达式。

$$Q_{\text{SVC}} = -\frac{U_{\text{T}}^2}{X_{\text{Cmax}}} \quad (2-1)$$

$$Q_{\text{SVC}} = \frac{U_{\text{T}}^2 (X_{\text{Cmax}} - X_{\text{Lmax}})}{X_{\text{Lmax}} X_{\text{Cmax}}} \quad (2-2)$$

式中： U_T 为电网母线电压； X_{Cmax} 为 TSC 提供的最大容抗； X_{Lmax} 为 TCR 提供的最大感抗。

SVC 控制模型如图 2-4 所示。从图中可以看出，系统首先对测得的母线电压进行滤波处理，并与参考电压比较，得到误差信号。该误差经过调节器处理后输出调节命令 B_R ，再经过逻辑计算和延迟模块，生成最终的补偿指令 B_{SVC} 。这一过程实现了对无功补偿量的快速动态调节，从而有效维持系统电压稳定。

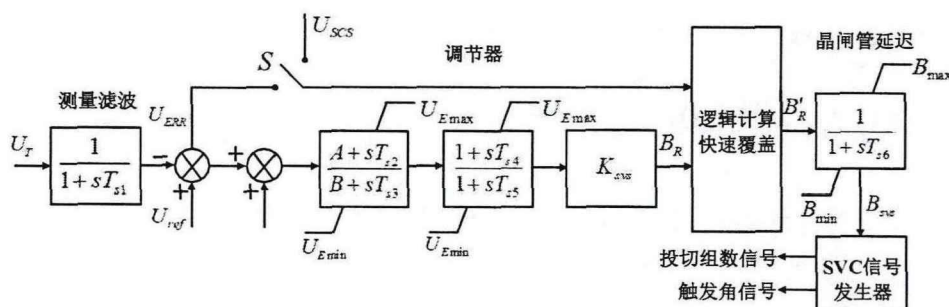


图 2-4 SVC 控制系统模型

2.2.3 静止同步补偿器

STATCOM 通过调节交流侧端口电压的幅值和相位，实现对目标输出电流的精确控制，进而完成无功补偿，模型如图 2-4 所示。从图中可以看出，STATCOM 核心由自换相电压型三相全桥逆变器组成，该逆变器通过交流端子与电网实现紧密连接。图中， $\dot{U}_T$ 为电网母线电压； $\dot{U}_i$ 为补偿装置输出电压； $\dot{I}$ 为进入补偿装置的电流； $\dot{U}_L$ 为该电流所导致的电位差；补偿器通过 $R+jX$ 电抗器接入电网。

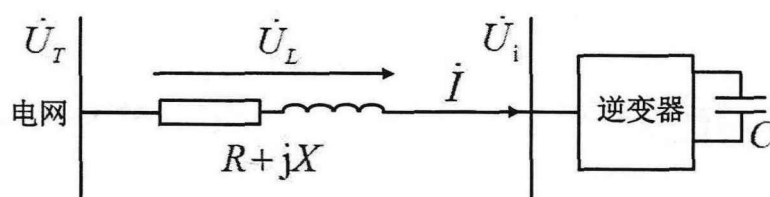


图 2-5 STATCOM 控制系统模型

将图 2-5 中的 $\dot{U}_T$ 和 $\dot{U}_i$ 分别视为理想电压源和可控电压源，如图 2-6(a)所示。从图中可以看出，当电压峰值 $U_T < U_i$ 时 $Q < 0$ ，STATCOM 输出感性无功，呈现容性特征；当 $U_T > U_i$ 时 $Q > 0$ ，STATCOM 吸收感性无功，呈现感性特征；两端电压相等时，STATCOM 与电网之间无无功功率流动。此刻，调节峰值电压即可实现无功功率的高效连续补偿。

连接阻抗的等效电路及相量图如图 2-6(b)所示。此时 $\dot{U}_i$ 落后 $\dot{U}_T$ 角度 δ ，通过同时调节 $\dot{U}_i$ 的峰值和相角，可实现对 $\dot{I}$ 峰值相角的控制，从而实现无功功

率大小和方向的平稳调整。

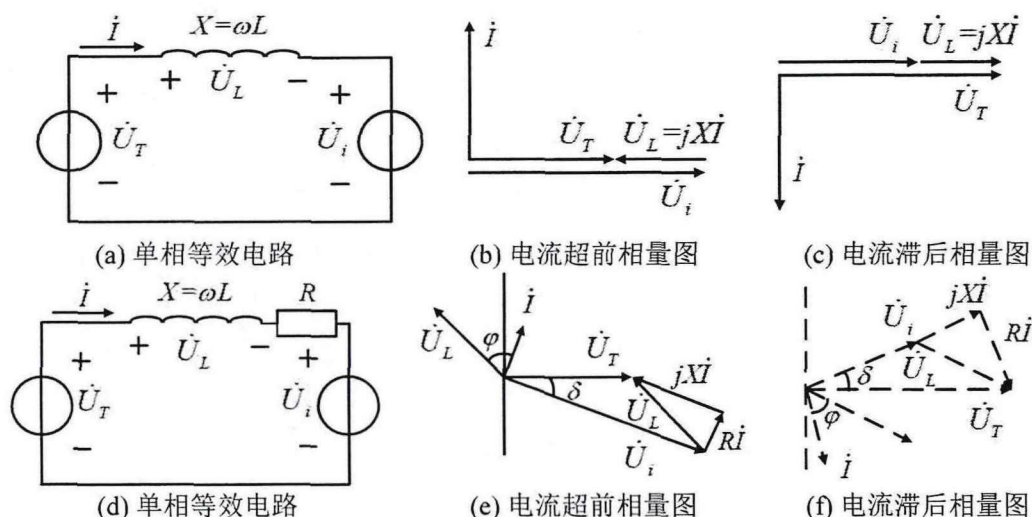


图 2-6 实际情况 STATCOM 的等效电路及相量图

在调节范围内，STATCOM 能够等效模拟为一个可调电压源，在维护电网母线电压稳定性方面发挥着核心作用。当补偿器的工作超出正常范围，释放的无功功率与电网母线电压之间呈现出明确且稳定的线性函数关系。并且该设备的电压补偿效能并未完全受制于电网电压状况，即在电网电压剧烈波动时依然能够展现出高效能，确保电压稳定在预设的优值范围内。U-I 特性曲线如图 2-7 所示。该曲线展示了该设备在特定区间内实现连续的电压调控能力，具备良好的调节性能。

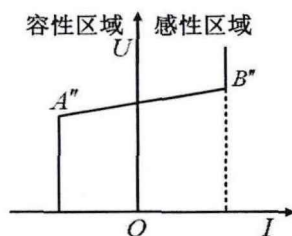


图 2-7 STATCOM 的 U-I 特性曲线

STATCOM 的无功响应可表示为：

$$Q_{\text{STATCOM}} = \frac{U_i \cos \delta - U_T}{X} U_T \quad (2-3)$$

STATCOM 控制模型如图 2-8 所示。该系统通过一系列的信号处理和控制环节，实现对电压的精确调节和稳定控制。输入电压 U_i 首先经过一个测量滤波器进行初步处理，然后与参考电压 U_{ref} 进行比较，并通过比例积分控制器进行误差校正。在这一过程中，系统还考虑了最大和最小电压限制以确保安全运行。随后，经过限幅后的信号进一步通过微分环节和电流反馈控制，最终输出目标电

压 U_T 。整个控制系统结合了比例积分控制、限幅控制和电流反馈等多种控制策略，以确保 STATCOM 能够高效、稳定地运行。

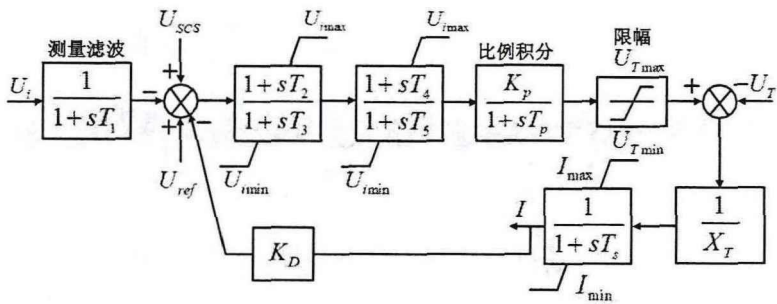


图 2-8 STATCOM 控制系统模型

2.3 静止无功补偿器与同步补偿器比较分析

SVC 与 STATCOM 均可向电力系统提供无功功率以实现补偿目标，并在其线性工作范围内展现出相似的性能特征。然而，这两种装置在技术原理层面存在显著区别。

SVC 使用晶闸管技术进行控制及投切装置执行电子开关操作，并严格保证晶闸管切换时间的精确性要求。通过调整电感器或电容器的阻抗，该装置能够高效地实现无功功率的灵活调控。相比之下，STATCOM 依托于变换器技术，基于可调节的电压或电流源能够直接控制输出电压与电流的幅值及相位，因而可灵活地调节无功功率在电网中的传输。

两者的典型 U-I 特性曲线如图 2-9(a)和(b)所示。

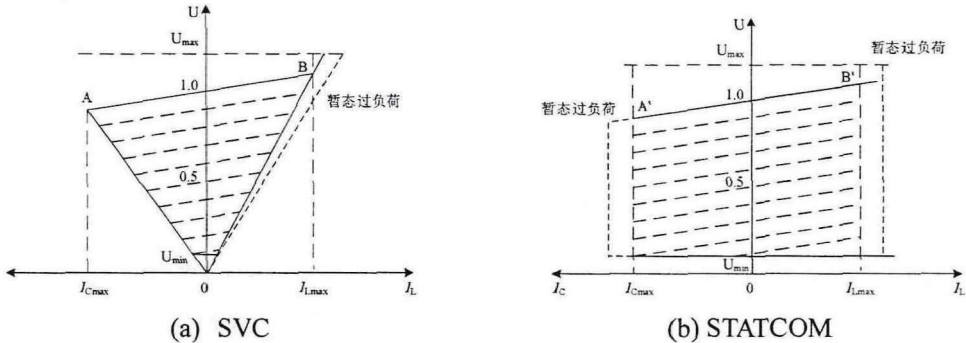


图 2-9 SVC 和 STATCOM 的 U-I 特性曲线图

在系统稳定运行期间，SVC 与 STATCOM 在 AB 段与 A'B' 均按预设斜率规律对电压实施调控。其主要差异体现在满载条件下：SVC 在满载运行时，可近似看作一常值电容电纳，其无功输出受系统电压平方大小直接影响。针对容性及感性运行工况，无功功率的输出量可表示为：

$$Q_{SVC} = -\frac{U^2}{X_{Cmax}} \tag{2-4}$$

$$Q_{\text{SVC}} = \frac{U^2(X_{C\max} - X_{L\max})}{X_{L\max}X_{C\max}} \quad (2-5)$$

式中： $X_{C\max}$ 和 $X_{L\max}$ 分别为已投运 SVC 中 TSC 和 TCR 的最大容性电抗和感性电抗。

STATCOM 的最大补偿电流输出值不依赖于系统电压的强弱，体现了其控制的稳定性，而无功补偿容量则与系统电压保持明确的线性比例关系，呈现正相关性。即使在系统电压接近最低运行极限的环境中，STATCOM 依然能以额定功率输出补偿电流，展现出良好的功率供应性能，从而在补偿效能上显著优于传统 SVC 装置。面对系统遭受的剧烈电压扰动，如电压急剧偏离控制器预设的线性工作区间，尤其是在电压骤降时，STATCOM 能提供更高效率的电压支撑作用，保障电力系统的稳定性。相较而言，当 SVC 处于暂态过载条件，其容性电流输出受限于电容容量及系统电压水平，几乎无额外无功输出空间；而 STATCOM 的容性暂态电流主要由电力电子器件的最大关断能力决定，因而具备了更高的调节灵活性和发展潜力。在感性运行模式下，由于电力电子器件固有特性及工作极限的制约，SVC 与 STATCOM 在感性暂态电流上限方面受器件温升限制，因而具备有限的短时过载特性。然而，SVC 的瞬态稳定性还受到电容参数的显著影响。当电力系统发生故障导致电压骤降时，STATCOM 所能提供的无功补偿量在幅值上接近于额定容量为其实际值 1.2 至 1.3 倍 SVC 所能提供的补偿能力。SVC 与 STATCOM 在电压恢复阶段的工作特性以及对发电机转速的影响，具体的仿真分析结果如图 2-10(a)和(b)所示。

