

华北电力大学

硕士学位论文

交直流电网动态无功补偿优化配置研究

Research on Optimal Allocation of Dynamic Reactive
Compensation in AC/DC System

李昕蔚

2019年3月

国内图书分类号：TM74

国际图书分类号：621.3

学校代码：10079

密级：公开

硕士学位论文

交直流电网动态无功补偿优化配置研究

硕士研究生： 李欣蔚
导 师： 刘崇茹教授
申 请 学 位： 工学硕士
学 科： 电气工程
专 业： 电力系统及其自动化
所 在 学 院： 电气与电子工程学院
答 辩 日 期： 2019 年 3 月
授 予 学 位 单 位： 华北电力大学

Classified Index: TM74

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

Research on Optimal Allocation of Dynamic Reactive Compensation in AC/DC System

Candidate:	Li Xinwei
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electric Power System and its Automation
School:	School of Electrical & Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2019
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

目前对动态无功补偿优化配置问题的研究,都是在交流电网的背景下进行具体分析的,没有考虑直流输电工程加入的影响因素。同时大多数优化配置方法是将系统状态线性化后,着眼于某一角度进行优化,或者只是对于安装地点进行了优化,优化方法存在特定性及片面性。本文围绕动态无功补偿设备提高系统在大扰动下的稳定性进行研究分析,结合电网拓扑结构、交直流系统的准稳态特性以及系统运行的暂态信息,提出了一种考虑交直流电网特性的多阶段动态无功优化配置方法。第一阶段通过评估节点电压稳定的关联度实现了无功补偿配置分区;第二阶段建立了节点电压不稳定的严重度,筛选各分区导致电压降落的严重故障集;第三阶段在各分区严重故障集的基础上,建立了无功补偿优化模型并进行优化求解。分阶段优化的方式,将动态无功补偿问题分解为三个子问题,简化求解过程的同时获得较好的动态无功补偿优化配置方案。

通过对交直流系统进行无功电压灵敏度分析,结合直流系统的运行特性,得到评估节点电压稳定的关联度,提出了考虑直流功率馈入影响的无功补偿配置分区方法。之后以提高系统受扰动后的电压稳定性为向导,在考虑直流换相失败的基础上,分析了交直流电网在大扰动下的电压变化情况。利用暂态电压越限积分评估电压波动情况,来描述节点电压不稳定严重度,提出了筛选导致电压降落的严重故障集的方法。在此基础上,建立了考虑改善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。并进一步提出将结合配置经济成本因素的电压轨迹灵敏度积分作为优化配置的目标,在对帝国竞争算法(ICA)进行改进后,提出了一种适用于该优化配置问题的基于改进 ICA 算法的优化求解方法。通过计算与仿真验证了优化配置方法的有效性,可以为在交直流电网中进行动态无功补偿设备的规划配置提供参考。

关键词: 动态无功补偿; 交直流电网; 灵敏度分析; 严重故障分析; 改进电压轨迹灵敏度积分; 改进 ICA 算法

Abstract

At present, researches on optimal allocation of dynamic reactive power compensation are all carried out under the background of AC power network, but the influence of HVDC transmission project joining was not considered. And most of the optimization methods obtain results from a certain perspective after linearization, or the target were just to optimize the installation site. Those methods are specific and one-sided. This paper focuses on the dynamic reactive power compensation to improve the stability of AC-DC system under large disturbance. Combined with the topological structure of the power network, the quasi-steady state characteristics of the AC-DC system and the transient information of the system, a multi-stage dynamic reactive power optimization method considering the characteristics of AC-DC power network is proposed in this paper. The Multi-stage method includes the assessment of correlation degree of node voltage stability, the severity of node voltage instability and the improved sensitivity index. Each stage is conducive to the analysis of the next stage, to finally obtain a better dynamic reactive power compensation configuration scheme.

Based on the voltage-reactive power sensitivity analysis of AC-DC system and the HVDC operation characteristics, the correlation degree of node voltage stability is evaluated. And a partition method for reactive power compensation configuration considering the influence of DC power injects is proposed. Then, taking the improvement of the system voltage stability under large disturbance as the guide, and considering the failure of HVDC system commutation, the voltage variation in AC-DC power network is analyzed. The trajectory violation integral is used to describe the severity of node voltage instability. And a method to screen the serious fault sets which lead to voltage drop is presented. On those basics, a multi-objective optimization model for improving voltage stability and reducing economic cost is established. Furthermore, the trajectory sensitivity index of voltage combined with the economic cost factor is proposed as the objective of the optimization problem. After improving the empire competition algorithm (ICA), an improved ICA algorithm-based optimization method is proposed for the optimization problem. The effectiveness of the optimization method is verified by calculation and simulation, which can provide a reference for the planning of dynamic reactive power compensation in AC-DC power network.

Keywords: VAR compensation; AC/DC system; sensitivity analysis; critical failure analysis; improved trajectory sensitivity index of voltage; Improved ICA algorithm

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 国内外研究动态.....	2
1.3 本文主要工作.....	4
第 2 章 并联型 FACTS 设备提高电网稳定运行有效性分析.....	6
2.1 并联补偿器基本原理.....	6
2.2 SVC 与 STATCOM 功能性比较分析	8
2.3 并联补偿技术稳定电网运行的有效性.....	10
2.4 本章小结.....	11
第 3 章 考虑节点电压稳定关联度的交直流电网分区.....	12
3.1 灵敏度分析理论.....	12
3.2 含直流馈入的电网分析.....	13
3.2.1 节点电气距离.....	15
3.2.2 交直流电网分区算法.....	15
3.3 实例验证.....	16
3.4 本章小结.....	20
第 4 章 交直流电网电压失稳关键事故集筛选.....	21
4.1 暂态电压越限衡量指标.....	21
4.2 采用相关性理论形成严重故障集.....	22
4.3 实例验证.....	23
4.3.1 实例计算.....	24
4.3.2 仿真验证.....	26
4.4 本章小结.....	28
第 5 章 动态无功补偿多目标优化配置方法.....	29
5.1 多目标数学优化模型的建立.....	29
5.1.1 动态无功补偿控制器模型.....	30
5.1.2 多目标优化模型的确定.....	33
5.1.3 基于改进灵敏度指标的建模.....	36

5.2 基于改进帝国竞争算法的优化求解.....	36
5.2.1 帝国竞争算法流程.....	37
5.2.2 帝国竞争算法的改进.....	39
5.2.3 基于改进帝国竞争的优化配置计算方法.....	41
5.2.4 动态无功补偿配置方法.....	43
5.3 实例验证.....	43
5.3.1 实例计算.....	43
5.3.2 仿真验证.....	45
5.4 本章小结.....	49
第 6 章 总结与展望.....	50
参考文献.....	52
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	56
攻读硕士学位期间参加的科研工作.....	57
致 谢.....	58

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及选题意义

近年来, 为了加强电网建设, 伴随着“国家网络化”和“西电东送”电力输送格局的建立, 高压直流输电工程具有经济灵活, 可控性强的特点, 在电网中发挥着越来越重要的作用^[1]。自 20 世纪 80 年代以来, 中国一直在建设直流输电工程, 其在特高压直流工程方面的经验也越来越丰富^[2]。目前, 已有 20 个特高压直流项目运营和在建。其中 2010 年前建设投运的贵州—广东双回直流工程是西电东送的主要代表之一; 2016 年开始的扎鲁特—青岛±800 kV 特高压直流工程可以将内蒙古和东北地区的多余电力输送到华北负荷中心, 是促进清洁发展的绿色工程; 2017 年, 锡盟—泰州±800 千伏特高压直流工程竣工投产, 促进了我国内蒙古地区的清洁电力向华东负荷中心的输送, 它也是世界上高压直流输电领域的一个重要里程碑。

随着电网结构的发展, 线路之间的连接变得越来越紧密。比如, 将交流输电线路并联到仅由直流输电线路连接的两个非同步电网之中, 形成了 AC-DC 并联; 对高压直流输电线路的需求, 形成了多端直流送出系统; 更多的直流输电线路与交流系统连接, 形成了多馈入直流系统^[3]。直流输电技术的应用缓解了能源与电能消耗分布的矛盾, 但是电网联接形式的复杂性也给电力系统带来了新的稳定运行问题。

当电网遭受大扰动后, 首要任务是保证电网的暂态稳定性, 其中多数事故是由于部分节点电压大幅下降, 进而导致无法控制的连锁事故^[4, 5], 因此电压稳定性问题一直是专家学者关注的焦点。在交直流电网中, 大多数受端系统内部主要电厂已无法满足电力需求, 外部电力输入对受端系统影响较大, 导致有直流系统连接的交流系统电压稳定性变得较弱^[6]。暂态情况下, 提高局部电压稳定性的有效手段是进行就地补偿, 适当的无功功率补偿能够较好的维持电压稳定形态^[7]。到目前为止, 在静态无功补偿方面已经开展了大量研究工作^[8], 但是传统静态无功补偿装置无法跟踪无功功率变化, 难以适应现代电力系统的发展, 而柔性交流输电系统 (FACTS) 技术的不断进步为进行快速动态无功功率补偿提供了良好的技术支持。

美国电力科学研究院的著名电力专家 Hingorani 提出了 FACTS 理论之后^[9], 得到了各国电力行业的重视, 促进了 FACTS 技术的发展。1997 年, IEEE 在 PES 冬季会议上定义了 FACTS, 中文翻译为灵活交流输电系统, 即为配备电力电子

控制器来增强可控性同时提升电力输送能力的交流输电系统。FACTS 控制器最主要的特点是能够在不改变网络结构的情况下,利用电力电子器件和电力系统传统控制元件,影响潮流分布的电压、线路阻抗和功角三个主要电气参数,来调整电网输送功率的能力。FACTS 具有能够在较大范围内控制潮流,使其控制区域内可传输的功率提升,控制电压稳定,抑制系统振荡等能力^[10]。当前应用和研究广泛的,能够有效给予无功补偿的 FACTS 元件^[11],主要包括静止型动态无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等并联型或综合型补偿装置,可控硅控串联电容补偿器(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)等串联型补偿装置在有效提高线路传输容量的同时,也可以快速提供一定的无功功率。上述装置凭借电力电子技术的快速调节特性,可以迅速改变发出的等效无功功率,为电力系统提供动态无功支撑,将节点电压补偿到稳定运行的范围内,进而实现动态电压支撑。通过使用适当的 FACTS 控制器,能够充分发挥当前电网的潜力,而无需对现有设备进行重大改变。

虽然 FACTS 技术在电力系统的应用前景比较乐观,但是在全世界范围来看目前只是应用于个别实际工程,要想大规模应用 FACTS 技术,还需从全局角度对 FACTS 技术加入大型电网系统进行深入研究。在控制电压、提高暂态稳定性方面,利用 FACTS 技术对交直流电网进行动态无功补偿优化能够改善电力系统电压稳定问题,对提高系统暂态稳定性具有重要意义。