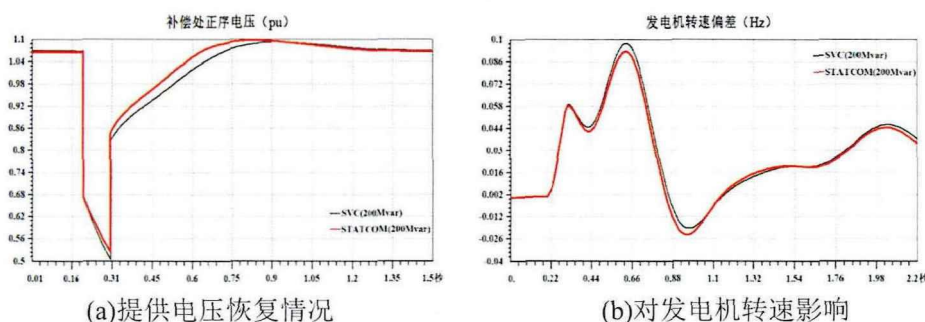


图 2-10 SVC 与 SVG 的补偿性能比较

在动态响应性能方面，SVC 系统由于其依赖过零进行自然关断会造成传输时延明显增加，导致开环响应周期往往很长，通常超过 40 毫秒。与此形成对比的是采用 GTO 等新型器件的 STATCOM，其传输延迟低，配合新型控制策略的应用，其开环响应时间主要由固有时间常数决定，能够显著压缩至 10 毫秒以内。不过，STATCOM 的研制成本普遍要高于 SVC。

STATCOM 在多个方面的性能超越了传统 SVC，特别是在暂态无功补偿能力、控制精准度和动态响应速率上表现突出，使其成为 FACTS 中的关键控制设

备。目前，基于 VSC 的 STATCOM 通过调节直流侧电容电压或控制变换器的调制比实现交流侧电压幅值的调控，进而实现对无功功率的连续且稳定控制，具有良好的响应性能与可靠性。全球范围内 STATCOM 的调节能力已达到士 200Mvar。与此同时，凭借传统晶闸管低廉的价格，SVC 展现出良好的经济性。正因如此，SVC 在电力系统中也获得了广泛的应用。

2.4 无功补偿器经济性分析

无功补偿器的经济性由投资成本年值、年运维费用、年损耗费用和成本增量四部分构成。

(1) 投资成本年值

动态无功补偿装置的建设模型由初始投资及运行维护费用构成，前项包含设备购置费用、场地建设费用等静态成本，后项则与设备运行功率密切相关。本节讨论了无功补偿装置的经济投入状况，详细分析结果如表格 2-1 所示。从表中可以看出，STATCOM 的单项投资最高，介于 552 元/kvar 至 560 元/kvar 之间；相比之下，新置调相机与改造调相机的单位造价分别是 407 元/kvar-417 元/kvar 和 304 元/kvar-314 元/kvar；而 SVC 作为对比对象，其单位造价最为经济，仅需 188 元/kvar-213 元/kvar。造成这种价格梯度的主要因素在于设备采用的技术层级、工艺流程的复杂程度以及现场集成规范的不同要求。作为高效的全控型电力电子器件，STATCOM 的高昂成本与其迅捷的动态响应性能及精确的无功调节特性形成显著关联，而 SVC 作为半控型装置则以其更具成本效益的构建费用，在经济层面具备较强的市场竞争力。通过对相关数据的深入剖析，可为动态无功补偿设备的优选及经济性评估，提供关键的量化参考。

表 2-1 三种不同无功补偿装置的投资成本

项目	设备费 /万元	安装费和土 建费/万元	其他费 用/万元	建场费/ 万元	合计/万元	单位造价/ 元/kvar
调相机新建	18000	4500	1800	105~700	24405~25000	407~417
调相机改造	11810	4500	1800	105~700	18215~18810	304~314
SVC	8000	2000	1000	270~1800	11270~12800	188~213
STATCOM	24000	6000	3000	90~600	33090~33600	552~560

在评估电网设备的经济性时，STATCOM 因其初始资本投入高与运行周期短，表现出最高的年化投资成本，其年均投资负担达到 3925.47 万元/年，从而使 STATCOM 的投资成本年值在所比较方案中最为突出。紧随其后的是需要进

行 10 年改造周期的调相机项目，其相应的投资年值为 2803.24 万元/年。而新建调相机方案尽管成本相对较低，但其年值仍估算为 2220.69 万元/年。相比之下，改造调相机 20 年项目及采用 SVC 技术方案的投资年值显著减少，分别为 1915.84 万元/年与 1495.42 万元/年，表明这两者在长期来看更具经济优势。

(2) 年运维费用

STATCOM 因其较高的初期投入和较短的设备使用年限，导致其年运维费用最为突出，达到 3925.47 万元/年；而采用 10 年服务期限的改造调相机次之，年运维费用为 2803.24 万元/年；新建调相机位列第三，其年年运维费用为 2220.69 万元/年。STATCOM 由于较短的运行年限及较高的初始投入，导致其年运维费用相对较高，而 SVC 凭借长期运行中的优异表现及较低的年均成本，充分证明了其显著的经济优势。这种详细的分析充分揭示了各类无功补偿装置在全生命周期中的经济性对比。

(3) 年损耗费用

在计算中，调相机、SVC 和 STATCOM 的损耗率分别设定为 1.5%、0.8%和 1.0%，电能价格按 0.4 元/MW·h 计算。根据上述模型，新建调相机和改造调相机的年运行成本均为 792 万元；STATCOM 的年运行成本为 422 万元；而 SVC 的年运行成本则为 528 万元。这些结果表明，尽管 STATCOM 在动态性能方面具有优势，但其年运行成本相对较低，这主要得益于其较低的损耗率。相比之下，调相机由于较高的损耗率，其年运行成本显著高于 STATCOM 和 SVC。

(4) 成本增量

结合投资成本年值、通过计算年度维护与损耗费用，可得出各补偿设备的年度成本增量。具体如下：

新建调相机：4262.69 万元/年

改造调相机(10 年)：4536.24 万元/年

改造调相机(20 年)：3648.84 万元/年

SVC：2199.42 万元/年

STATCOM：5192.47 万元/年

详细结果如图 2-11 所示。

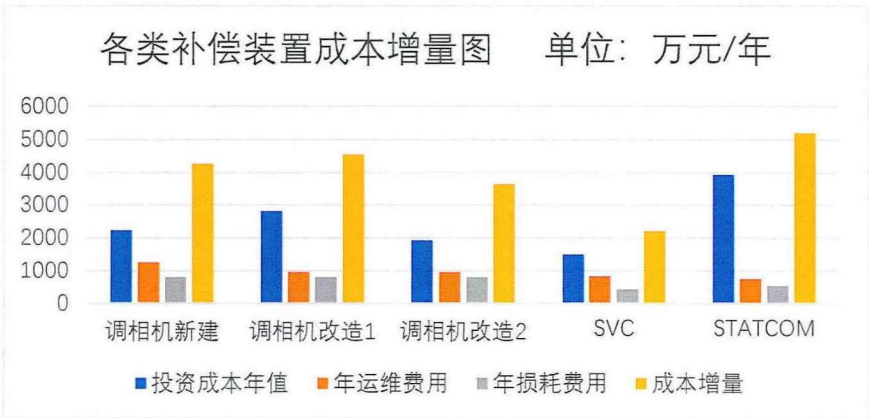


图 2-11 各类补偿装置成本增量图

为简化计算，针对 SVC 与 STATCOM 两种典型补偿设备，其经济性评价模型可归纳为^[56,57]：

$$\begin{aligned} C_{\text{SVC}} &= 0.002s_c^2 - 2.04112s_c + 852.1722 \\ C_{\text{STATCOM}} &= 0.00378s_G^2 - 3.84426s_G + 1604.988 \end{aligned} \tag{2-6}$$

式中： s_c 和 s_G 分别表示 SVC 和 STATCOM 的总运行容量，单位为 Mvar； C_{SVC} 和 C_{STATCOM} 分别表示 SVC 和 STATCOM 的单位容量经济成本值，与设备容量呈二次函数关系；SVC 和 STATCOM 的容量经济曲线如图 2-12 所示。

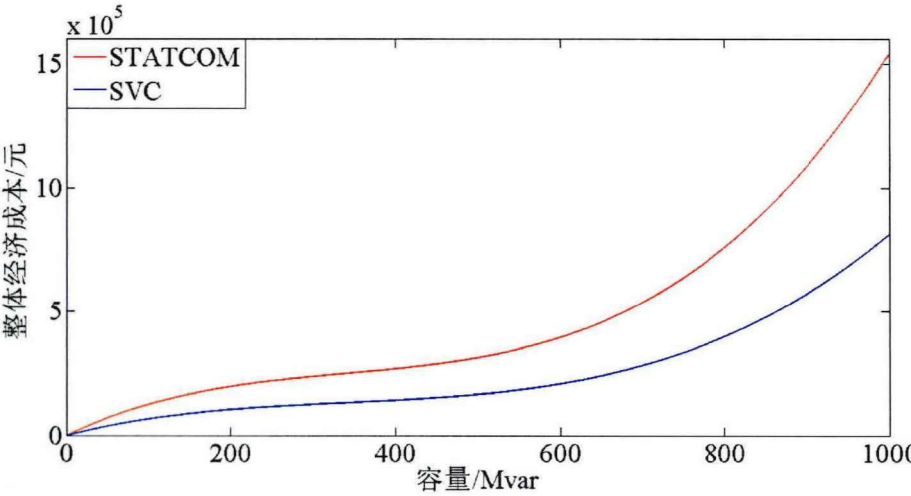


图 2-12 SVC 和 STATCOM 的容量经济曲线

2.5 本章小结

本章讨论了两类典型动态无功补偿装置，评估了其无功补偿性能的优缺点，并探讨了这些补偿措施对电压暂降幅度、频率偏差等核心电网稳定性指标的影响规律，为动态无功补偿的优化布局提供了理论支撑。此外，本章给出了无功补偿装置的经济性分析，建立了三种补偿设备单位容量经济成本与设备容量的

关联函数，并基于该关联关系给出了相应的经济成本曲线，为实际工程中的设备选型与经济性评估提供了参考依据。

第3章 交直流混联电网动态无功补偿设备选址规划研究

3.1 引言

动态无功补偿设备凭借其出色的快速响应性能与高度可靠的运行能力，已成为增强交直流混合电网电压稳定性的关键。尽管如此，该类设备较高的初始投资门槛，制约了其在大范围内部署，而选址方案的规划则成为节约经济成本和提升电网电压稳定性的前提。随着新型电力系统的快速建设以及可再生能源大规模并网需求的增长，现代电网逐渐转变为具有多直流馈入特性、随机性强、运行状态多样化的交直流混合系统。这种网络有着复杂的拓扑结构及庞大的节点数量，导致传统规划方法在计算效率方面面临着不小的挑战。本节基于改进的轨迹灵敏度指标，构建了融合暂态电压稳定性约束的无功补偿选址策略，通过在电网薄弱处布设无功补偿设备提升了电网的运行稳定性。

3.2 薄弱区域划分模型

3.2.1 基于戴维南动态等值的阻抗模裕度

在大规模电力系统中，构建合理的网络等值模型是开展系统稳定性分析的基础。鉴于新能源发电具有较强的随机性和多样化的运行模式，为更好地反映系统中动态及旋转设备的特性，本节基于戴维南动态等值原理构建了交直流混联电网的等值模型。

以受端系统中任意负荷节点为观察点，沿着电力流向的反方向进行等值处理，可将系统等效为图 3-1 所示的双端口等值模型。

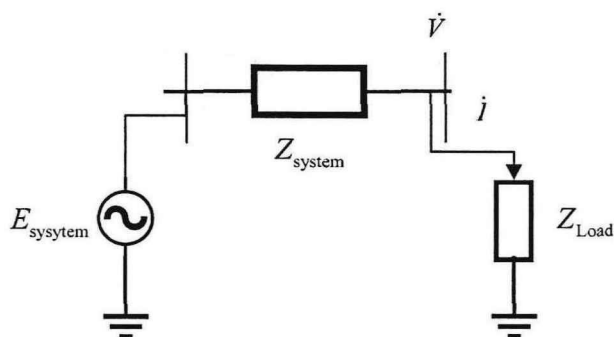


图 3-1 双端等值模型

图 3-1 中， Z_{system} 为与负荷节点关联的等效系统阻抗； Z_{Load} 为对应节点的等效负荷阻抗； E_{system} 为电势向量； $\vec{V}$ 为负荷节点的电压相量； $\vec{i}$ 为该节点的等效

负荷电流相量； $P_{\text{Load}} + jQ_{\text{Load}}$ 为负荷节点的等效负荷功率。

在交直流互联网络中，动态设备高度集中，且大规模新能源传输导致不确定性大幅度提升。为适应动态运行模式的变化，需精确求解负荷节点的系统等值阻抗，应用戴维南动态等值方法对图 3-1 中阻抗参数进行建模，如式(3-1)所示：

$$Z_{\text{system}} = Z_{\text{Thev}} = -\frac{d\dot{V}_i}{d\dot{I}_i} \quad (3-1)$$

式中： Z_{Thev} 为系统戴维南等值阻抗。

等值负荷阻抗 Z_{Load} 的数值可由式(3-2)推导得到：

$$Z_{\text{Load}} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \quad (3-2)$$

因此，该负荷节点的阻抗模裕度 μ 可通过式(3-3)得出：

$$\mu = \frac{|Z_{\text{Load}}| - |Z_{\text{system}}|}{|Z_{\text{Load}}|} \quad (3-3)$$

文献[58]说明了非解析复变电力系统中负荷节点所传输的有功功率达到最大值的条件为：

$$|Z_{\text{system}}| = |Z_{\text{Load}}| \quad (3-4)$$

阻抗模裕度 μ 作为量化指标，可用于评估系统当前运行状态与极限传输能力之间的接近程度，其定义域为 $\mu \in [0, 1]$ 。当该参数取值 $\mu = 0$ 时，表明电网处于电压稳定性临界阈值。进一步表明，该指标不仅能够表征交直流互联网络的电压稳定裕度水平，还可通过数值分布特征识别受端系统的薄弱区域，从而优化动态无功补偿的选址策略。

3.2.2 阻抗模裕度计算方法

除阻抗模裕度外，可用于评估交直流混联系统电压稳定裕度的指标还包括：静态电压稳定裕度(通过潮流计算求取最大功率传输点)、暂态电压稳定裕度(基于故障后电压恢复特性)、短路比(SCR，衡量直流系统换相能力)以及戴维南等值参数裕度等。

本章采用 BPA 综合仿真平台对交直流互联网络中各负荷节点的阻抗模裕度进行量化分析。具体实施步骤为：首先，在 BPA 中设置同步功率扰动，使电源侧与负荷侧在指定时间段内同步增加功率输出。在此过程中，应考虑系统中的有功损耗全部由平衡节点承担。此外，各同步发电机节点的无功输出需受限于其预设的无功功率上下限范围。对于目标节点 i 在时刻 t 的等效阻抗，可通过公式(3-5)和(3-6)联合计算得到。

$$Z_{Loadi, t} = \frac{\dot{V}_{i,t}}{\dot{I}_{i,t}} \quad (3-5)$$

$$\dot{I}_{i,t} = \text{conj}\left(\frac{P_{Loadi,t} + jQ_{Loadi,t}}{\dot{V}_{i,t}}\right) \quad (3-6)$$

式中： $\dot{V}_{i,t}$ 表示在时刻 t 负荷节点 i 的相电压； $\dot{I}_{i,t}$ 为 i 节点在 t 时刻的电流相量； $P_{Loadi,t} + jQ_{Loadi,t}$ 表示在时刻 t 负荷节点 i 的等值负荷功率。

节点 i 在 t 时刻的等值系统阻抗，可由其在 t 时刻与 $t-1$ 时刻的电压相量及等效负荷电流相量推导得到，具体计算方法如式(3-7)所示：

$$Z_{systemi, t} = Z_{Thevi, t} = -\frac{d\dot{V}_{i,t}}{d\dot{I}_{i,t}} = \frac{\dot{V}_{i,t} - \dot{V}_{i,t-1}}{\dot{I}_{i,t} - \dot{I}_{i,t-1}} \quad (3-7)$$

节点 i 在 t 时刻时的阻抗模裕度可表示为：

$$\mu_{i,t} = \frac{|Z_{Loadi,t}| - |Z_{systemi,t}|}{|Z_{Loadi,t}|} \quad (3-8)$$

在交直流互联网络中，通过迭代公式(3-8)可计算系统中各负荷节点的阻抗模裕度。基于同一时刻各节点的裕度值，对比筛选出裕度最小的节点，作为动态无功补偿装置的优选部署位置。该方法通过识别电压稳定性薄弱区域，以更经济的方式提升交直流混联系统的运行稳定性。

3.3 基于动态仿真的改进轨迹灵敏度

文献[59]定义节点 j 的轨迹灵敏度 TSI_j 如下：

$$TSI_j = \sum_{i=1}^n W_{di} \left[\sum_{k=1}^N W_k \left(\frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \right)_{t=t_k} \right] \quad (3-9)$$

式中： n 表示系统总节点数； W_{di} 对应节点 i 的权重系数； N 表示为采样时刻点总数； W_k 为时刻 t_k 的权重； $V_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表节点 i 的电压； Q_j 为节点 j 处的无功注入功率； $(\partial V_i / \partial Q_j)_{t=t_k}$ 为在 t_k 时刻节点电压 V_i 对无功功率 Q_j 的轨迹灵敏度； $t_k (k=1, 2, \dots, n)$ 表示采样时刻。

轨迹灵敏度 $\partial V_i / \partial Q_j$ 是评估节点无功功率注入对系统电压稳定性作用程度的核心量化指标，能够有效反映特定节点的无功补偿对受端电网静态电压分布的调节能力。当某节点的轨迹灵敏度值较高时，表明在该节点实施无功补偿可显著改善系统电压稳定性。因此，在动态无功补偿装置的选址规划中，应优先考虑轨迹灵敏度较大的节点，以实现电网暂态电压稳定性的最大化提升。

然而，在实际工程应用中，直接计算式(3-9)所示的偏导数存在较大困难。

为解决这一问题，研究提出了基于现有运行数据的改进计算方法。通过合理的近似处理，可将轨迹灵敏度指标（Trajectory Sensitivity Index, TSI）转化为式(3-10)所示的实用化计算形式，从而为工程应用提供可行的技术手段。

$$TSI_j = \sum_{i=1}^n W_{di} \left[\sum_{k=1}^{N_k} W_k \frac{V_i(t_k, Q_{j0} + \Delta Q_{j0}) - V_i(t_k, Q_{j0})}{\Delta Q_{j0}} \right] \quad (3-10)$$

式(3-10)的计算方法可概括如下：在故障条件下，通过在节点 j 注入固定无功补偿量 ΔQ_j ，利用 BPA 动态仿真获取各节点 i 的电压时域响应 $V_i(t_k, Q_{j0} + \Delta Q_j)$ ；在不注入无功补偿的情况下，重复仿真过程得到电压响应 $V_i(t_k, Q_{j0})$ ；计算两种场景下的电压差值作为式(3-9)中偏导数的近似值；结合节点和时间权重，按式(3-10)计算 TSI。

然而，使用 STATCOM 输出功率会随系统电压动态变化，而非恒定值。因此，采用 BPA 中的动态无功补偿元件模型进行仿真，能够更准确地反映装置特性，提高计算精度。此外，式(3-10)未考虑不同故障场景的发生概率，难以全面评估系统性能。因此，本节提出改进轨迹灵敏度指标 ITS_I，当采样时刻之间的时间间隔足够小时，也能实现精确计算，ITS_I 可表示为：

$$ITSI_j = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} w_F(v) \left\{ \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} w_d(v) \left[\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} w_k V_{i,j}(t_k, Q_{j0} + \Delta Q_{j(\text{comp})}) - V_{ij}(t_k, Q_{j0}) \right] S_{\text{comp}} \right\} dv \quad (3-11)$$

式中： $w_F(v)$ 为故障权重函数； $w_d(v)$ 为节点权重函数； w_k 为时刻 t_k 的权重系数； $\Delta Q_{j(\text{comp})}$ 为节点 j 配置动态无功补偿装置后注入的无功功率； S_{comp} 为动态无功补偿设备额定容量的倒数。 $V_{i,j}(t_k, Q_{j0} + \Delta Q_{j(\text{comp})})$ 为对于第 i 类故障场景，节点 j 装设补偿装置时，时刻 t_k 节点 i 的电压值； $V_{i,j}(t_k, Q_{j0})$ 为未配置补偿装置情况下时刻 t_k 节点 i 的电压值。

ITS_I 原理示意图如图 3-2 所示。从图中可以看出阴影区域的面积与动态无功补偿装置对系统电压的改善效果呈正相关关系。具体而言，阴影区域面积的增加反映了故障期间各节点电压提升幅度的扩大，这表明动态无功补偿装置对系统暂态电压稳定性的增强作用更为显著。因此，阴影区域面积可作为评估补偿装置性能的重要量化指标，面积越大，说明补偿装置在维持系统电压稳定性方面的效果越显著。

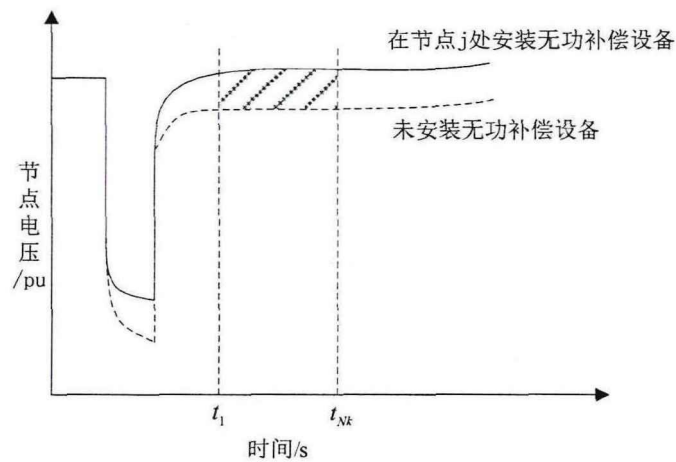


图 3-2 ITSI 原理示意图

3.4 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址

3.4.1 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址策略

针对暂态电压稳定性进行无功规划选址的研究过程中，需统一无功补偿容量基准，对所有备选节点施行系统化评估，并基于补偿灵敏度测算结果，科学决策选址、定型方案。在确定无功补偿选址方案后，还需进一步明确动态无功补偿设备的具体类型。本节选取了 SVC 和 STATCOM 对其选型标准进行了详尽分析。