1.2 国内外研究动态

暂态电压失稳是指系统受到大扰动后,短期内电压不能恢复甚至发生崩溃的现象,一般发生在 1~10 秒之间。对于交直流混联系统,大多数发生暂态电压失稳的原因可以归结为两个方面^[12]:一是由于故障后负荷侧对无功功率的需求急剧增大,主要是电动机堵转造成的,电网中供需不平衡,导致负荷侧电压跌落;另一方面是由于直流输电系统换流器的无功特性和控制手段,如紧急功率支援等恢复功率的控制方式,会使得换流器吸收较大的无功功率,如果无功功率补偿不及时,很可能会导致暂态电压失稳。

在暂态电压稳定分析方法方面,有基于数值积分的时域仿真法、人工智能法、暂态能量函数法和来源于等面积法则^[13]的动态最大功率曲线法。其中时域仿真法能够实时监测系统的动态变化,可以包含元件的详细数学模型同时进行系统故障及控制操作,可得到的信息丰富,分析结果较为可靠,但是对于大型系统仿真工作量也较大。文献[14]利用隐式梯形法提取特征值并进行特征向量分析,应用动态特征分析各电压变量的失稳情况,进一步开拓了时域仿真法的应用范围;基

于李亚普诺夫稳定性理论的暂态能量函数法多数用于暂态功角稳定性分析,有学者通过构造与电压稳定裕度相关的标量函数,来分析暂态电压稳定性问题^[15];人工智能法的兴起是由于计算机技术的快速发展,该方法是在对电力系统实时分析和监控的过程中,通过样本学习进行分析计算。文献[16]将暂态能量函数法中的能量裕度指标作为电力系统暂态故障分类的特征量,再利用改进的神经网络等智能算法对暂态稳定故障进行分类,说明了将故障后系统的能量裕度作为特征量之一后,提高了故障筛选结果的准确性。而动态最大功率曲线法需要将整个大系统动态地等效修正能够反映功率曲线参数的两机系统,对于复杂系统应用性不强。

对电网进行动态无功补偿时,一般需要考虑动态无功补偿装置安装地点和补偿容量这两个方面的问题。在优化无功补偿装置选址方面,很多研究工作者已经进行了大量的分析。目前从静态电压稳定的角度进行分析的研究已经较为成熟,比如基于模态分析的先导节点法^[17,18],灵敏度法^[19],参与因子法^[20]等。但是由于大型电力电子元件的存在,这些动态元件和非线性环节对电压稳定都有较大的影响,为了使无功补偿设备更好的服务于系统稳定性,静态分析的方法已经不能满足需要,必须在考虑直流系统作用的前提下,建立恰当的数学模型,采用合适的动态方法进行研究。也有部分学者基于暂态电压稳定的分析方法对动态无功补偿问题展开了研究。文献[21]提出利用轨迹灵敏度指标作为动态无功补偿装置的选址指标,以经济花销最小为优化配置目标,确定了 SVC 和 STATCOM 的选址方案,并对比了 SVC 和 STATCOM 改善电压不稳定问题的效果。但文献中的优化方案仅提出在一处进行无功补偿,对于实际规模很大的电力系统,还需在此基础上进行改进提出多补偿点方案。

在动态无功补偿容量优化方面,文献[22]首先提出利用电压越限积分作为故障严重性评价指标,对 STATCOM 配置地点进行选择,进而结合短路比作为待选补偿点容量优化的上限约束条件,以投资消费最小作为优化目标,利用均值方差映射优化算法(MVMO)求出最优的 STATCOM 容量配置。文献[23]将故障切除后电压恢复到最大值的时间与最大电压值的乘积,以及节点间故障切除后电压恢复时间差值作为无功补偿装置选址的影响因素,确定动态无功补偿位置,但是其故障的选择是依靠关键节点和经验来确定的;再利用电压对功率的灵敏度构建电压约束条件和无功补偿量约束,以无功补偿最小为目标确定补偿量,无功补偿方案验证选取的是 SVC 装置。而智能算法在求解复杂的工程优化问题方面应用也较为广泛,文献[24]结合粒子群算法和引力搜索算法,以最大程度提高系统在故障下的电压稳定情况为目标,优化配置了 SVC 的位置。目前在该问题方面的研究,或者是着眼于某一角度进行优化,或者是针对某一无功补偿装置进行优化配置,或者只是对于安装地点进行了优化,相应的优化方法存在一定的特定性及片面性。

由于当前的动态无功优化配置方法是在交流电网的背景下进行具体分析的,没有考虑直流输电工程加入的影响因素。而且大多是将系统状态进行线性化后,从某一特定的角度进行分析,比如或是从静态稳定角度或是从暂态稳定角度,分析角度不同会导致配置方案的差别较大。考虑到各种分析侧重点之间并不对立,如果能利用不同分析角度的优势,对动态无功优化配置问题进行全面分析,将减少计算量并提高配置方案的全面性。

1.3 本文主要工作

本文围绕动态无功补偿设备提高系统稳定性进行研究分析,主要针对电压稳定性,提出了一种考虑交直流电网特性的多阶段动态无功优化配置方法。第一阶段通过评估节点电压稳定的关联度(以下简称关联度),实现了无功补偿配置分区;第二阶段建立了节点电压不稳定的严重度(以下简称严重度),筛选各分区导致电压降落的严重故障集;第三阶段在各分区严重故障集的基础上,建立了无功补偿优化模型并进行优化求解。分阶段优化的方式,将动态无功补偿问题分解为三个子问题,简化求解过程的同时获得较好的动态无功补偿优化配置方案。各章节主要内容如下:

第2章,以并联型 FACTS 设备工作原理为基础,具体说明了其接入系统后,对提高系统电压稳定性的作用,以及在暂态情况下对系统整体稳定性的改善,同时对比分析了 STATCOM 和 SVC 的工作性能,并具体列出了动态无功补偿对一些电网运行状态指标的影响,为后面章节的优化建模应用提供理论基础。

第3章,通过分析交直流电网电压稳定问题,结合直流系统的运行特性和交直流系统的有功无功特性,建立了基于电压无功灵敏度的交直流电网电压稳定分析模型,来评估节点电压稳定的关联度。关联度指标可反映电网拓扑结构和有功无功特性对节点电压稳定的影响。根据关联度指标,提出基于密度聚类的交直流电网分区方法,完成了动态无功补偿优化配置问题的初步配置研究,验证了研究方法的有效性和可靠性。

第4章,以利用动态无功补偿设备提高系统受扰动后的电压稳定性为导向,在考虑换相失败的基础上,分析了交直流电网在大扰动下的电压变化情况,利用暂态电压越限积分评估电压波动情况,用来描述节点电压不稳定严重度,可识别影响电网稳定性的故障形态以及自身暂态电压较不稳定的节点。根据所建立的严重度指标,提出了筛选导致电压降落的严重故障集的方法。通过计算与仿真验证了分析方法的正确性。

第5章,针对每个分区及对应的严重故障集,提出了改进灵敏度指标,其可描述无功注入量对全系统暂态电压水平的实际提升效果,进而建立了考虑系统电

压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型。改进帝国竞争算法以适应动态无功补偿优化问题，并提出了基于改进帝国竞争算法的优化求解方法，计算与仿真验证了模型和算法的有效性。

第 6 章，对全文进行总结，并对后续研究工作进行展望。

第 2 章 并联型 FACTS 设备提高电网稳定运行有效性分析

现代电力系统已发展成为大规模交直流互联电网，复杂的系统结构，繁重的运行任务，以及要求保障较高的电能质量，甚至市场和环保等多方面因素的需求，对输电网的安全、可靠、经济运行提出了更高的要求。但传统的机械式控制方法具有明显的局限性，造成输电的可控性差、系统的稳定水平低，导致输送电力难以灵活调节，传输设备不能充分利用。从 20 世纪 60 年代初期晶闸管发明开始，研究工作者陆续利用电力电子技术研制出了 SVC、STATCOM、TCSC、UPFC 等一系列采用可关断电力电子器件构成的 FACTS 控制器。而 FACTS 元件中的并联补偿控制器作为一种新的解决手段，在提高系统电压稳定性方面带来了前所未有的契机，从而得到广泛的认可和迅速的发展。目前取得广泛应用的 FACTS 控制器仍然要数 SVC，伴随着 FACTS 技术在电力工业领域快速的发展，目前已发明了将近 20 种 FACTS 控制器，一些研制较早的其他类型的控制器也逐渐进入商业化，但仍需要进一步深入的研究分析，以便更好地应用于实际。

本章对当前 FACTS 控制器中并联补偿控制器的基本原理进行分析，并简要介绍 SVC 和 STATCOM 的应用情况。在此基础上，对这两种典型动态无功补偿设备的功能进行分析比较，并利用电压稳定裕度、暂态稳定裕度等体现电网稳定运行的指标，进一步分析说明并联补偿型 FACTS 控制器对电网稳定运行的有效改善。

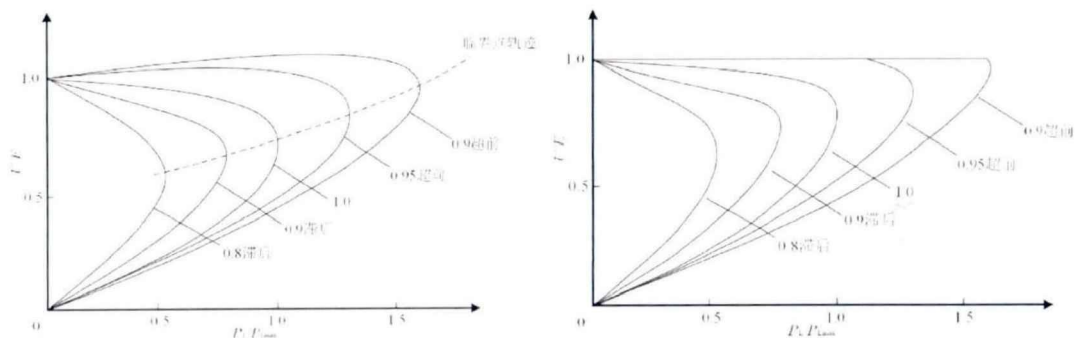
2.1 并联补偿器基本原理

并联补偿型 FACTS 控制器（以下简称并联补偿器）相当于一个在连接点处向系统注入的电流源，通过改变该等效电流源输出电流的幅值和相位，来改变其注入系统的无功功率甚至是有功功率的大小，起到调节功率和电压的作用，而且它是对节点而不是单一的线路起补偿作用，能够使节点附近的一定区域均受益，因此并联补偿器在维持变电站母线电压方面的作用较大。

并联补偿器接入方式简单，通过调节并联补偿输出，甚至可以做到无冲击投入运行和无冲击退出运行。同时由于并联补偿设备或者只改变系统节电导纳矩阵的对角线元素，或者可等效为注入电网的电流源，其投入对电力系统的主要结构影响很小。另外，并联接入对电力系统的复杂程度增加不大，便于分析，因此并联补偿器在电力系统中得到了广泛的应用。在输电网中，其主要功能是提高系统