(1) 当 SVC 与 STATCOM 的补偿效能相仿时，应以经济性为首要标准来选定更佳的 SVC 方案。

(2) 为提升直流输电系统的快速恢复性能，可在其落点附近补偿节点部署先进的 STATCOM 设备，通过高效的无功功率补偿增强系统动态稳定性。

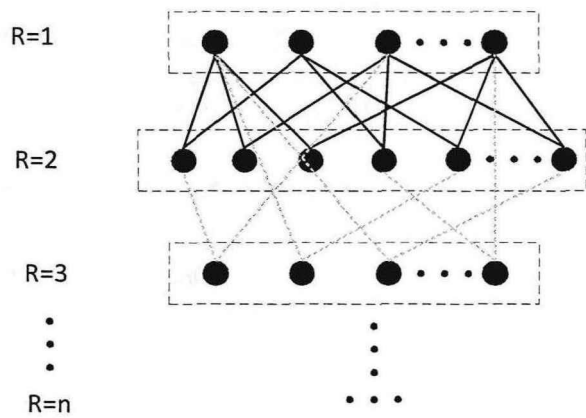


图 3-3 动态无功规划装置组合选址法

为有效实现动态无功补偿装置的优化配置，进而增强暂态电压稳定性，提出了一种兼顾运行效率与目标精度的集成化选择策略。针对潜在暂态电压失稳

区域，具体执行步骤包括：首先，对存在暂时性薄弱环节的节点实施动态无功补偿装置的逐项部署，并开展故障场景模拟与评估。当 1 台装置足以克服暂态电压骤降时，则采取单装置配置方案；若单一设备无法满足抑制稳定问题，需升级为 2 台动态无功补偿装置部署方案，并重新进行故障仿真验证；若 2 台装置也无法实现显著暂态电压稳定效果，则可进一步提升装置数量至 3 台或更大规模，全面评估组合补偿策略的有效性。动态无功补偿装置组合选址法的理论依据与实践流程如图 3-3 所示。综上所述，无功补偿装置选址的核心在于以尽可能少的安装点提升系统的暂态电压稳定裕度。

本节提出的针对暂态电压稳定性的无功规划选址策略，推广其在实际电网应用的可行性与有效性。其具体实施流程可细分为以下几个关键阶段：首先，利用时域仿真程序，对电网进行广泛的暂态电压稳定性评估，界定潜在的薄弱环节；随后，运用组合选址方法，量化评估候选节点的补偿效能，并推算各薄弱区域能够承受的动态无功补偿容量，最终形成最优的无功规划配置方案，确保电网运行的稳定性和经济性。

3.4.2 考虑暂态电压稳定性的无功规划选址求解流程

围绕暂态电压稳定性设计的无功补偿装置选址求解流程如图 3-4 所示。该方法可通过动态仿真平台进行辅助分析。针对交直流互联网络的无功规划选址问题，具体求解过程包括以下步骤：

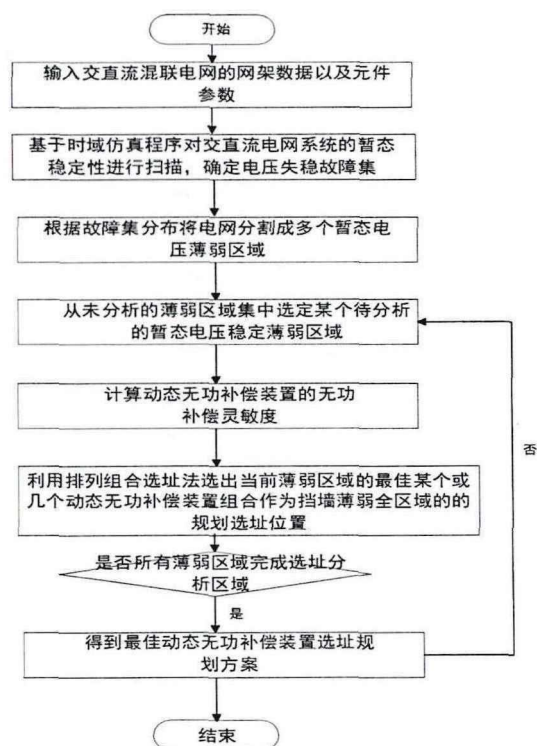


图 3-4 考虑在暂态电压稳定性的无功选址流程

步骤 1: 需输入交直流互联网络的数据信息, 包括直流输电系统、同步发电机节点及动态无功补偿设备等关键组件的数据参数, 并完善控制系统的重要参数配置。

步骤 2: 基于仿真技术对交直流互联网络的暂态稳定性进行分析, 分析输电线路、同步机节点及直流输电系统等关键设备, 执行系统性的故障排查及动态模拟实验, 从而明确导致暂态电压波动的异常工况集合。基于这些故障集合的传播特性与作用域, 将电力网络划分为多个暂态电压稳定性较低的区域单元, 为后续实施有效的电压稳定控制奠定理论数据基础。

步骤 3: 从电网中筛选出薄弱区域后, 需对特定区域进行评估, 并基于公式(3-3)分别计算该区域内各节点的动态无功调节灵敏度。随后通过优化选址策略对候选站点进行多维度评估: 当单个补偿装置无法满足预设的动态电压稳定性要求时, 则需考虑采用两个或更多节点进行联合补偿, 系统化检验其协同效应对暂态电压稳定性提升的幅度, 从而确定该薄弱区域的无功补偿最佳配置方案。

步骤 4: 检查各处暂态电压稳定是否有遗漏区域, 确保无功规划选址分析均已完成。如发现部分区域分析尚未彻底实施, 应立即转回步骤 3, 对尚未优化的区域展开动态无功补偿装置选址方案设计; 若所有薄弱区域均已完成评估, 则可生成并提交一套完整的最优动态无功补偿装置选址方案, 以应对全局暂态稳定风险。

针对交直流混联系统的暂态电压稳定特性开展系统性分析, 尤其在无功规划选址分析中, 动态无功补偿装置对电网薄弱区域的稳定增强作用尤为突出。通过识别不同薄弱区域并定位其最优补偿位置, 可将复杂的选址优化问题转化为多个相对独立的子问题, 从而降低整体分析复杂度。无功补偿选址应以最小化选址数量为核心原则, 在保障系统暂态电压安全裕度的前提下最大限度地提高了资源配置效率。采用无功优化选址策略, 不仅能够确定最优的地址布置方案, 也为后续研究多目标协同的电压稳定性优化策略提供了理论依据。

3.5 算例分析

基于 IEEE 39 节点交直流混联系统的算例模型如图 3-5 所示, 该系统包含 3 条直流输电线路, 分别接入点电网特定节点。其中, 节点 2、25 及 38 为的整流侧, 节点 6、16 和 18 为逆变侧。该系统中的所有换流器执行高效能的恒定电流-恒定熄弧角控制方案, 熄弧角整定值为 8° , 直流侧电流标幺值设定为 1.0pu。

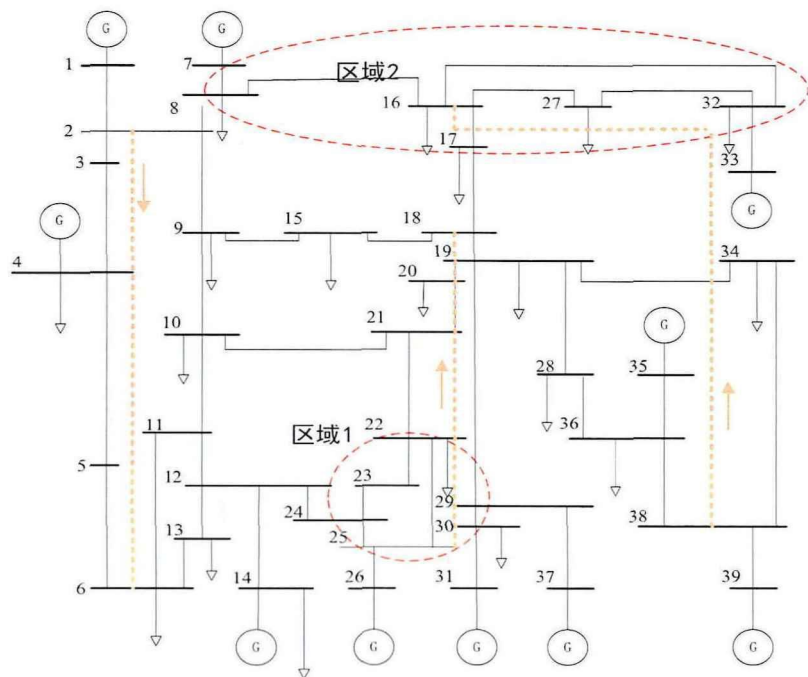


图 3-5 IEEE39 含直流网络架构

通过时域仿真分析，识别出电压暂态异常尤为突出的两处关键区域，并发现有八条输电线路在承受 100ms 持续时间三相短路故障时，存在电压失稳的问题。

表 3-1 存在失稳风险的薄弱区域和线路

暂态电压薄弱区域	存在失稳风险的线路
区域一	24-25、22-25
区域二	8-16、7-8、16-17、16-27、16-32、27-32

以区域 1 内 22-25 线路发生突发三相短路的典型故障情况下为例，针对该线路的电压稳定性问题，其无功补偿装置的灵敏度分析详见表 3-2。从表中可得知，区域 1 的暂态电压稳定性最优提升点为节点 24，该节点在单台高效动态无功补偿装置的配置下可有效改善系统整体稳定性。

表 3-2 线路 22-25 故障后动态无功补偿设备的灵敏度数据

补偿节点	$ITSI_j$	补偿节点	$ITSI_j$
25	0.0714	24	0.0723
23	0.0635	22	0.0005
21	0.0005	10	0.0649
11	0.0563	12	0.0007
13	0.0623	6	0.0509

对区域 2 的补偿灵敏度进行分析，以线路 16-17 故障为例开展无功补偿设备的选址研究。动态无功调节设备的补偿灵敏度评估结果如表 3-3 所示。分析表明，若该区域仅部署一台动态无功补偿设备，其在提升系统暂态电压稳定性方面的效果有限。需通过增设无功配置补偿装置，结合节点 27 与节点 32 构建的

协同补偿布局方案，可作为区域 2 暂态电压薄弱环节的最优无功资源配置策略。

表 3-3 线路 16-17 故障后动态无功补偿设备的灵敏度数据

补偿组合个数	补偿点 1	补偿点 2	ITSI _j
2	16	27	0.0650
2	16	32	0.0458
2	27	32	0.0470
2	16	17	0.0069
2	17	32	0.0059
2	17	27	0.0066
2	17	8	0.0025
2	16	8	0.0081
1	8	-	0.0051
1	16	-	0.0087

为比较不同补偿设备在等容量配置前提下的性能差异，对多种装置的灵敏度指标进行对比分析，相关结果列于表 3-4。通过深入分析数据可发现：在节点 24 处，无论是采用 SVC 还是 STATCOM 补偿，其性能表现均表现出较高的一致性；然而，当节点 27 与 32 分别配置为 STATCOM 或在节点 27 使用 STATCOM、节点 32 使用 SVC 的情况下，这两种配置的补偿效能均显著优于单纯的 SVC 补偿方案。综合经济效益与灵敏度表现的综合考量结果显示，节点 24 与 32 适合部署 SVC，节点 27 则应采用 STATCOM 进行补偿，这种优化配置在优化投资成本的同时，并大幅提升系统的补偿能力与运行稳定性。

表 3-4 不同无功补偿设备下的灵敏度

补偿点 1	补偿点 2	ITSI _j
24(SVC)	-	0.0723
24(STATCOM)	-	0.0737
27(SVC)	32(SVC)	0.0701
27(SVC)	32(STATCOM)	0.0724
27(STATCOM)	32(SVC)	0.0926
27(STATCOM)	32(STATCOM)	0.0932

3.6 本章小结

本章对交直流混联电网中的动态无功补偿设备的选址方案进行了讨论。通过引入 ITSI 指标，结合动态仿真技术识别系统关键薄弱区域，针对典型故障场景开展量化分析。通过对薄弱节点集合计算各节点的 ITSI 值并进行对比分析，从而确定最优补偿位置。在此基础上，构建了考虑补偿装置灵敏度与暂态电压安全要求的交直流混联系统无功规划选址策略。该方法可精准配置出暂态电压薄弱区域内的最优补偿组合，提升了规划方案的合理性与经济性。