稳定性和传输能力,改善潮流可控性。其布置方式常见的有两种,一种是安装于输电线路的受电端(负荷侧),另一种是布置于长线路传输的变电站附近。

当负荷功率因数为滞后值时,滞后程度越小,系统可传输的最大有功功率越多;传输相同的有功功率,负荷电压离临界点的距离越远,系统的稳定性越好,如图2-1所示。图2-1中(a)和(b)分别为并联补偿前和补偿后负荷电压和有功功率变化曲线。由于电力系统中的负荷功率因数绝大多数是滞后的,如果在负荷母线处接入并联补偿,能够对负荷的无功功率进行补偿,提高负荷的功率因数,则可以有效地提高系统的电压稳定性,同时灵活调节负荷电压。另一方面,对于系统暂态稳定性,如果并联补偿于长线路传输过程中,则能够大大提高故障期间或故障后功角特性曲线(图2-2所示为简单系统的功角特性曲线),增大系统传输容量,增强暂态稳定性。



(a) 并联补偿前负荷电压和有功功率变化曲线 (b) 并联补偿后负荷电压和有功功率变化曲线

图2-1 并联补偿前后系统U-P曲线

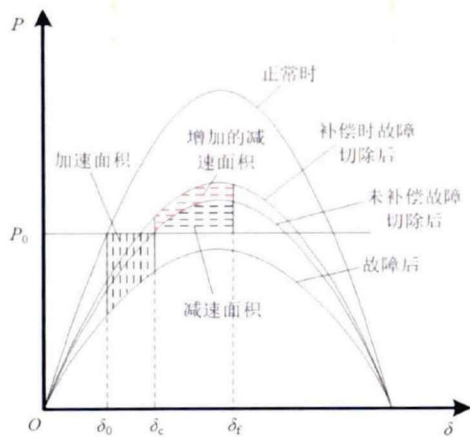


图2-2 补偿前后系统功角特性变化示意图

假如忽略并联补偿型控制器相对较低的内部损耗,不考虑携带储能装置的变换器,那么并联无功补偿不能发出或吸收有功功率,是通过改变输出感性或容性的无功功率来控制电网节点电压,进而影响系统的运行特性。因此,对于电网的系统侧来说,并联补偿型控制器的输出都是以维持或控制电网的特定参量为目标而改变的,除了对系统性能的提升改善有差异之外,决定并联补偿型控制器功能

行为的基本外部控制结构和所需的参考输入在本质上是一样的。也就是说，如果将并联补偿型控制器等效为可控的无功电流源，其控制特性是使注入系统的电流跟随电流参考值而变化，电流参考值是由其控制的电网节点的实际电压与参考电压通过某种控制策略得到的。

2.2 SVC 与 STATCOM 功能性比较分析

SVC 和 STATCOM 均是并联补偿器，都能向电网提供无功功率，满足特定的补偿需求，并在线性区域表现出类似的工作能力。具体区分起来，SVC 属于基于晶闸管控制投切型的，主要起着电子式开关的作用，通过控制其投切时间，改变被控电抗或电容的等效阻抗，来调节并联无功功率，具有更灵活的控制特性；而 STATCOM 属于基于变换器型的，可等效为一个可调的电压-电流源，通过控制该电压-电流源的幅值和相位来改变向电网输送无功功率的大小。

SVC 和 STATCOM 典型的 U-I 特性曲线分别如图 2-3 中(a)和(b)所示。

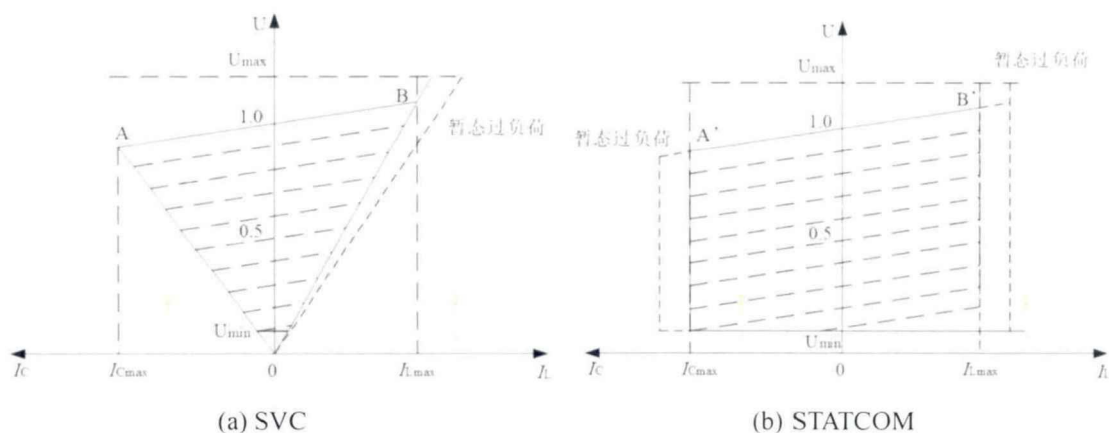


图 2-3 SVC 和 STATCOM 的 U-I 特性曲线图

可以看到，正常运行状态下，SVC 和 STATCOM 分别在 AB 和 A'B' 段根据设定的斜率实现对电压的平滑调节。不同之处之一在于两种控制器处于满载的情况，SVC 在满载时是一个固定电容的电纳，可输出补偿电流的最大值受系统电压的影响线性变化，无功补偿容量与系统电压的平方成正比，其输出的无功功率在容性和感性运行区域分别如式(2-1)和式(2-2)所示

$$Q_{SVC} = -\frac{U^2}{X_{C_{max}}} \quad (2-1)$$

$$Q_{SVC} = \frac{U^2 (X_{C_{max}} - X_{L_{max}})}{X_{L_{max}} X_{C_{max}}} \quad (2-2)$$

式中， $X_{C_{max}}$ 表示所有投入运行的电容器组的最大容性电抗值， $X_{L_{max}}$ 表示 SVC 中晶闸管控制电抗器(FCR)的最大电抗值。

而 STATCOM 的最大可输出补偿电流不依赖于系统电压, 无功补偿容量与系统电压成线性变化关系, 在系统低电压运行的情况下仍然可以处于满发补偿电流的状态, 相比 SVC 能够输出较大的补偿功率。在系统发生大扰动的情况下, 电压偏移超出控制器运行的线性区域, 电压急剧跌落时 STATCOM 较 SVC 能够提供更好的电压支撑能力。不同之处之二在于暂态过载情况, 由于 SVC 在输出容性电流方面严格受电容容量和系统电压幅值的限制, 因此几乎没有暂态无功输出裕度, 而对于 STATCOM 来说其容性暂态过电流理论上由所使用的电力电子器件的最大关断电流决定; 在感性运行区域, 由于电力电子器件的作用, 二者的感性暂态电流值在某种程度上均受器件最大允许温度限制, 因此均有一定暂态过载能力, 只不过 SVC 暂态裕度仍受电容的制约。有大量研究表明, 在电力系统故障过程中, 电压降低时 STATCOM 的无功补偿能力等同于容量约为其 1.2~1.3 倍的 SVC 无功补偿能力。对比 SVC 和 STATCOM 在提供电压恢复和对发电机转速影响方面的仿真曲线如图 2-4 中(a)和(b)所示。

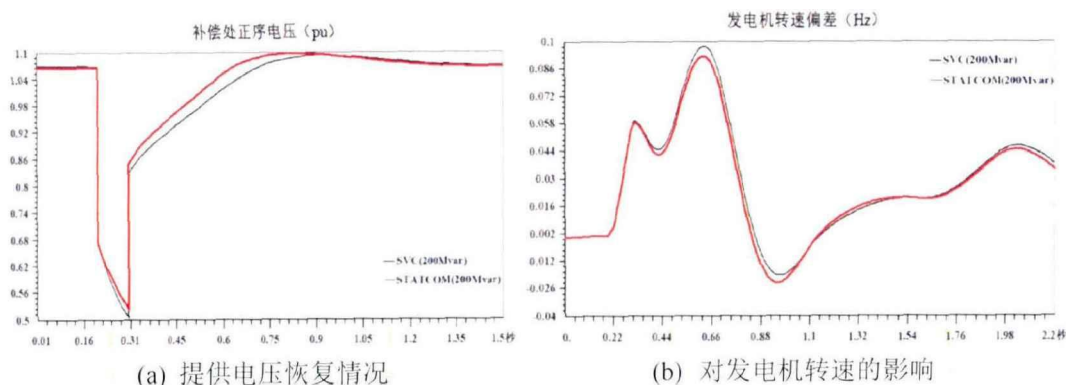


图 2-4 SVC 和 STATCOM 性能比较

在响应速度方面, 对于采用普通晶闸管的 SVC 来说, 过零才能自然关断的特性使其传输延迟较大, 一般整个开环响应时间在 40ms 以上; 而对于使用 GTO 等器件的 STATCOM 来说几乎没有传输延迟, 加之各种优化控制模式, 其开环响应时间主要由其固有时间常数决定, 开环响应时间可被缩短在 10ms 以内。但是, 由于电力电子器件性能提升在 STATCOM 中的应用, 也使其研制成本高于利用普通性能器件的 SVC。

总体来说, STATCOM 在暂态无功补偿能力、可控性能和动态响应速度等方面优于 SVC, 同时随着对 STATCOM 的深入研究, 它已经成为了 FACTS 的核心控制器之一。目前实际中应用较为广泛的是基于电压源型变换器的 STATCOM。VSC 的 STATCOM 通过调节其直流侧电容电压的幅值和/或变换器的调制比, 可以控制变换器交流输出电压的幅值, 进而改变装置输出电流的极性(容性或感性)和大小, 达到连续控制输出无功功率的极性和大小的目的。当前在全世界范围内, STATCOM 的最大容量可达到 200MVar, 而 SVC 由于采用一般的晶闸管, 价格

比STATCOM采用的可关断器件便宜很多。由于SVC在经济价格方面优势明显，所以应用较为普遍。

2.3 并联补偿技术稳定电网运行的有效性

评判电网是否处于稳定运行的方法，能够较直观的明确电网的运行状态。因此，并联补偿技术对电网运行稳定性的提升，可以从其对评估电网运行状态指标的影响体现出来，具体说明如下：

1、系统电气参数

如果忽略并联补偿器的控制过程，其在电网中可以等效成带电抗的并联可控电流源。接入电网之后，对于潮流雅可比矩阵会有一些影响。通过基于在稳定状态运行点的雅可比矩阵特征值分解的方法，消去不感兴趣的母线，将电压相关联负荷包含在雅可比矩阵中，在忽略有功功率微小变化的前提下，可以得到母线无功功率变化量与母线电压幅值变化量的关系，从而找到系统电压稳定薄弱点。利用并联补偿器的灵活控制作用，可以有针对性的减弱系统结构的初始不稳定隐患，增强电力系统的电压稳定能力。

2、电压稳定裕度

并联补偿器通过快速输出感性或容性无功功率来影响电网中传输设备的功率分配，提高单个电力输电设备的输送能力，克服系统的稳定性极限。能够缓解系统从某一工作状态开始，由于负荷或传输功率增加后，容易到达电压崩溃点的局面，即提升电压稳定裕度。