第4章 交直流混联电网动态无功补偿设备容量规划研究

4.1 引言

为提升电网电压稳定水平,已有多种动态无功补偿设备选址和定容的寻优方法被提出来,然而,现有方法大多基于静态电压稳定,而针对暂态稳定寻优算法尚不多见。因此,在该背景下,建立考虑暂态电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型,是保证电力系统安全、稳定运行的关键。针对交直流电网中存在的电压稳定性挑战,本章选取了两类典型无功补偿设备构建了多目标优化模型。在选址确定的基础上,采用鸚鵡寻优算法协同确定动态无功补偿装置的容量配置方案,验证了所提配置策略的有效性。

4.2 考虑暂态电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型

本节围绕交直流混合电网的无功补偿优化问题,构建了以提升电压暂态稳定性和降低投资为目标的多目标优化模型,兼顾系统电压改善效果与经济性,以求得最优配置容量。

4.2.1 目标函数

考虑暂态电压稳定性约束,目标函数可建模为:

$$\max f_1(x) = \text{ITSI}_j \quad (4-1)$$

$$\min f_2(x) = \lambda P_{\text{loss}} + \frac{1}{T_l} \left[\sum_{i=1}^m (C_{\text{SVC},i} Q_{\text{SVC},i} + F_{\text{SVC},i}) + \sum_{j=1}^n (C_{\text{STATCOM},j} Q_{\text{STATCOM},j} + F_{\text{STATCOM},j}) \right],$$

$$(m, n \in \mathfrak{R}_w)$$

(4-2)

式中: ITSI_j 为节点 j 的暂态电压轨迹灵敏度; $C_{\text{SVC},i}$ 和 $C_{\text{STATCOM},j}$ 分别为 SVC 和 STATCOM 无功补偿装置的单价; $F_{\text{SVC},i}$ 和 $F_{\text{STATCOM},j}$ 分别为 SVC 和 STATCOM 的补偿站的建造费用; $Q_{\text{SVC},i}$ 为 SVC 的补偿能力, $Q_{\text{STATCOM},j}$ 为 STATCOM 的补偿能力; P_{loss} 为系统损耗; T_l 为无功装置的工作年限; $\mathfrak{R}_w$ 为需要补偿的无功弱节点; 节点 m 和 n 为需被补偿的节点组, 分别被布置 SVC 和 STATCOM。

在面向暂态电压稳定性的无功优化目标函数中, 式(4-1)用于寻优系统的暂态电压支撑能力, 式(4-2)则用于压缩动态无功补偿设备的建设投入及运行过程中的网损开销。ITSI 为优化目标可通过式(3-11)求解。该目标函数模型具有以下两个优势: (1) 能够改善交直流混合电力系统在发生故障后的暂态电压恢复能力;

(2) 通过对薄弱节点进行补偿，可以避免薄弱节点的电压过度降低或升高，从而使薄弱节点的电压能够在较短的时间内迅速地回到稳定状态。

计及暂态电压稳定的优化控制变量为：

$$C = \{U_G; U_{SVC}; U_{STATCOM}; Q_{SVC}; Q_{STATCOM}; \gamma\} \quad (4-3)$$

式中：\$U_G\$ 为发电机机端电压；\$U_{SVC}\$ 表示 SVC 参考电压；\$U_{STATCOM}\$ 为 STATCOM 控制电压；\$\gamma\$ 为直流换流器的熄弧角参数。

状态变量为：

$$\begin{cases} X = \{X_{ac}; X_{dc}\} \\ X_{ac} = [U_{ac}; \theta; Q_g] \\ X_{dc} = [U_{dc}; \alpha; \mu; \varphi_{dc}] \end{cases} \quad (4-4)$$

式中：\$X_{ac}\$ 为交流侧状态变量；\$X_{dc}\$ 为直流侧状态变量；\$U_{ac}\$ 为交流侧电压幅值；\$\theta\$ 为交流侧电压相角；\$Q_g\$ 为发电机发出无功；\$U_{dc}\$ 为直流电压；\$\alpha\$ 为直流换流器的触发角；\$\mu\$ 为换向角；\$\varphi_{dc}\$ 为换流器功率因数。

4.2.2 约束条件

在优化过程中，除了要满足电力系统的功率均衡等性能要求外，还受到关键控制参数上下限的限制，从而对搜索空间进行一定的限制。

(1) 暂态功率平衡约束

交流电力系统中存在有若干关键约束，如节点功率的精确平衡、线路两端电压变化的界限、独立环路内相位差的规定和交流线路功率损耗限制等，具体约束可见式(4-5)：

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_{PQ}(i, j) P_{r, AC_j} + \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_I(i, j) P_{loss, AC_j} \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_{PQ}(i, j) Q_{r_j} + \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_I(i, j) Q_{loss_j} - B_i V_{AC_i}^2 \\ 2\tilde{P}_{loss, AC_j} W_{r, AC_j} \geq P_{r, AC_j}^2 + Q_{r_j}^2 \\ 2\tilde{Q}_{loss_j} W_{r, AC_j} \geq P_{r, AC_j}^2 + Q_{r_j}^2 \\ P_{loss, AC_j} = \frac{2R_{j,j}}{(1+\varepsilon)} \tilde{P}_{r, AC_j} + Q_{r_j}^2 \\ Q_{loss_j} = \frac{2X_{j,j}}{(1+\varepsilon)} \tilde{Q}_{loss_j} \\ V_{s_j}^2 - V_{r_j}^2 = 2R_{j,j} P_{r, AC_j} + 2X_{j,j} Q_{r_j} + R_{j,j} P_{loss, AC_j} + X_{j,j} Q_{loss_j} \\ \theta_{sr_j} = X_{j,j} P_{r, AC_j} - R_{j,j} Q_{r_j}, \mathbf{CXP}_{r, AC} = \mathbf{CRQ}_r \end{cases} \quad (4-5)$$

式中: P_{Di} 和 Q_{Gi} 分别表示第 i 个交流节点的有功和无功负荷; P_{r,AC_j} 和 Q_{r_j} 分别变送 hi 为第 j 条交流线路的受端有功和无功功率; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别表示节点 i 处发电机注入的有功和无功功率; B_i 为节点 i 的并联电纳参数; W_{r,AC_j} 表示第 j 条交流线路受端母线电压幅值平方; P_{loss,AC_j} 和 Q_{loss_j} 为过渡变量; ε 为任意小的非负常数; V_{s_j} 和 V_{r_j} 分别为第 j 条交流线路送端和受端的电压幅值; $X_{j,j}$ 和 $R_{j,j}$ 分别为第 j 条交流线路的电抗和电阻; θ_{sr_j} 为第 j 条交流为线路两端相角差; $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{R}$ 为交流线路电抗和电阻的向量形式; $\mathbf{P}_{r,AC}$ 和 $\mathbf{Q}_r$ 分别为交流线路受端有功功率和无功功率向量。其中关联矩阵 $\mathbf{M}_{PQ}$ 、 $\mathbf{M}_I$ 和 $\mathbf{C}$ 的元素满足:

$$\begin{aligned}
 M_{PQ}(i, j) &= \begin{cases} -1, \text{节点} i \text{是线路} j \text{的接收端} \\ 1, \text{节点} i \text{是线路} j \text{的输送端} \\ 0, \text{节点} i \text{与线路} j \text{不相连} \end{cases} \\
 M_I(i, j) &= \begin{cases} 1, \text{节点} i \text{是线路} j \text{的输送端} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\
 C(i, j) &= \begin{cases} 1, \text{线路} j \text{与独立回路} i \text{同向} \\ -1, \text{线路} j \text{与独立回路} i \text{反向} \\ 0, \text{线路} j \text{不属于独立回路} i \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4-6)$$

在电力系统中, 等式约束具体体现为潮流方程, 要求系统运行时保持动态平衡, 在无功功率管理阶段, 某一节点注入的无功功率持续增加时, 系统可能跨越稳定边界, 不稳定性现象可能迅速引发, 这会破坏原有基于潮流方程的平衡状态, 等式约束条件的适用性也同时遭到破坏。

(2) 直流耦合约束

柔性直流互联电网架构下, 交流与直流系统借助换流设备在耦合点完成联接, 换流器可提供或汲取有功与无功功率动态平衡与调节电力系统, 耦合节点等效电路如图 4-1 所示。

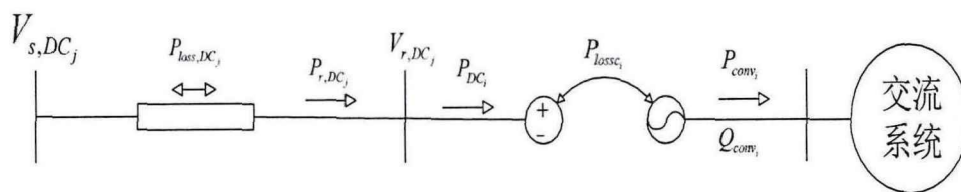


图 4-1 耦合节点等效电路

图 4-1 中, P_{loss,DC_j} 表示第 j 条柔性直流线路的有功功率损耗; V_{s,DC_j} 和 V_{r,DC_j} 分别对应第 j 条直流线路送端和受端的电压幅值; P_{r,DC_j} 表示第 j 条直流线路的

受端输入有功功率； R_{DC_j} 表示第 j 条直流线路电阻参数； P_{DC_j} 表示第 i 个交流母线关联的直流节点向换流器提供的有功功率； $P_{loss_{ci}}$ 表示该母线上换流器的有功损耗，与换流器传输功率成正比； P_{conv_i} 和 Q_{conv_i} 分别表示第 i 个交流母线上由换流器注入的有功和无功功率。由于 VSC 型换流器无需吸收无功功率，可通过调节交流侧无功注入或吸收量实现节点电压控制。由此可建立直流节点功率平衡约束方程如下：

$$P_{Gi} - P_{Di} + P_{conv_i} = \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_{PQ}(i, j) P_{r, AC_j} + \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_l(i, j) P_{loss, AC_j} \quad (4-7)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{conv_i} = \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_{PQ}(i, j) Q_{r_j} + \sum_{j=1}^{n_{AC}} M_l(i, j) Q_{loss_j} - B_{i,i} v V_i^2 \quad (4-8)$$

换流器的有功损耗与传输功率成正相关，因此可将 $P_{loss_{ci}}$ 可由 βP_{conv_i} 近似替代。基于此，耦合节点直流侧的功率平衡约束可建模为：

$$P_{DC_i} = (1 + \beta) P_{conv_i} \quad (4-9)$$

(3) 动态无功补偿装置及其他上下限约束

动态无功调节设备的无功输出受其额定容量区间限制，因此可将其注入电网的无功补偿功率 Q_{comp} 作为优化变量。对于安装动态无功补偿装置的节点 $i = 1, 2, \dots, n_{comp}$ ，其约束关系可表示为：

$$\underline{Q}_{comp, i} \leq Q_{comp} \leq \bar{Q}_{comp, i} \quad (4-10)$$

对交流节点 $i = 1, 2, \dots, n_{AC}$ ，有：

$$\underline{V}_{AC_i} \leq V_{AC_i} \leq \bar{V}_{AC_i} \quad (4-11)$$

$$\underline{P}_{G_i} \leq P_{G_i} \leq \bar{P}_{G_i} \quad (4-12)$$

$$\underline{Q}_{G_i} \leq Q_{G_i} \leq \bar{Q}_{G_i} \quad (4-13)$$

其他上下限约束还包括系统运行安全约束：确保各电力元件在规定的安全范围内运行，包括电压、电流、功率等状态变量的限制；动态无功补偿效果约束：衡量通过动态无功补偿等控制措施所实现的暂态电压稳定性提升，以保证系统在受到扰动后能够维持稳定运行。

4.3 基于鸚鵡寻优算法的多目标优化算法

鸚鵡优化算法(Parrot Optimization Algorithm, PO)是一种高效的元启发式算法，其灵感来源于家养小太阳鸚鵡的觅食、栖息、交流和惧生行为。这些行为通过