3、暂态稳定裕度

从扩展等面积法的角度出发，电力系统中的参数或结构发生变化后会直接影响系统的暂态稳定程度。并联补偿器较快的控制响应速度，能够迅速地对系统的扰动做出反应，甚至对一些高频的动态过程进行调节。并联补偿器可以在任何时间反复调节，并可连续控制，以便它能在工作范围内连续调节电网参数。主要通过在其容量范围内提供任意无功功率补偿，使得线路上的无功功率减少，线路传输更多有功功率，增大暂态稳定裕度。

4、系统动态性能

评判系统动态性能的指标主要有超调量、过渡时间和过渡振荡次数。超调量能够体现系统受到大扰动后，系统状态量在刚开始恢复时，越过最终稳定状态值的情况；过渡时间是指从扰动发生时刻到系统状态基本趋于稳定所需要的时间；过渡振荡次数为在过渡期间系统状态的振荡次数。在输电系统中，并联补偿器通过在一定范围内改变节点电压，进而对系统的传输功率进行控制，缩短系统的过渡过程，在一定程度上降低超调量，减少系统状态（如电压）的振荡次数。

总之，并联补偿器能够实现对交直流电网的快速、连续、灵活、准确控制，很大程度上提升电网的动态性能和稳定水平。

2.4 本章小结

并联型 FACTS 补偿设备应用于电网运行时，主要在补偿附近区域维持电压稳定的能力较大，进而会改善系统暂态情况下的功角特性，提高系统暂态稳定性。为了给后面章节奠定基础，本章对两种典型的动态无功补偿设备的简化模型进行了分析，指出了它们在无功补偿应用方面优缺点。最后，分析了动态无功补偿对几种电网运行稳定性评估指标的影响，指导了后续优化配置研究的分析方向。

第3章 考虑节点电压稳定关联度的交直流电网分区

随着电网联系越来越密切,对于具有较多电气节点的交直流电网,如果直接研究无功补偿设备的配置地点和容量,涉及到的电气量耦合计算较为复杂,而且计算工程巨大。因此,首先对电网结构进行分析,从电网构建的本源入手,以更好的配置无功补偿设备的角度,对交直流电网进行初步分区,确定无功补偿设备配置地点的范围。这样,不仅能够更好的理清电力系统间的相互关系,进而确定较好的无功补偿设备配置方案,同时能够减少计算工作量。

无功补偿设备的配置主要涉及到系统无功功率和母线电压的变化情况,对于复杂电力系统,通过研究某状态量的变化对反映电力系统稳定情况的状态量的影响,能够较为直接的体现系统整体变化情况。所以,本章首先利用灵敏度分析方法对交直流电网进行分析,进而从无功电压灵敏度方面,利用基于密度的聚类方法对交直流电网进行分区。

3.1 灵敏度分析理论

在实际系统中,当控制变量发生微小变化时,系统的状态变量或输出变量都会发生微小变化,用它们之间的微分关系来表示这种变化关系,是通常的灵敏度指标的定义。

灵敏度分析的数学方程可以写为:

$$F(X,U)=0 \quad (3-1)$$

$$Y=(X,U) \quad (3-2)$$

在状态方程(3-1)和输出方程(3-2)中对控制向量 U 求全微分,分别得到状态变量和输出变量的灵敏度矩阵表达式如式(3-3)所示。

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dU} &= -\left[\frac{dF}{dX}\right]^{-1} \frac{dF}{dU} \\ \frac{dY}{dU} &= -\frac{dG}{dX} \left[\frac{dF}{dX}\right]^{-1} \frac{dF}{dU} + \frac{dG}{dU} \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中, G 表示输出方程。

一般的灵敏度分析是指分析一个模型的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法^[25]。广泛一点来说,灵敏度分析不仅可以研究模型状态变量或输出变量对系统参数变化的敏感程度,而且可以进一步分析模型中状态变量之间的敏感程度,根据实际需要确定哪些状态量对系统或模型的输出有较大的影响。

在状态变量较多且关联较为密切的系统或模型中,某个状态量的改变会牵扯到很多状态量的变化,对于不需要完全理清系统或模型中每个状态变量的变化关系的问题,可以只分析该状态变量的变化情况对系统输出变化的影响情况。这样,在系统或模型运行的大背景下,有目标性的对某些变量进行灵敏度分析,不但能够确保结果分析的准确性,而且能够解决复杂系统分析困难的问题。

本文利用灵敏度分析理论主要用来分析交直流电网中某个电气量(如母线电压)发生变化时,对其他电气量(如节点无功)的改变程度,在分析结果的基础上,明确不同状态变量的影响关系,并进一步指导无功补偿配置范围的确定。

3.2 含直流馈入的电网分析

由于电网受到扰动发生暂态变化是在稳态的基础上,可以先从交直流系统的潮流雅克比矩阵进行分析,结合电网基本拓扑结构,研究含直流馈入的电力系统有功无功特性对节点电压稳定的影响。

对于交直流网络中的交流节点,式(3-4)为极坐标系潮流方程^[26]的表示,雅克比矩阵中包含 $\frac{\partial Q}{\partial U}$ 的部分如式(3-5)所示,其中不包含 PV 节点和平衡节点。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta^T} & \frac{\partial P}{\partial U^T} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta^T} & \frac{\partial Q}{\partial U^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} U_i = U_i (B_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2}) U_i \\ L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j = U_i (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) U_j \end{cases} \quad (3-5)$$

对于直流系统,整流侧的方程为:

$$\begin{cases} Q_r = -P_r \tan \varphi_r + \omega B_c U_r^2 \\ U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_r k_r U_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} n_r X_r I_d \\ \cos \varphi_r = \cos \alpha - \frac{X_r I_d}{\sqrt{2} k_r U_r} \end{cases} \quad (3-6)$$

同理有逆变侧的方程为:

$$\begin{cases} P_i = P_r - I_d^2 R \\ Q_i = -P_i \tan \varphi_i + \omega B_c U_i^2 \\ U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_i k_i U_i \cos \gamma - \frac{3}{\pi} n_i X_i I_d \\ \cos \varphi_i = \cos \gamma - \frac{X_i I_d}{\sqrt{2} k_i U_i} \end{cases} \quad (3-7)$$

其中, Q_r 和 Q_i 分别表示整流侧和逆变侧换流站无功出力, P_r 和 P_i 分别表示整流侧和逆变侧换流站有功出力, I_d 为直流系统电流, R 为直流系统线路电阻, U_r 和 U_i 分别表示整流侧和逆变侧换流母线电压, φ_r 和 φ_i 分别表示整流侧和逆变侧功率因数角, n_r 和 n_i 分别表示整流侧和逆变侧换流器串联个数, k_r 和 k_i 分别表示整流侧和逆变侧换流变压器变比, α 为整流侧触发角, γ 为逆变侧熄弧角, X_r 和 X_i 分别表示整流侧和逆变侧换相电抗。

由式(3-6)和式(3-7)看到, 直流系统无功与直流有功功率和换流母线电压有关, 因此可以得到直流的无功与其电压的灵敏度关系如式(3-8)所示。

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = -\frac{\partial P(U)}{\partial U} \varphi(U) - \frac{\partial \varphi(U)}{\partial U} P(U) + 2B_c U \quad (3-8)$$

其中, Q 为换流器无功出力, P 为直流系统有功出力, U 为换流母线电压, φ 为功率因数角, B_c 为无功补偿电纳。

直流输电系统一般为整流侧定功率控制, 逆变侧定电压控制, 直流输送的功率与换流站交流母线电压幅值关系较小, 几乎可以忽略不计; 以逆变侧为例, 由式(3-7)和(3-8)推导可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial U} &\approx -\frac{\partial \varphi(U)}{\partial U} P(U) + 2B_c U \\ &= \frac{P}{U^2} (2cK(c) + 2B_c \frac{U^2}{P}) = \frac{2PcK(c)}{U^2} + 2B_c \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\text{其中, } c = \frac{X I_d}{\sqrt{2} K U}, \quad K(c) = \frac{1}{(\cos \gamma - c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\cos \gamma - c)^2}}$$

结合式(3-5)和式(3-9)得到交直流电网中各节点无功对电压的灵敏度为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = U_i (B_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2}) + \frac{P_{di}}{U_{di}^2} (2cK(c) + 2B_c \frac{U_{di}^2}{P_{di}}) \\ \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3-10)$$

其中, 下标 i, j 表示节点编号。

3.2.1 节点电气距离

由于本文主要从保证电压稳定的角度对柔性交流设备的无功补偿进行研究，无功补偿设备的加入对电网最直接最主要的影响是无功功率的补充，更进一步的会影响该设备附近母线的电压变化，从而影响电力系统电压稳定情况。因此需要探究不同母线间电压相互影响关系，得到从电压稳定的角度反映电网节点间的电气距离，来评估节点电压稳定的关联度。首先由于某节点无功功率的变化会引起母线电压的变化，而电压对无功功率的灵敏度可以通过上一节分析得到的无功对电压灵敏度求逆得到。文献[27]指出结合电压对无功功率的灵敏度可以反映不同节点间的电压变化关系，见式(3-11)。

$$\Delta U_i = \left(\frac{\partial U_i}{\partial Q_j} / \frac{\partial U_j}{\partial Q_j} \right) \Delta U_j = \alpha_{ij} \Delta U_j \quad (3-11)$$

其中， α_{ij} 表示节点 j 电压发生微小变化时引起节点 i 电压变化的相关系数。

为了同时考虑任意两个节点间相互影响的程度，同时为了便于比较，定义两个节点之间的电气距离 d_{ij} 如式(3-12)所示，该电气距离能够反映节点电压稳定的关联度。

$$d_{ij} = -\lg(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (3-12)$$

如果 α_{ij} 和 α_{ji} 的乘积越小，说明两个节点间电压相互影响越小，则计算得到的电气距离越大 d_{ij} ，因此本文定义的电气距离越小表明节点间电压相互影响程度越大，具有与实际的地理距离相同的等效意义。

计算电网中所有节点间的电气距离，可以得到由电气距离组成的矩阵 D 如式(3-13)所示，是一个对称阵。

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1j} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & & & & \vdots \\ d_{j1} & & \ddots & d_{jj} & & d_{jm} \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & \cdots & d_{nj} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

3.2.2 交直流电网分区算法

得到了能够评估节点电压稳定的关联度的电气距离指标之后，要利用电气距离对电网中的节点进行分区聚类。目前应用的聚类算法主要包括这几种：以欧式距离进行划分的方法，如 K-Means 算法；分裂的层次方法，如 CURE(Clustering Using Representatives)；基于密度的方法，如 DBSCAN(Density Based Spatial

Clustering of Applications with Noise)^[28, 29]；基于密度和网格的方法，如 CLIQUE(Clustering In QUEst)^[30]；基于模型的方法，多数为概率分布方法。

基于密度的聚类方法的基本思路是找到被低密度区域间隔开的高密度区域^[31]。与基于距离的聚类算法相比，这种算法可以获得任意形状的聚类，这对于带有噪音点的数据起着重要的作用，而基于距离的聚类算法的聚类结果只是球状的簇^[32]。

结合电网拓扑结构，基于密度的聚类方法，利用电气距离来描述个体之间的接近程度的指标，将电气距离较近的节点归属为一个区域，从而对大电网进行初步分区。考虑电气节点连接情况首先确定一个初始化凝聚点，按就近原则判断其余节点是否汇入凝聚点的分区，通过不断迭代进行上述过程，完成整个分区进程。本文提出的分区聚类方法如图 3-1 所示。

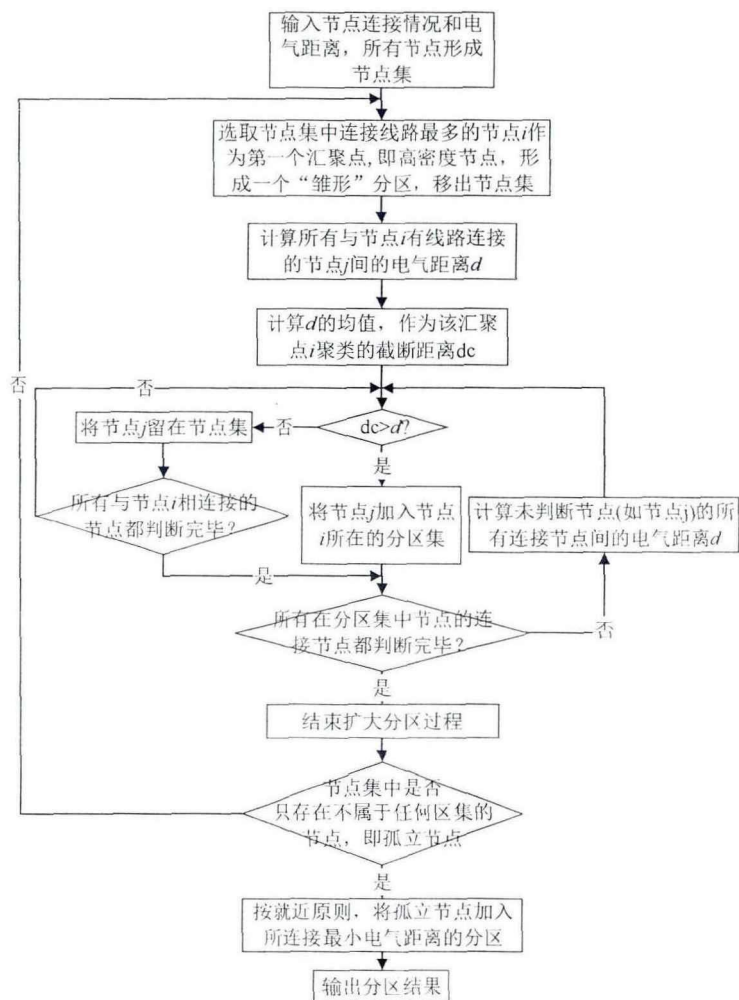


图 3-1 交直流电网分区聚类方法

3.3 实例验证

南方电网是典型的交直流混联系统，而广东电网与周边电网形成“八交八直”

的联络输电线路，属于拥有多交流和直流馈入的交直流电网。本文以广东电网作为实例进行研究，计算该大型具有直流落点的电网中各个节点间的电气距离，再利用基于密度的聚类方法对广东电网进行分区。通过计算，依次得到以 BEIJIAO, MUMIAN, SHANGZHAI, SHIYANG, JIANGMEN, JIAYING, HUIZHOU, ZHENZHOU, DIEILING, YANDU, BAOAN, ZUIJING, GUOAN 的 13 个节点母线为初始化凝聚点，不断聚类形成了 13 个区域，分别是茂名蝶岭的西南侧、砚都玉城的西侧、北郊增城互联的部分区域、木棉横沥区域、北郊增城互联区域增城部分、福园上寨北侧、榕江嘉应东北侧、梧州、鲲鹏茅湖互联部分、狮洋文山、宝安象山、江门圭峰、茂名蝶岭的西南侧、珠海加林、鹏城紫荆以南。

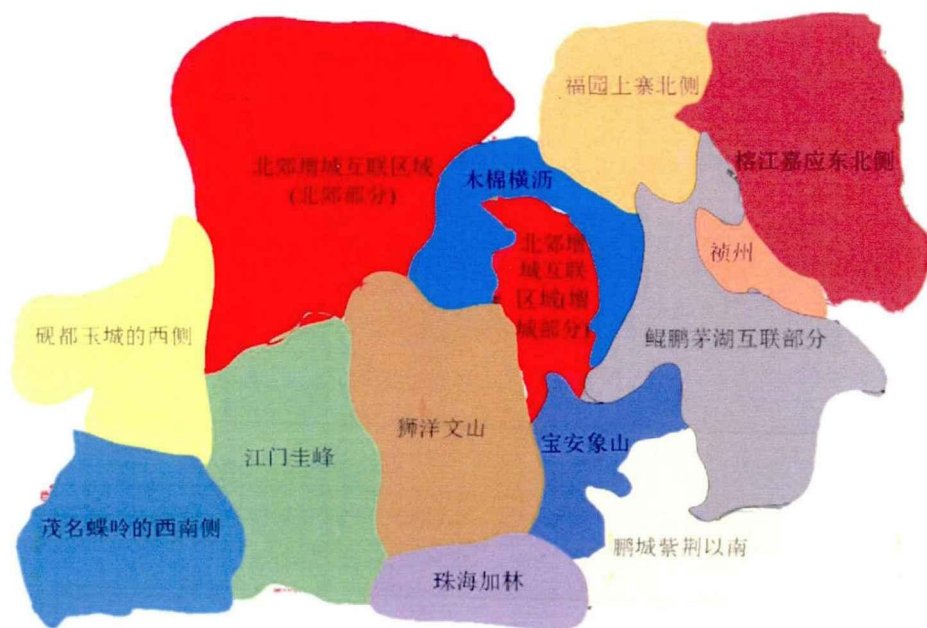


图 3-2 广东电网分区情况示意图

为了验证分区计算结果的有效性，在 PSD-BPA 仿真平台上，对广东电网进行仿真验证。验证方法是，设置某分区内部发生故障，考察分区边界节点电压的动态变化情况。如果分区内部节点电压失稳情况较为一致，且相对于分区外节点较为严重，则说明了分区计算结果的有效性。

下面以北郊增城互联的部分区域、木棉横沥区域、江门圭峰区域、福园上寨的北侧、珠海加林区域为例进行举例验证。

对于北郊增城互联的部分区域及其周边地区的界限划分，考察北郊分区内部某一线路发生单相短路故障，对分区边沿主要变电站的影响，图 3-3 为仿真结果曲线。通过仿真发现计算结果选择的属于北郊区域的凯旋变电站(KAIXUAN)受故障影响情况要比不属于北郊分区的麒麟(QILIN)和花地变电站(HUADI)电压下降的严重，其中麒麟变电站处于木棉横沥分区，花地变电站位于北郊与狮洋分区交界线的附近。

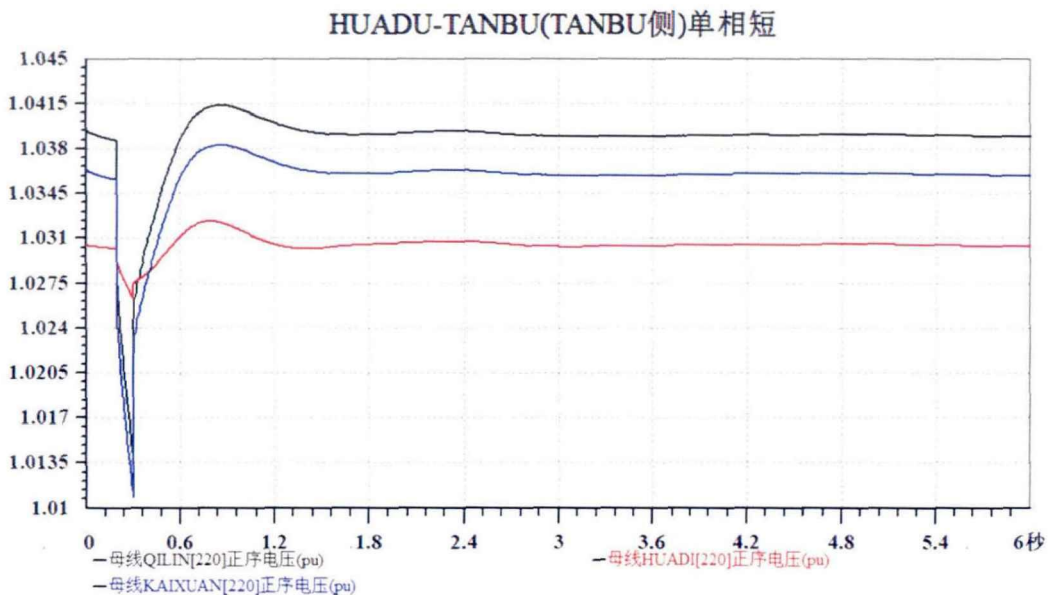


图 3-3 北郊增城区与木棉、狮洋边沿分区判断仿真图

对于木棉横沥区域及其周边地区的界限划分,考察木棉分区内部某一线路发生单相短路故障,对分区边沿主要变电站的影响,图 3-4 为仿真结果曲线。通过仿真发现理论分析计算结果选择的属于木棉区域的棠下变电站(TANGXIA)受故障影响情况要远大于属于增城分区的沧头变电站(LUNTOU),其中沧头变电站拥有与木棉横沥分区内部变电站连接的线路。



图 3-4 木棉横沥区域与周边分区判断仿真图

对于江门圭峰区域及其周边地区的界限划分,考察木棉分区内部五邑一百合线路发生三相短路故障,对分区边沿主要变电站的影响,图 3-5 为仿真结果曲线。通过仿真发现理论分析计算结果选择的属于江门区域的能达(NENGDA)、圭峰变电站(GUIFENG)受故障影响情况要远大于属于狮洋分区的狮洋(SHIYANG)、同