四种不同的数学模型进行模拟以辅助寻找最优解。传统启发式算法遵循探索和开发两个独立阶段，与之不同的是，在鸚鵡优化算法中，种群中的每个个体在每次迭代过程中会随机表现出上述四种行为中的一种。这种方式更贴合家养小太阳鸚鵡行为的随机性，能显著提高种群多样性。通过摒弃传统的探索-开发两阶段结构，鸚鵡优化算法在保持解的质量的同时，有效降低了陷入局部最优的风险。该算法的随机结构使其有别于传统算法，特别适用于避免陷入局部最优，并且适用于解决现实世界中的问题。

4.3.1 鸚鵡寻优算法流程

通常来讲，鸚鵡寻优算法具有觅食、停留、交流和对陌生人的恐惧等步骤，其优化流程如图 4-2 所示。首先随机产生数量为 N 的初始鸚鵡个体，计算每只鸚鵡个体不同的适应度，并且按照其不同的适应度进行排序并且更新。随机为每只鸚鵡选择为觅食、停留、交流和对陌生人的恐惧不同的探索方式，随机到觅食寻找策略的鸚鵡按照已探寻到食物的位置于该鸚鵡与主人的相对位置、整个鸚鵡种群的位置等，随后在迭代与优化的过程中，不断调整方向直至寻到其主人；随机到停留策略的鸚鵡，由于鸚鵡的特性，它的留守行为主要涉及突然飞行到主人身体的任何部位，在那里它保持静止一段时间；随机到交流策略的鸚鵡，鸚鵡本质上是群居动物，群体内部成员间存在高度互动性。其沟通机制包含两类典型模式：一类是向群体成员靠近的趋群行为，另一类则是主动远离群体的离群行为。在鸚鵡寻优算法中，两种行为的发生概率被设定为相等，且采用当前种群的质心位置作为群体中心。鸚鵡出于本能反应——对陌生个体存在天然警觉性。这类动物倾向于与熟悉对象保持空间关联性，并通过主动探索其所在区域来规避潜在威胁，这种行为特征使其能够动态追踪主人的活动轨迹以获取安全庇护。

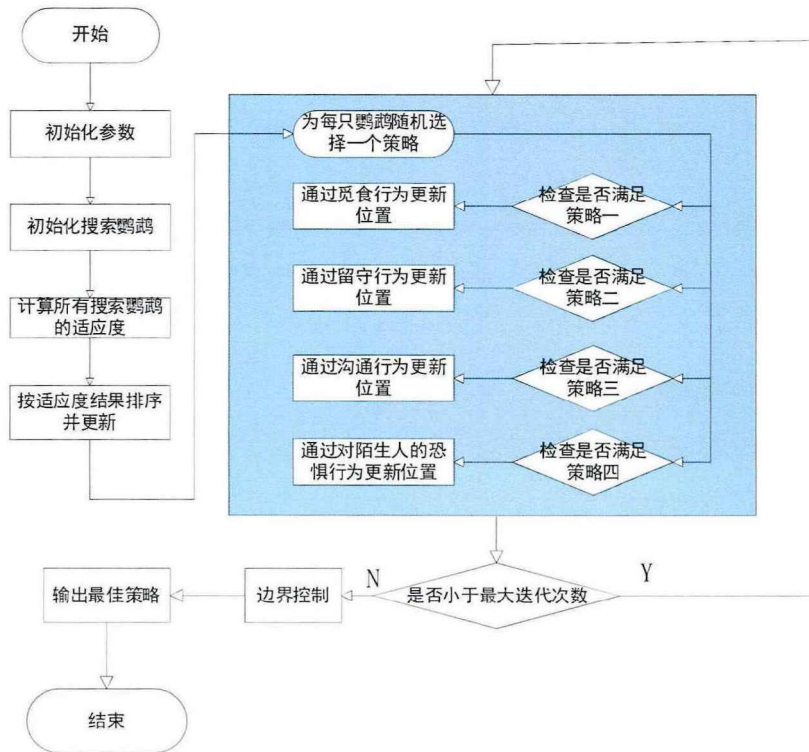


图 4-2 鸚鵡优化算法流程

具体寻优过程可表示如下：

(1) 群体初始化

根据群体规模 N ，最大迭代次数 Max_{iter} 以及搜索空间下边界 lb 、上边界 ub 可得出鸚鵡寻优算法的初始化公式：

$$X_i^0 = lb + \text{rand}(0,1) \cdot (ub - lb) \quad (4-14)$$

式中： $\text{rand}(0,1)$ 可在范围 $[0,1]$ 中随机生成一个数； X_i^0 为第 i 只鸚鵡的初始位置。

(2) 觅食行为

在鸚鵡优化算法中，其觅食策略首先通过感知环境中的食物分布特征，其次是结合饲养者定位信息进行空间推演。因此，个体位置更新过程可以用以下数学表达式表示：

$$X_i^{t+1} = (X_i^t - X_{\text{best}}) \cdot \text{Levy}(\text{dim}) + \text{rand}(0,1) \cdot \left(1 - \frac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)^{\frac{2t}{\text{Max}_{\text{iter}}}} \cdot X_{\text{mean}}^t \quad (4-15)$$

式中， X_i^t 为第 i 只鸚鵡在 t 时刻所处的位置； X_i^{t+1} 为第 i 只鸚鵡在 $t+1$ 时刻所处的位置； $\text{Levy}(D)$ 表示用 Levy 分布来模拟鸚鵡短距离频繁移动和偶尔长距离跳跃的飞行模式； X_{best} 表示当前搜索到的最佳位置； t 表示当前迭代次数； X_{mean}^t 为当前种群的平均位置，可通过式(4-16)求得：

$$X_{\text{mean}}^t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^t \quad (4-16)$$

Levy 分布可根据式(4-17)求得:

$$\begin{cases} Levy(dim) = \frac{\mu \cdot \sigma}{|v|^{\frac{1}{\gamma}}} \\ \mu \sim N(0, dim) \\ v \sim N(0, dim) \\ \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\gamma) \cdot \sin(\frac{\pi\gamma}{2})}{\Gamma(\frac{1+\gamma}{2}) \cdot \gamma \cdot 2^{\frac{1+\gamma}{2}}} \right)^{\frac{1}{\gamma+1}} \end{cases} \quad (4-17)$$

(3) 留守行为

鸚鵡是一种高度善于交际的生物, 它的停留行为主要涉及突然飞行到主人身体的任何部位, 在那里它保持静止一段时间。此过程可以表示为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + X_{best} \cdot Levy(dim) + rand(0,1) \cdot ones(1, dim) \quad (4-18)$$

式中: $ones(1, dim)$ 表示 $1 \times dim$ 维向量; $X_{best} \cdot Levy(dim)$ 表示基于 Levy 分布求得的最优解; $rand(0,1) \cdot ones(1, dim)$ 表示随机停滞机制即留守行为。

(4) 沟通行为

鸚鵡作为群居动物, 其群体之间高度互动性。该物种的群体通信机制向群体聚集的趋群行为和主动远离群体的离群行为。在 PO 模型中, 这两种行为的发生概率被设定为均等分布, 并通过当前群体的质心位置表征鸟群中心。该动态过程可用以下数学表达式表示:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} 0.2 \cdot rand(0,1) \cdot (1 - \frac{t}{Max_{iter}}) \cdot (X_i^t - X_{mean}^t), P \leq 0.5 \\ 0.2 \cdot rand(0,1) \cdot \exp(-\frac{t}{rand(0,1) \cdot Max_{iter}}), P > 0.5 \end{cases} \quad (4-19)$$

式中: $0.2 \cdot rand(0,1) \cdot (1 - \frac{t}{Max_{iter}}) \cdot (X_i^t - X_{mean}^t)$ 表示鸚鵡个体加入鸟群进行交流过程;

$0.2 \cdot rand(0,1) \cdot \exp(-\frac{t}{rand(0,1) \cdot Max_{iter}})$ 则表示鸚鵡个体交流后立刻飞离鸟群。

(5) 对陌生人恐惧的行为

作为一般规则, 鸟类表现出对陌生人的天生恐惧, 鸚鵡也不例外。它们与不熟悉的人保持距离并与主人一起寻求安全以寻找安全环境的行为, 可被模拟为:

$$\begin{aligned}
 X_i^{t+1} = & X_i^t + rand(0,1) \cdot \cos(0.5\pi \cdot \frac{t}{Max_{iter}}) \cdot (X_{best} - X_i^t) \\
 & - \cos(rand(0,1) \cdot \pi) \cdot (\frac{t}{Max_{iter}})^{\frac{2}{Max_{iter}}} \cdot (X_i^t - X_{best})
 \end{aligned} \tag{4-20}$$

式中： $rand(0,1) \cdot \cos(0.5\pi \cdot \frac{t}{Max_{iter}}) \cdot (X_{best} - X_i^t)$ 表示鸚鵡飞向主人的进程；
 $\cos(rand(0,1) \cdot \pi) \cdot (\frac{t}{Max_{iter}})^{\frac{2}{Max_{iter}}} \cdot (X_i^t - X_{best})$ 表示鸚鵡远离陌生人的进程。

4.3.2 基于鸚鵡寻优算法的动态无功规划方法

根据第 4.1 节的描述，在优化模型中将无功补偿装置的类型、安装位置及补偿容量作为决策变量。考虑到无功补偿设备的布设需满足地理空间的限制，且补偿容量受到实际运行条件的约束，因此本文提出了一种基于地理位置约束的无功补偿配置方案，并对补偿能力进行了定量分析。若对所有候选场址进行编号，并以 N_{bmax} 表示可选场址的最大数量，则其选址约束条件可表述如下：

$$\begin{cases}
 h_1(k) = k - N_{bmax} \leq 0 \\
 h_2(k) = 1 - k \leq 0 \\
 h_3(s) = s - S_m \leq 0 \\
 h_4(s) = -s \leq 0
 \end{cases} \tag{4-21}$$

式中： k 表示配置无功补偿装置的场址编号； s 表示安装无功补偿装置的容量； S_m 表示无功补偿装置的最大安装容量。

基于鸚鵡寻优算法的动态无功规划方法联合优化流程如图 4-3 所示。从图中可以看出，通过 PSD-BPA 构建 STATCOM、SVC 等无功补偿前、后的仿真模型，并综合考虑电网潮流约束及 STATCOM、SVC 等控制约束条件，获得电网电压波动的动态过程，并以此来确定相应的适应度。基于 MATLAB 仿真环境，通过 PO 算法，使 PSD-BPA 向 MATLAB 传递代价函数，并通过 MATLAB 向 PSD-BPA 传递决策变量，建立相应的代价函数，并通过 Windows 环境下的 DOS 语言，实现了 PSD-BPA 与 MATLAB 的互操作，解决了两者间的实时交互问题。

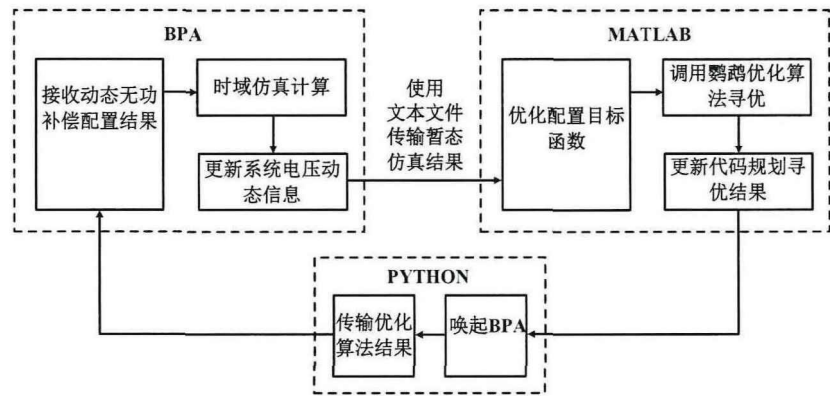


图 4-3 BPA-PYTHON-MATLAB 联合优化

4.4 算例分析

本节设置鸚鵡群体规模 $N=300$ 。最大迭代次数 $\text{Max}_{\text{iter}}=1000$ 以及Levy分布的 $\gamma=1.5$ 。下面针对我国某省电网中的JMGF区域进行具体说明。