益变电站(TONGYD)，其中狮洋变电站处于江门分区与狮洋分区的边界处，同益变电站也位于分区线附近。

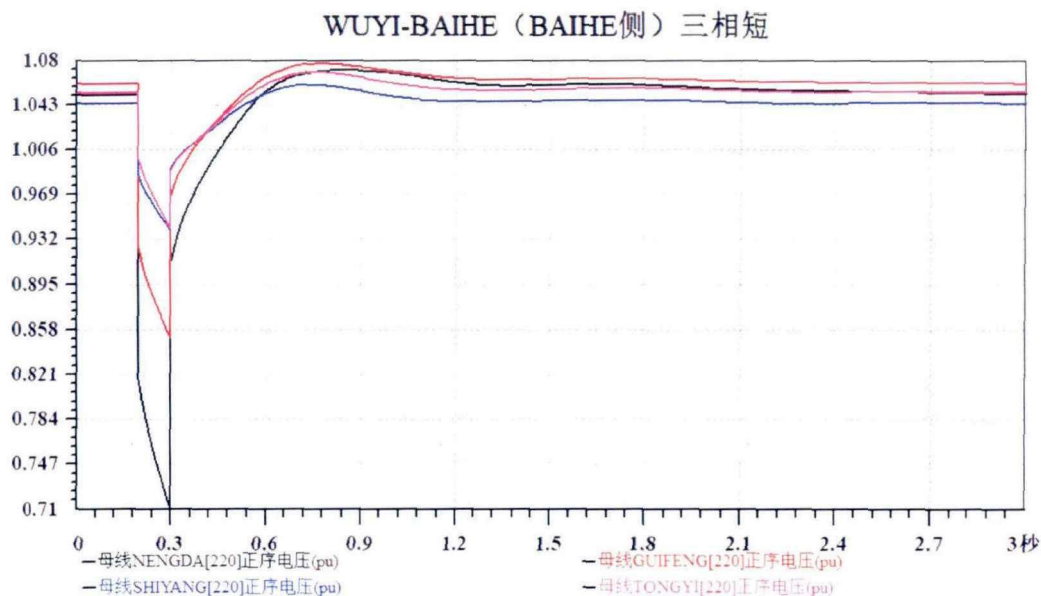


图 3-5 江门区与狮洋边沿分区判断仿真图

对于福园上寨的北侧区及其周边地区的界限划分，考察上寨分区内部某一线路发生三相短路故障，对分区边沿主要变电站的影响，图 3-6 为仿真结果曲线。通过仿真发现计算结果选择的属于上寨区域的升平(SHENGPIPING)、义和变电站(YIHE)受故障影响情况远大于不属于上寨分区的博罗(BOLUO)和嘉应变电站(JIAYING)，其中博罗变电站处于上寨与木棉横河分区的边界处，嘉应—上寨线路是上寨与嘉应分区分界的断截面。

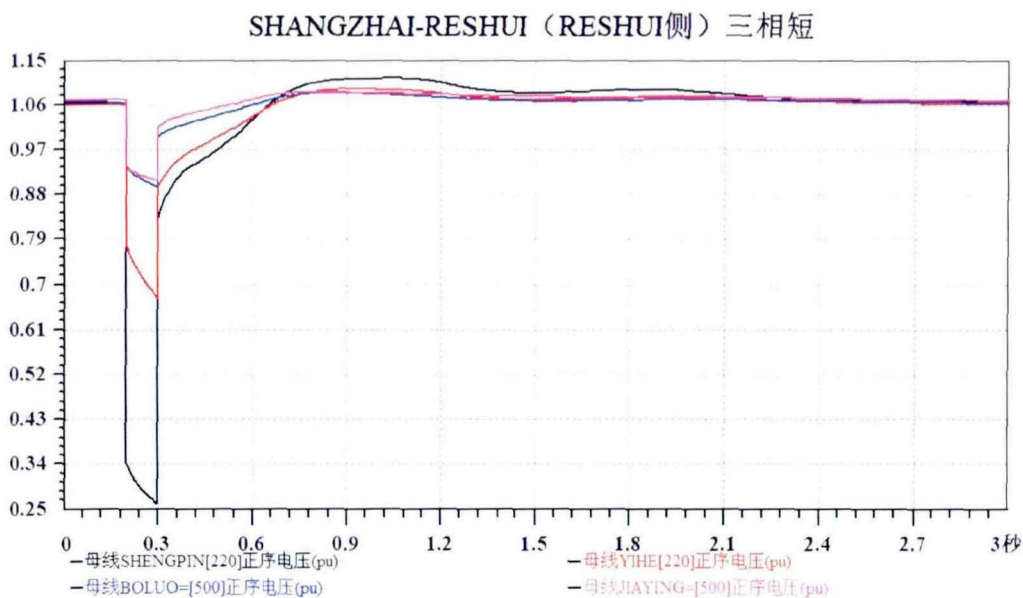
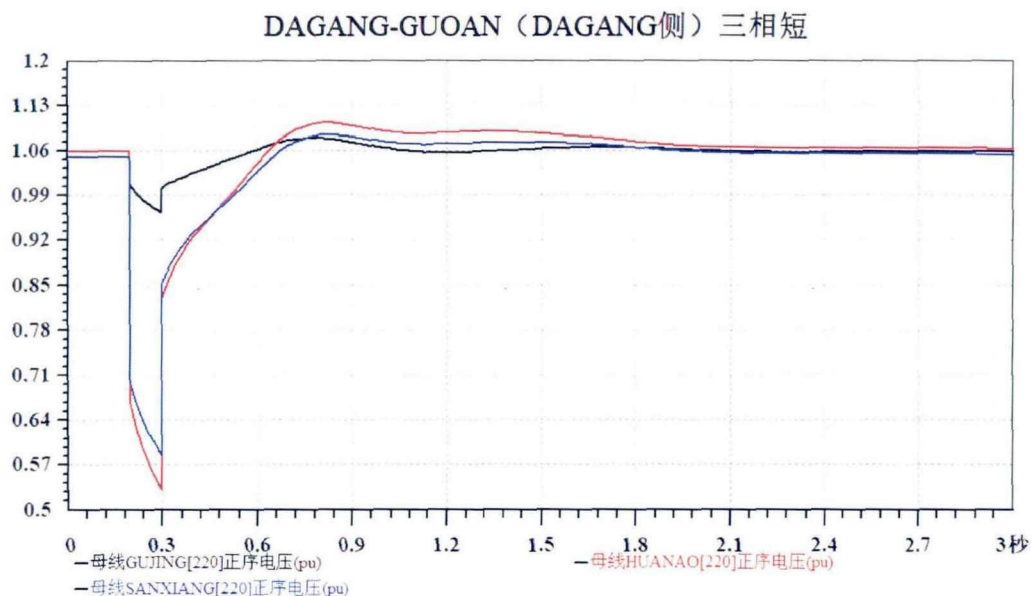


图 3-6 福园上寨的北侧区域与周边分区判断仿真图

对于珠海加林区域及其周边地区的界限划分，考察珠海分区内部大港—周安

线路发生三相短路故障,对分区边沿主要变电站的影响,图3-7为仿真结果曲线。通过仿真发现,理论分析计算结果选择的属于珠海区域的环澳变电站(HUANA0)受故障影响情况要严重于属于狮洋分区的三乡变电站(SANXIANG)和属于江门区域的古井变电站(GUJING),其中三乡变电站与国安变电站有线路连接,为珠海分区与狮洋分区的分界断面,古井变电站与国安变电站有间接联接关系。



其余分区的仿真验证结果也都体现出较好的分区效果,说明本章的分析和计算方法能够达到对交直流电网进行初步分区的目标。

3.4 本章小结

本章通过分析交直流电网电压稳定问题,结合直流系统的运行特性和交直流系统的有功无功特性,建立了基于电压无功灵敏度的交直流电网电压稳定分析模型,来评估节点电压稳定的关联度。在此基础上,提出了基于密度聚类的交直流电网分区方法,完成了动态无功补偿优化配置问题的初步配置研究,最后验证了该研究方法是有效的,为进一步分析区域内部的优化配置提供了条件。

第4章 交直流电网电压失稳关键事故集筛选

在进行动态无功补偿优化配置研究的过程中,需要对受扰动后的系统电压稳定性进行评估,因而有必要分析关键节点引起电压失稳的严重程度,即分析造成系统成为脆弱系统的事态形态。电力系统中的事故形态是多种多样的,在进行后续电压稳定性评估时,详细分析每个可能事故的影响是不切实际和不必要的。通常,只有有限数目的事故会直接威胁到电压稳定性,因此重要的是要知道各种可能事故对电力系统的影响。通过分析各种事故下系统电压失稳的严重性,获取能够较全面反映失稳形态的关键事故集,从而为动态无功补偿之后的系统电压稳定性评估奠定基础。

4.1 暂态电压越限衡量指标

在电网受到严重扰动之后,通过对比各节点暂态电压形态和可靠性电压指标能够反映系统电压失稳情况,为选择导致电网电压失稳严重的故障集提供依据。依据我国现有的《电力系统安全稳定导则》[14]提出的静态稳定储备标准,在事故发生后的运行模式下,按 dQ/dU 判据获得的静态电压稳定储备系数 K ,不得低于8%;在非同步运行期间,电网枢纽变电站以及联接有重要用户的变电站的母线电压波动的最小值不小于额定值的75%。该稳定储备指标能够作为明确可靠性电压指标的标准。因此有定义暂态电压越限积分(Trajectory violation integral)如图4-1阴影所示。

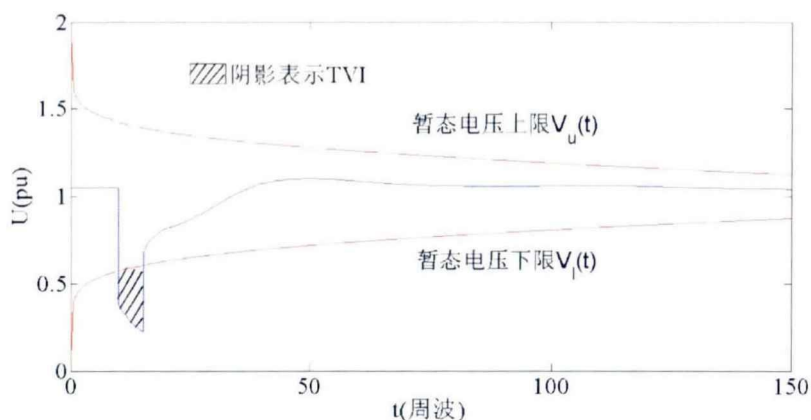


图4-1 暂态电压越限积分示意图

图中红色的暂态电压的上下限相当于可靠性电压指标,蓝色的曲线为某一母线在某一故障下的电压变化形态。具体暂态电压上下限的表达式为式(4-1)所示。

$$V_1(t) = \frac{(\frac{t}{t_e} \cdot e^{\frac{t}{t_e}})^{\beta}}{e^{\beta}} \cdot v_s, \forall t \in [t_s, t_e] \quad (4-1)$$

$$V_u(t) = 2 - V_1(t)$$

其中， t_s 是故障切除时刻， t_e 是计算中止时刻， β 是积分常数。

式(4-1)中的参数可依据电压标准确定，本文选择故障在切除后 50 个周波内，电压需要上升至 0.75p.u.，一段时间后需要恢复到电压稳定波动范围内的标准。通过计算，确定 v_s 为 0.92， β 为 0.1248。

类似图 4-1 所示的暂态电压越限积分，分别计算不同故障后电压超越暂态稳定界限的积分，能够评价不同故障对各个节点电压的影响程度，反映系统电压失稳的严重性。因此有暂态电压越限积分 TVI 表示如式(4-2)所示。

$$TVI = \int_{t_s}^{t_e} v_v(t) dt \quad (4-2)$$

$$\text{其中, } v_v(t) = \begin{cases} v(t) - V_u(t) & v(t) > V_u(t) \\ V_1(t) - v(t) & v(t) < V_1(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

在分析交直流电网电压失稳严重性的过程中，需要考虑直流输电系统换相失败的情况。引起换相失败的情况一般为逆变器运行在熄弧超前角为 18 度时，电压下降 10%~15%，换相失败后大致需要一到两个周期来消除^[34]；之后再通过换流器调节直流电压，逐渐恢复传输有功功率。因此在暂态电压越限分析时，在叠加了上述提出的故障后可能造成直流输电系统换相失败的情况下，主要选取线路两端的三相短路故障，变电站的主变压器故障，以及电厂故障的大扰动。