针对我国某省JMGF区域SVC的优化配置问题进行求解，图4-4展示了改进前后PO算法的收敛特性对比。结果显示，改进型PO算法在寻优效率上较改进前明显提高，在TM变电站（控制TM 220kV母线）配置52MVar的SVC设备之后，其目标函数值达到-0.991。

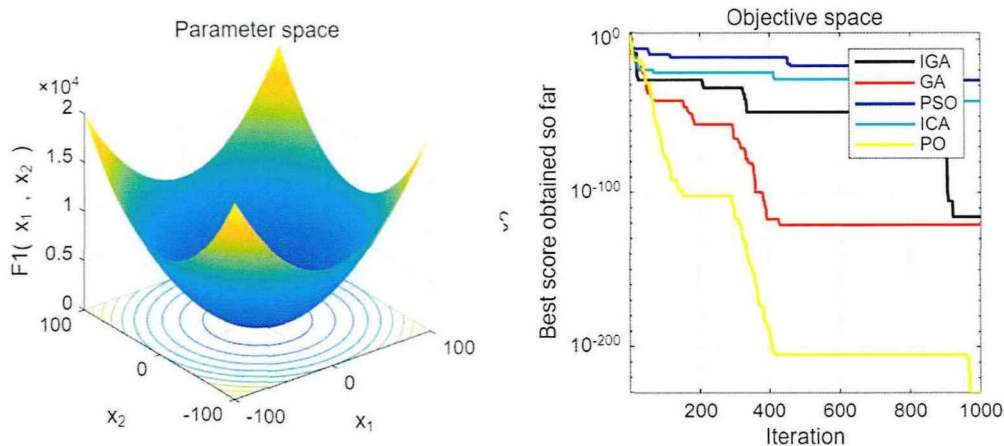


图4-4 对JMGF区域SVC配置的PO与其他算法收敛曲线对比

以我国某省JMGF区域为研究对象展开分析。基于PO算法对该区域SVC的最优配置方案进行优化求解，计算结果表明：在TANGMEI变电站配置52MVar的SVC装置时，系统获得的综合效益指数为-0.82。可以看出SVC与STATCOM的最优配置策略在物理实现层面具有等效性。从优化结果对比可见，在兼顾暂态电压稳定性提升与经济成本控制的双重目标下，SVC的配置方案展现出更好的优化性能。

基于上述分析，进一步得出了我国某省其他区域的动态无功补偿优化配置方案，具体结果如表4-1所示。

表4-1 广州电网动态无功补偿优化配置方案

区域	SVC 配置方案	配置SVC的适应度	STATCOM配置方案	配置STATCOM的适应度
JMGF	TANGMEI 出口接 51MVar	-0.990	TANGMEI出口接 170MVar	-0.940
MMDLXN	DENGGAO 出口接 61Mvar	-0.948	DENGGAO 出口接 133Mvar	-0.934
YDYCX	JIANYUN 出口接 77MVar	-0.981	JIANYUN 出口接 75MVar	-0.955
BJZC	QINGYUAB 出口接 71MVar	-0.980	QINGYUAB 出口接 191MVar	-0.941
SYWS	HUANGPUC 出口接 58MVar	-0.995	HUANGPUC 出口接 139MVar	-0.937
ZHJL	ZHUCHANG 出口接 53MVar	-0.998	ZHUCHANG 出口接 141MVar	-0.937
MMJL	BJ3 220kV 出口接 47MVar	-1.003	BJ3 220kV 出口接 154MVar	-0.938
FYSZ	LIANHE 出口接 60MVar	-0.976	LIANHE 出口接 35MVar	-0.981
PCZJ	HUANGGAN 出口接 64MVar	-0.946	HUANGGAN 出口接 99MVar	-0.940
KPMH	WUTONG 出口接 80MVar	-1.003	WUTONG 出口接 119MVar	-0.948
ZZ	QIANFAN 出口接 49MVar	-0.927	QIANFAN 出口接 35MVar	-0.951
RJJY	LAIAN 出口接 70MVar	-0.972	LAIAN 出口接 191MVar	-0.939

从表4-1可以看出，配置方案的适应度越高，其综合性能越好。通过对比分析优化结果发现，在兼顾暂态电压稳定性提升与经济成本控制的双重目标下，有些区域配置SVC装置能够提高效益，而部分区域则需采用STATCOM设备才能实现最佳效益。

为验证所提动态无功补偿配置策略的有效性，选取我国某省 JMGF 地区作为实验案例，重点针对系统电压不稳定性问题开展仿真分析。实验设置如下：在 TGW 至 TANGMEI 输电线路的 YGW 变电站区域模拟三相短路故障，故障发生时间为 0.2 秒，持续时间为 0.1 秒(即故障清除时间为 0.3 秒)。该故障场景的设置基于实际电网运行中可能出现的严重故障情况，能够有效检验动态无功补偿装置在暂态过程中的电压支撑能力。选取与配置区域相邻的彩虹变电站

(CAIHONG)母线电压波动情况展开分析，其地理位置如图 4-5 所示。

为了评估 STATCOM 的均处于最优安装位置，选择了其理想位置周围若干替代点进行比较，图 4-5 具体描述了故障后不同场景中彩虹母线正序电压的仿真结果，分别在 TANGMEI, TAISHAN 和 TONGGU 母线接入 169Mvar 容量 STATCOM 时。同时，对比了在系统中集成 169Mvar 容量 SVC 与 STATCOM 对系统产生的动态变化，如图 4-6 所示。

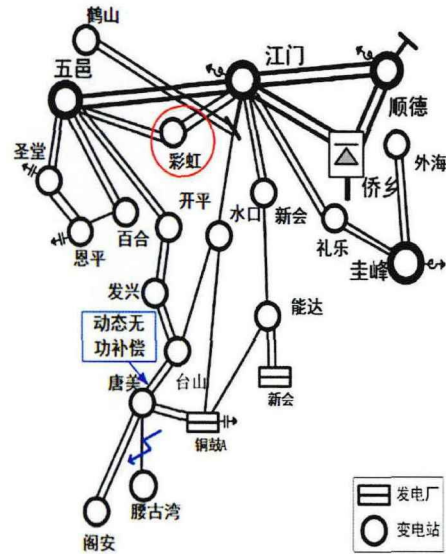


图 4-5 仿真地点地理位置图

通过图 4-6 可以看出，TANGMEI 位置安置容量为 169MVar 的 STATCOM 装置后，故障阶段电压回稳的速率提升显著，同时避免了过电压峰值的不良现象，尤其在后续故障阶段，常态电压回归的时长缩短且过程更为迅速，硬件环境保持相同前提下，SVC 策略对节点电压的恢复能力提升不显著，而引入 STATCOM 技术后，稳定状态达到的时间有效减少，暂态稳定性余量也得到显著增加。

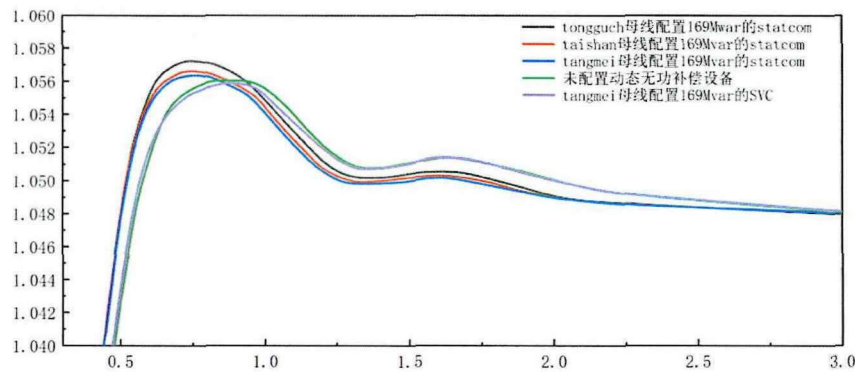


图4-6 不同地点配置STATCOM暂态电压对比

为评估STATCOM装置容量对系统性能的提升，在唐美220kV变电站出口位置分别部署了100MVar、169MVar和238MVar三组不同容量的STATCOM设备。

通过分析不同配置方案下彩虹母线电压的响应特性，可观察到电压波动幅度随补偿容量变化的差异性，具体对比结果如图4-7所示。

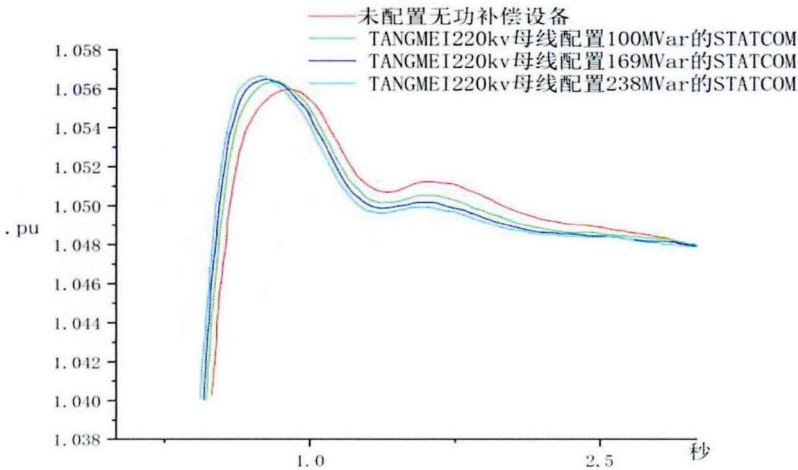


图4-7 配置不同容量STATCOM前后CAIHONG处暂态电压对比

图4-7的仿真结果表明，当STATCOM容量从100MVar提升至169MVar时，母线电压质量的优化效果明显改善。但是随着补偿容量进一步扩大至238MVar，电压改善的相对增幅逐渐趋缓，且设备成本随容量增长呈指数级上升。表4-2的量化数据显示，大容量STATCOM在成本-收益比方面的表现未达预期。

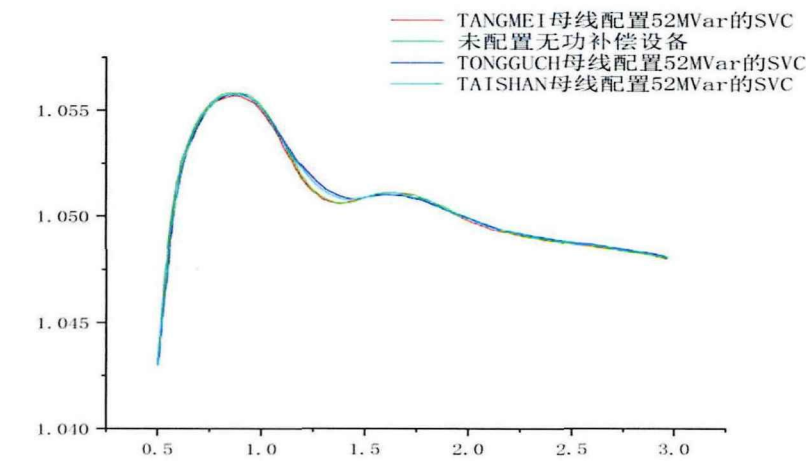
表4-2 STATCOM不同容量配置的经济成本

STATCOM配置容量(MVar)	经济成本(元)
100	125836.2
169	179692.4
238	215192.1

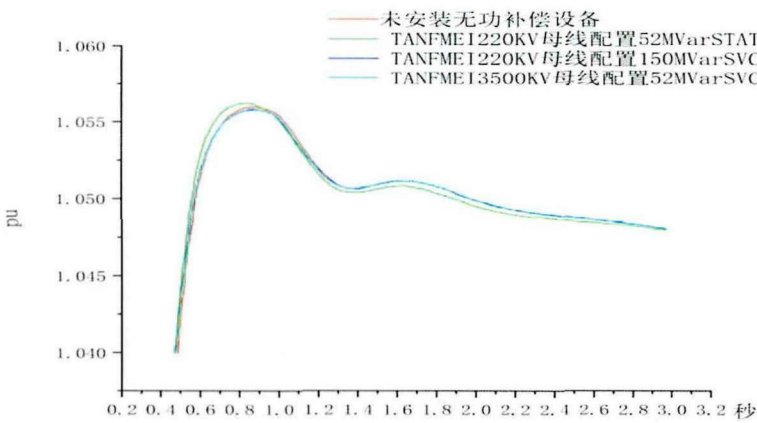
为验证SVC配置策略的优化效果，本研究通过仿真实验对装置选址与容量选择进行系统性分析。在选址优化验证中，设置以下四种场景进行对比：无SVC配置场景，以及在TANGMEI、TAISHAN、TONGGU母线分别接入52Mvar的SVC的三种配置场景。图4-8(a)展示了不同配置方案下母线电压的动态响应曲线，揭示了最优接入位置对电压稳定性的提升效果。