4.2 采用相关性理论形成严重故障集

在后续的动态无功补偿性能评估研究分析中，不可能也不必要对所有使得系统变得脆弱的情况都加以考虑，因此，需要提取严重致使系统电压不稳定的故障形态，这样不仅能够提高故障形态的代表性，同时可以降低计算的冗余性。根据式(4-2)能够计算得到的不同故障形态下不同母线电压的 TVI，利用相关性理论分析能够评估系统电压失稳严重性的关系密切程度。任意两个故障形态可以看成两个变量，探究故障所造成的系统所有母线电压变化程度的相关性，即反映了这两个故障形态是否属于“类似”的故障类型。求得的相关系数的绝对值如在 0.7~1.0 之间，则通常认为两个变量之间具有高度相关性；若介于 0.3~0.7 之间，可认为二者之间有中度相关；介于 0~0.3 之间则认为是低度相关^[35]。由相关系数的定义可知，故障 x 和故障 y 的相关系数 r_{xy} 如式(4-3)所示。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (TVI_{xi} - \overline{TVI}_x)(TVI_{yi} - \overline{TVI}_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (TVI_{xi} - \overline{TVI}_x)^2 \sum_{i=1}^N (TVI_{yi} - \overline{TVI}_y)^2}} \quad (4-3)$$

式中， TVI_{xi} 和 TVI_{yi} 分别表示故障 x 和故障 y 情况下第 i 个母线的暂态电压越限积分， \overline{TVI}_x 和 \overline{TVI}_y 分别表示故障 x 和故障 y 情况下所有母线的 TVI 的平均值， N 表示区域内主要母线个数。

通过对电网中电压不稳定严重程度相关性分析计算，生成严重故障集的流程如图 4-2 所示。

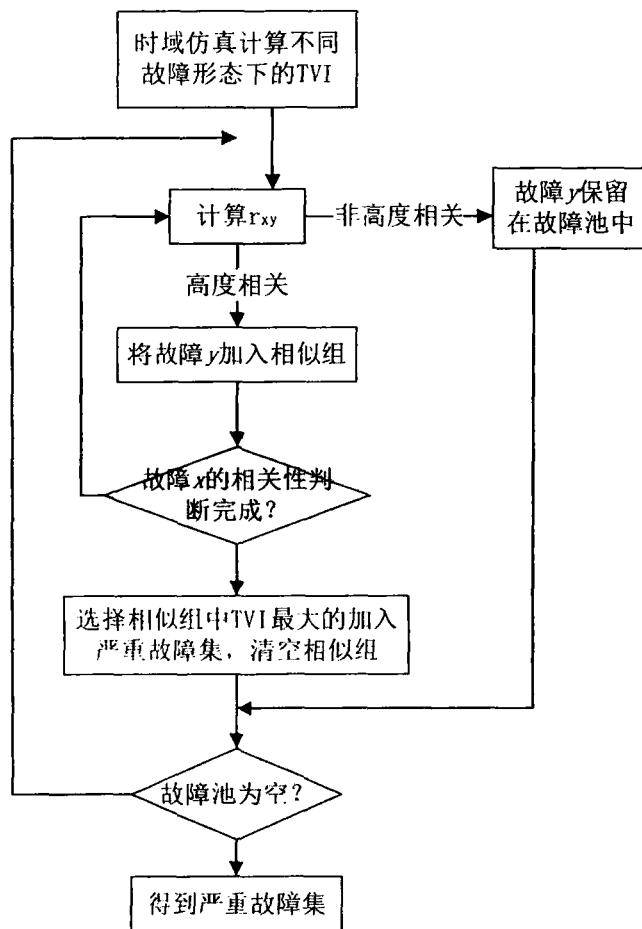


图 4-2 生成严重故障集的计算流程

4.3 实例验证

通过第三章中对广东电网个母线间电压稳定关联度的评估，获取了该电网中动态无功补偿设备的大概配置方位，之后需要进入下一个阶段，即各个分区内部分别进行电压失稳严重性分析，确定各个分区的严重故障集，以便为最后阶段的利用改进灵敏度指标最终确定配置地点和容量做准备。

4.3.1 实例计算

对第三章得到的各个分区分别进行电压失稳严重性相关性分析，分别获取 13 个分区电网内部具有“代表性”的故障形态。

通过计算确定暂态电压上下限为：

$$V_1(t) = \frac{\left(\frac{t}{3} \cdot e^{\frac{t}{3}}\right)^{0.1248}}{e^{0.1248}} \cdot 0.92, \forall t \in [0.3, 3] \quad (4-4)$$

$$V_u(t) = 2 - V_1(t)$$

下面以江门圭峰区域和福园上寨的北侧区域为例进行举例计算。在江门圭峰区域计算得到的计及换相失败风险的主要故障间的相关性系数如表 4-1 所示，以下只列出北街-群星线路北街侧三相短路故障等 10 个故障形态。

表 4-1 江门圭峰区域部分主要故障相关性系数表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.00000	0.99999	0.99909	0.94485	0.99547	0.99910	0.37212	0.37185	0.99841	0.93350
2	0.99999	1.00000	0.99894	0.94494	0.99542	0.99894	0.37225	0.37199	0.99823	0.93359
3	0.99909	0.99894	1.00000	0.94313	0.99516	0.99996	0.36984	0.36958	0.99959	0.93163
4	0.94485	0.94494	0.94313	1.00000	0.94325	0.94267	0.45384	0.45346	0.94526	0.99585
5	0.99547	0.99542	0.99516	0.94325	1.00000	0.99517	0.37576	0.37550	0.99472	0.93233
6	0.99910	0.99894	0.99996	0.94267	0.99517	1.00000	0.36957	0.36930	0.99961	0.93127
7	0.37212	0.37225	0.36984	0.45384	0.37576	0.36957	1.00000	1.00000	0.38325	0.50139
8	0.37185	0.37199	0.36958	0.45346	0.37550	0.36930	1.00000	1.00000	0.38295	0.50095
9	0.99841	0.99823	0.99959	0.94526	0.99472	0.99961	0.38325	0.38295	1.00000	0.93567
10	0.93350	0.93359	0.93163	0.99585	0.93233	0.93127	0.50139	0.50095	0.93567	1.00000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

线路两端的三相短路故障、变电站主变故障和电厂故障等故障下江门圭峰区域内所有主要母线的暂态电压越限积分 TVI 如表 4-2 所示，以下只列出编号在前 15 个的故障形态的总 TVI。

表 4-2 江门圭峰区域部分主要故障的总 TVI

故障编号	故障简称	$\sum_{i=1}^N TVI_i$
1	北群线（北街侧）	0.03468
2	北群线（群星侧）	0.03459
3	大顺线（大良侧）	0.03470
4	大顺线（顺德侧）	0.04559
5	蝶恩线（蝶岭侧）	0.03561

6	蝶恩线（恩平侧）	0.03443
7	都雷线（都宁侧）	3.77055
8	都雷线（雷岗侧）	3.95466
9	都顺线（都宁侧）	0.03521
10	都顺线（顺德侧）	0.04785
11	恩百线（百合侧）	0.034759
12	恩百线（恩平侧）	0.034472
13	恩圣线（恩平侧）	0.03448
14	恩圣线（圣堂侧）	0.034481
15	发开线（发兴侧）	0.035292
∴	∴	∴

本文根据相关性区分标准,通过相关性分析计算,最终确定属于江门圭峰区域的严重故障集有圭峰主变跳闸、江门主变跳闸、顺德主变跳闸以及圭峰-香山线（香山侧）、顺广线路（顺德侧）、都顺线路（顺德侧）、江西线路(江门侧)等三相短路故障,严重故障总数为 19。

在福园上寨北侧区域中计算得到的计及换相失败风险的主要故障间的相关性系数如表 4-3 所示，以下只列出博罗-冯屋线路博罗侧三相短路故障等 10 个故障形态。

表 4-3 福园上寨北侧区域部分主要故障相关性系数表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.00000	0.99690	1.00000	0.99671	1.00000	0.99705	1.00000	0.99687	0.90352	0.85206
2	0.9969	1.00000	0.99689	0.99999	0.99692	1.00000	0.99692	1.00000	0.88258	0.83803
3	0.999999	0.99689	1.00000	0.99670	0.99999	0.99704	1.00000	0.99686	0.90340	0.85198
4	0.996708	0.99999	0.99670	1.00000	0.99673	0.99698	0.99672	0.99999	0.88124	0.83690
5	0.999998	0.99692	0.99999	0.99673	1.00000	0.99706	0.99999	0.99689	0.90354	0.85206
6	0.997046	1.00000	0.99704	0.99998	0.99706	1.00000	0.99706	0.99999	0.88358	0.83887
7	0.999998	0.99692	1.00000	0.99672	0.99999	0.99706	1.00000	0.99689	0.90345	0.85209
8	0.996874	1.00000	0.99686	0.99999	0.99689	0.99999	0.99689	1.00000	0.88266	0.83823
9	0.903515	0.88258	0.90340	0.88124	0.90354	0.88358	0.90345	0.88266	1.00000	0.93881
10	0.852061	0.83803	0.85198	0.83690	0.85206	0.83887	0.85209	0.83823	0.93881	1.00000
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

线路两端的三相短路故障、变电站主变故障和电厂故障等故障下福园上寨北侧区域内所有主要母线的暂态电压越限积分 TVI 如表 4-4 所示，以下只列出编号在前 15 个的故障形态的总 TVI。

表 4-4 福园上寨北侧区域部分主要故障的总 TVI

故障编号	故障简称	$\sum_{i=1}^N TVI_i$
1	博冯线（博罗侧）	0.03114
2	博冯线（冯屋侧）	0.03864
3	博金线（博罗侧）	0.03113
4	博金线（金源侧）	0.03891
5	博九线（博罗侧）	0.03118
6	博九线（九谭侧）	0.03840
7	博昆线（博罗侧）	0.03112
8	博昆线（昆山侧）	0.03876
9	博罗-横沥线(博罗侧)	0.01530
10	博罗-横沥线(横沥侧)	0.01720
11	博罗主变跳闸	1.183719
12	博仰线（博罗侧）	0.031126
13	博仰线（仰天侧）	0.038221
14	博义线（博罗侧）	0.031169
15	博义线（义和侧）	0.038028
⋮	⋮	⋮

通过计算确定属于福园上寨北侧区域的严重故障集有博罗主变跳闸、上寨主变跳闸以及博罗-横沥线(博罗侧)、鹅博线（鹅城侧）、枫龙线（枫树坝侧）、福园-东莞线（东莞侧）等三相短路故障,严重故障总数为 15。