在容量优化验证中，于TANGMEI母线分别设置52Mvar、169Mvar及350Mvar三种SVC容量配置方案进行仿真测试。图4-8(b)展示了不同容量配置下的电压恢复特性曲线，同时增设52Mvar的STATCOM的对比曲线以评估装置类型的影响。实验结果表明，SVC容量与电压支撑效果呈现非线性关系，且相同容量下STATCOM表现出更优的动态响应特性，验证了装置选型对系统暂态电

压稳定的重要性。



(a) 配置地点不同



(b) 配置容量不同

图4-8 配置不同无功补偿设备暂态电压对比

通过实例计算与仿真分析可见，在相同容量配置下，系统需求偏高时，STATCOM的整体性能通常更优，容量需求较低时，SVC的性能可能更为突出，探讨SVC与STATCOM最佳配置方案时，多数场景中SVC的表现更优越，实现相同功能时，SVC通常能以更低经济成本达到目标，其在成本效益上的优势显著。这一结论为动态无功补偿设备的选型和优化配置提供了重要的参考依据。

4.5 本章小结

本章基于前述章节的选址规划研究，建立了考虑暂态电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型，以提升电压暂态稳定能力和降低投资为目标，通过将 MATLAB 的数据处理能力与 PSD-BPA 精确的计算模拟相结合，构建了 STATCOM 和 SVC 无功补偿前后的模型，接着结合鸚鵡寻优算法的对 SVC 和

STATCOM 的最优配置容量进行了求解。最后，以广东省内某电力网络为仿真实例，给出了相应的动态无功补偿优化配置结果。通过仿真验证了所提求解算法可寻优至最优解，算法超参数设置合理。

第5章 结论与展望

目前关于动态无功补偿优化配置的研究大多聚焦于交流电网场景,较少涉及直流输电系统接入后的影响。实际运行中,电网在遭受大扰动时往往由于局部节点电压剧烈下降而引发连锁失稳事故。动态无功补偿技术凭借其快速响应能力,能够有效支持交直流系统电压调节,优化其配置有助于提升整体系统的运行稳定性。本文针对交直流混联系统的动态无功补偿优化配置问题,提出了一种多阶段优化策略,区别于传统的线性化建模方法,主要研究工作包括:

(1) 基于并联型 FACTS 装置的运行机理,分析其在提升电压稳定性和改善暂态运行特性中的作用,重点对 STATCOM 和 SVC 设备进行了性能对比,明确了其对系统关键运行参数的影响,为优化模型的构建提供理论支持。

(2) 围绕交直流混联系统的电压稳定问题,结合直流系统运行特性和交直流功率耦合关系,构建了基于电压—无功灵敏度的系统稳定性分析模型,并提出基于阻抗模裕度的电网分区方法,实现了薄弱区域的初步识别和补偿配置研究。以改进 IEEE39 交直流电网为例,借助 PSD-BPA 仿真验证了该方法的可行性。

(3) 在初步确定补偿区域基础上,针对识别出的故障场景,结合动态补偿装置运行特性,构建包含电压改善效能与工程经济性目标的多目标优化模型,并基于轨迹灵敏度分析明确目标关联性。为求解该模型,引入鸚鵡优化算法(PO),增强算法收敛性与多目标处理能力,并在 PSD-BPA 平台下开展建模与仿真,验证了所建模型与算法的有效性。

本文提出的多阶段动态无功配置方法,综合考虑了电网拓扑结构、交直流系统的准稳态行为及暂态响应过程,逐步优化获得最优补偿策略。为贴近工程实践,模型中引入了成本因素约束,经济参数参考国外文献的平均估值,实际应用中仍需结合本地成本数据进行适配优化。此外,当前优化模型尚未纳入动态补偿设备的控制参数差异对系统行为的影响,后续研究可进一步细化设备模型以提升模拟精度。同时,尽管本研究初步探索了鸚鵡优化算法在该类问题中的应用,但在处理复杂多目标场景下时,由于鸚鵡算法计算复杂度较高,在运行效率上具备不小的挑战。后续考虑引入自适应切换因子,通过控制鸚鵡位置更新的概率提高运行效率。其次,在迭代过程中,鸚鵡个体的快速同化可能会导致种群聚集在当前最优解附近,从而导致陷入局部最优解,后期可通过引入变异算子对个体进行干扰,增加种群多样性,尽可能避免陷入局部最优解的问题,增强的全局搜索能力。

参考文献

- [1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 周偶然. 电力大动脉纵贯神州—输电网络实现从 6475 千米到 242 晚千米跨越式发展[N]. 中国电力报, 2024-09-24(1).
- [3] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (01): 1-11.
- [4] 陈名, 饶宏, 李立涅, 等. 南澳柔性直流输电系统主接线分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 1-5.
- [5] 能源圈. 将创 12 项世界第一, 张北柔性直流电网工程开工[J]. 新能源经贸观察, 2018, (03): 90.
- [6] 昆柳龙直流工程[J]. 电力工程技术, 2021, 40(01): 2.
- [7] 混合级联特高压直流输电技术[J]. 电力工程技术, 2020, 39(06): 3.
- [8] LIPS H P. Aspects of multiple infeed of HVDC inverter station into a common AC system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1973, V92(2): 135-141.
- [9] 王昊. 直流多馈入系统恢复全过程的优化决策研究[D]. 山东大学, 2022.
- [10] 朱元振. 大规模交直流混联电网高风险连锁故障筛选研究[D]. 山东大学, 2022.
- [11] Hingorani N G, Narain G. Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, V76(04): 481-482.
- [12] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述—模型, 目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, (06): 1-7.
- [13] Taylor C W. Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse[M]. CIGRE, 1995: 50-80.
- [14] 刘晓明, 谭祖贻, 袁振华, 等. 柔性直流接入海上风电并网选址综合优化[J]. 发电技术, 2022, 43(06): 892-900.
- [15] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.
- [16] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7·30”, “7·31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174
- [17] 徐波. 基于 SOP 选址定容的柔性互联配电网调度方法研究[D]. 贵州大学, 2024.
- [18] 董芷函. 面向特高压混合级联直流系统安全稳定提升的协调控制与规划研究[D]. 浙江大学, 2023.

- [19] 戴林东. 静止无功补偿装置稳压控制及选址定容研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [20] 严俊, 陈中, 朱政光, 等. 基于解耦安全域的多馈入交直流系统无功补偿装置落点研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(02): 80-90.
- [21] 张靖, 程时杰, 文劲宇, 等. 通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007(34): 7-11.
- [22] Bbasaputra P, Ongsakul W. Optimal placement of multi-type FACTS devices by hybrid TS/SA approach[J]. International Journal of Energy Technology and Policy, 2003, 3 (4): 375-378.
- [23] Saravanan M, Slochanal R, Venkatesh P, et al. Application of PSO technique for optimal location of FACTS devices considering system loadability and cost of installation[C]. 2005 International Power Engineering Conference, Singapore, 2005, pp. 716-721.
- [24] Kazemi A, Parizad A, Baghaeesh R. On the use of harmony search algorithm in optimal placement of facts devices to improve power system security[C]. IEEE EUROCON 2009, Russia, 2009, pp. 570-576.
- [25] Rahimzaeh S, Tavakoli M, Vikia H. Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment: achieving both optimal number and location[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 349-362.
- [26] 崔琪. 多馈入直流系统的无功配置优化研究[D]. 北京: 华北电力大学 2014.
- [27] Aragüés M, Egea A, Arellano S, etc. Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms[J]. Electric power systems research, 2014, 112 48-55.
- [28] Kılıç U, Ayan K, Arifoğlu U. Optimizing reactive power flow of HVDC systems using genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55 1-12.
- [29] Montilla M, Santos D, Arnaltes S, etc. Optimal reactive power allocation in an offshore wind farms with LCC-HVdc link connection[J]. Renewable energy, 2012, 40 (1): 157-166.
- [30] Xin H, Gan D, Huang Z, etc. Applications of stability-constrained optimal power flow in the East China system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 3(25): 1423-1433.
- [31] Xin H, Can D, Li Y, etc. Transient stability preventive control and optimization via power system stability region analysis[C]. 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, 2006, pp. 428-435.
- [32] Gao S, Wang H, Wang C, et al. Reactive power optimization of low voltage

- distribution network based on improved particle swarm optimization[C]. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, 2017, pp. 1-5.
- [33] Haniyeh Marefatjou, Iman Soltani. Optimal placement of STATCOM to voltage stability improvement and reduce power losses by using QPSO algorithm[J]. Journal of Science and Engineering, 2013,2(2):105-119.
- [34] 李晖, 汪莹, 罗天, 等. 基于电气介数的电网故障无功规划选址与定容[J]. 控制与决策, 2019, 8(10): 1609-1615.
- [35] 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017(22): 144-148.
- [36] 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(11): 24-32.
- [37] 张涛, 徐雪琴, 史苏怡, 等. 基于改进多种群量子粒子群算法的 STATCOM 选址及容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1): 75-81.
- [38] 黄弘扬, 杨汾艳, 徐政, 等. 基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 88-94.
- [39] 李勇, 倪晓军. 多馈入直流输电系统短路比评估方法综述[J]. 浙江电力, 2018, 37(09): 1-7.
- [40] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [41] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(03): 633-647.
- [42] 陈修宇, 韩民晓, 刘崇茹, 等. 含整流站接入的多馈入直流系统强度评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(01): 101-107.
- [43] 章枫. 基于广义短路比的交直流电力系统电压稳定性分析[D]. 浙江大学, 2019.
- [44] 黄锐, 兰洲, 辛焕海, 等. 基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(03): 147-157.
- [45] 郭小江, 郭剑波, 王成山. 考虑直流输电系统外特性影响的多直流馈入短路比实用计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(09): 2143-2151.
- [46] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003(11): 18-21.
- [47] 苑宾, 许建中, 赵成勇, 等. 利用虚拟电阻提高接入弱交流电网的 MMC 小信号稳定性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(15): 3794-3802.
- [48] 刘青. 多馈入交直流系统的改进短路比指标及其应用研究[D]. 华中科技大学, 2016.

- [49] 董怡滢, 黄莹, 王国腾, 等. 计及动态负荷特性的多直流馈入系统暂态电压强度分析方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 1-9[2025-06-24].
- [50] Pai A. Energy function analysis for power system stability[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [51] 周瑀涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3794-3811.
- [52] 罗天, 汪可友, 李国杰, 等. 基于改进多馈入有效短路比的受端交直流混联电网 STATCOM 定容方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(02): 133-140.
- [53] 黎萌, 林章岁, 林毅, 等. 含大规模新能源的电力系统 STATCOM 选址及容量优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(05): 139-150.
- [54] 马骞, 邓卓明, 吴云亮, 等. 受端电网 STATCOM 布点及容量规划的凸松弛方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(06): 64-70.
- [55] 李一鸣. 面向交直流混联电网电压控制的无功补偿协调策略研究[D]. 东南大学, 2021.
- [56] 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.
- [57] L.J. Cai, I. Erlich, G. Stamtsis. Optimal choice and allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms[A]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition[C]. IEEE, 2004, V1: 201-207.
- [58] 刘光晔, 施海亮, 杨以涵. 非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 50-56.
- [59] 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.