4.3.2 仿真验证

在江门圭峰区域，选择圭峰主变跳闸故障、香山-顺德的顺德侧和顺德-吉安线吉安侧发生三相短路故障作为验证筛选该区域内电压失稳严重程度判断正确与否的例子，其中圭峰主变跳闸故障和香山-顺德的顺德侧发生三相短路故障属于计算筛选得到的严重故障集。圭峰主变跳闸故障的总暂态电压越限积分为 1.021075，香山-顺德的顺德侧发生三相短路故障的 TVI 为 0.072444，顺德-吉安线吉安侧发生三相短路故障的 TVI 为 0.037627。香山-顺德的顺德侧故障与圭峰主变跳闸故障的相关性为 0.25192、与顺德-吉安线吉安侧故障的相关性为 0.8263，圭峰主变跳闸故障与顺德-吉安线吉安侧故障的相关性为 0.243042，由于香山-顺德的顺德侧故障和顺德-吉安线吉安侧故障的相关性较强，因此选择会导致系统电压失稳严重的香山-顺德的顺德侧故障作为严重故障。且圭峰主变跳闸故障易导致电压失稳严重，对比与香山-顺德的顺德侧故障的相关性不高，也作为严重故障。对上述三个故障分别进行仿真，这里只展示区域中的两处母线的电压变化

情况，仿真实例地理位置如图 4-3 所示，图中箭头位置为三处故障，画圈位置为仿真母线地点。

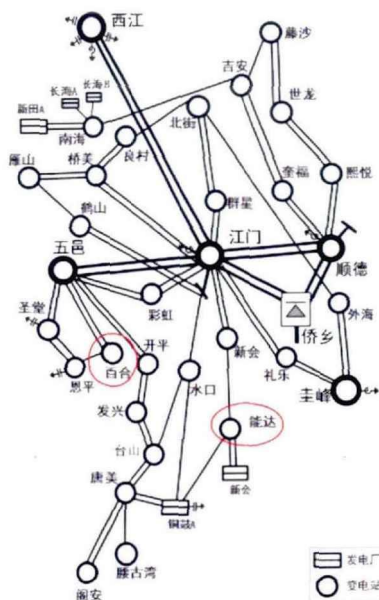


图 4-3 江门上峰区域地理接线图

具体故障后电压仿真图形如图 4-4 所示，仿真曲线与计算结果较为吻合。

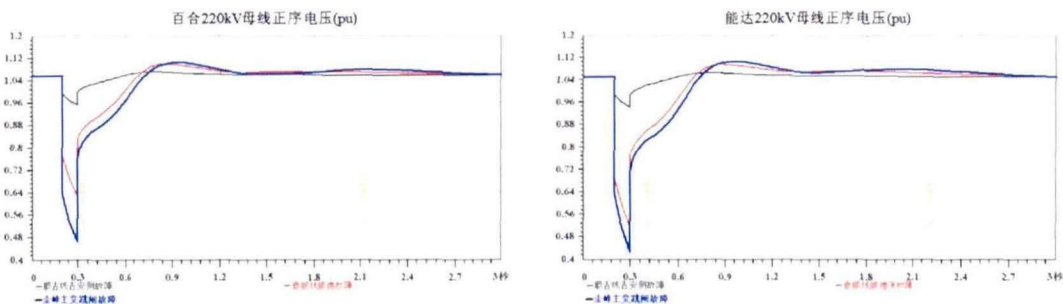


图 4-4 故障后能达和百合母线电压仿真图

在福园上寨北闸区域，选择上寨主变跳闸故障、枫龙线的龙川侧和青福线的青塘侧发生三相短路故障做为验证筛选该区域内电压失稳严重程度判断正确与否的例子，其中上寨主变跳闸故障和枫龙线的龙川侧发生三相短路故障属于计算筛选得到的严重故障集。上寨主变跳闸故障的总暂态电压越限积分为 2.177132，枫龙线的龙川侧发生三相短路故障的 TVI 为 0.047081，青福线的青塘侧发生三相短路故障的 TVI 为 0.042018。枫龙线的龙川侧发生故障与上寨主变跳闸故障的相关性为 0.295229、与青福线的青塘侧故障的相关性为 0.901405，上寨主变跳闸故障与青福线的青塘侧故障的相关性为 0.309507，由于枫龙线的龙川侧发生故障和青福线的青塘侧故障的相关性较强，因此选择会导致系统电压失稳严重的枫龙线的龙川侧故障作为严重故障。且上寨主变跳闸故障易导致电压失稳严重，对比与枫龙线的龙川侧故障的相关性不高，也作为严重故障。对上述三个故障分别进行仿真，这里只展示区域中的两处母线的电压变化情况，仿真实例地理位置如

图 4-5 所示，图中箭头位置为三处故障，画圈位置为仿真母线地点。

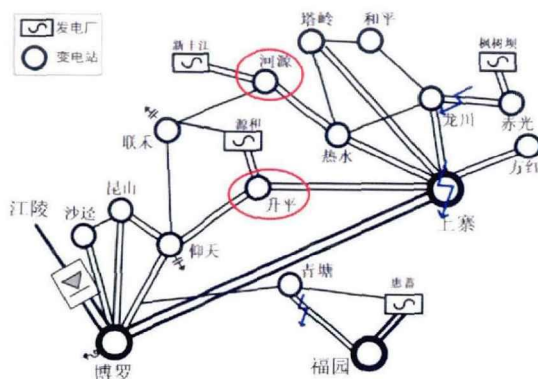


图 4-5 部分福园上寨北侧区域地理接线图

具体故障后电压仿真图形如图 4-6 所示，仿真曲线与计算结果较为吻合。

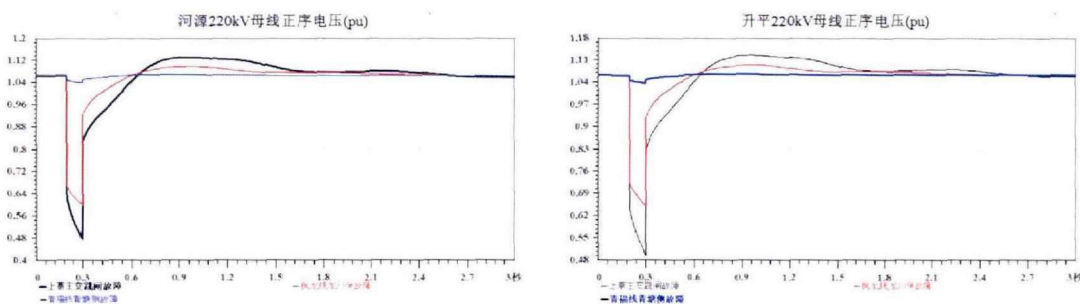


图 4-6 故障后河源和升平母线电压仿真图

4.4 本章小结

为了研究动态无功补偿优化配置对受扰系统的影响，针对交直流电网，在考虑换相失败的基础上，首先分析了交直流电网在大扰动下的电压变化情况。利用暂态电压越限积分评估电压波动情况，用来描述节点电压不稳定严重度，提出了筛选导致电压降落的严重故障集的方法。分析过程加入了直流系统换相失败的影响因素，能够较好地反应交直流电网实际故障的动作过程，同时为进一步研究动态无功补偿优化配置提供了良好的环境，最后通过计算与仿真验证了分析方法的正确性。

第 5 章 动态无功补偿多目标优化配置方法

为了使动态无功补偿控制器更好的加入电网, 在提高系统稳定运行能力的同时, 往往不能忽略经济投资等因素, 提升动态无功补偿优化配置的性价比, 因此优化配置方案需要考虑多个目标。目前国内外的较为成熟的研究成果大多是对单一类型补偿控制器进行优化配置^[36,37], 而随着 FACTS 技术的不断成熟, 将有多种类型的控制器应用于电网, 因此需要考虑不同类型控制器的优化配置方法。在优化方法的选择方面, 很多专家学者利用电网结构特性、电气参数等基本优化方法^[38], 同时智能算法在优化问题方面的应用也越来越普及^[39]。基本优化方法能够有针对性的解决某种目标的优化问题, 有局限性, 而智能算法也存在参数确定困难、局部最优等问题。因此对动态无功补偿控制器的多目标优化配置研究仍需不断完善。

针对交直流电网存在的电压稳定性问题, 具体分析动态无功补偿设备提供动态电压支持的能力, 同时考虑经济花销的问题, 选择两种典型的动态无功补偿设备, 建立多目标优化配置模型。在基本优化分析的基础上, 提出利用智能算法解决动态无功补偿控制器的安装类型、地点和容量的选择问题的方法, 确定动态无功优化配置方案的有效性。

5.1 多目标数学优化模型的建立

多目标数学优化问题 (Multi-objective Optimization Problem, MOP) 在评价优化方案时通常考虑两个及以上的目标, 在本文研究的动态无功补偿优化配置问题中, 不仅要考虑改善电网在暂态情况下电压稳定情况, 而且要考虑尽可能的减少动态无功补偿控制器的投资花销, 使配置方案更加贴近实际应用。

多目标优化问题的数学模型一般表示如下:

$$\begin{aligned} \min F(x) &= \min [f_1(x) \ f_2(x) \ \cdots \ f_q(x)]^T \\ \text{s.t. } g_u(x) &\geq 0 \ (u = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (5-1)$$

其中, $\min F(x)$ 表示对向量目标函数 $F(x)$ 中的 q 个目标函数同等的极小化, 决策变量可以有 n 个, 约束函数有 m 个。

多目标优化问题中各目标之间由于决策变量的联系而相互影响制约, 对其中一个目标性能的优化一般以其他目标作为代价, 而且每个目标的度量单位基本不一致, 因此很难有效地评价多目标优化问题结果的优劣性。

多目标优化问题的求解一般有三大思路, 可以归结如下:

- (1) 多目标函数优先处理法,也就是在优化求解之前,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,传统处理方法可以是主要目标法、线性加权法、极大极小法、功效系数法等,需要根据多目标函数的特点对其进行适当的处理,使其在转化过程中更具客观性。
- (2) Pareto 优化求解法,也就是得到不同目标函数的最优解前沿,组成 Pareto 最优解集,再由决策人员根据实际情况及要求选择一个或多个解作为最终的最优解。
- (3) 决策和算法交替进行法,也就是利用智能算法为决策人员提供新解,决策人员给优化进程提供优化目标方向,通过不断的交替互动,渐进地达到优化目的。

在本文所要解决的动态无功补偿优化配置问题中,不仅需要满足功率平衡等系统约束,而且需要考虑无功补偿加入系统的动态约束。另外 FACTS 控制器的配置位置属于整数决策变量,因此该问题属于一个较为庞大的混合整数、非线性和非凸优化问题。

5.1.1 动态无功补偿控制器模型

第 2 章的研究分析表明,在并联补偿型控制器中,STATCOM 对系统稳定运行的改善优于 SVC,虽然设备配置成本高于 SVC,但是其应用于实际、普及的前景不容小觑。在本文的研究中,选择 SVC 和 STATCOM 作为动态无功补偿装置,下面说明建立的无功补偿器模型。

1、SVC 模型

较为实用的 SVC 由并联的感性支路和容性支路组成,且至少有一部分是可控的。可控的感性支路一般为晶闸管控制电抗器(TCR),可控的容性支路一般为晶闸管投切电容器(TSC)。可控部分只有 TCR 的 SVC 在需要实现从额定感性无功到容性无功的调节时,TCR 的容量需要为额定容量的 2 倍,造成了器件容量上的浪费;而可控部分只有 TSC 的 SVC 只能提供阶梯变化的无功功率,连续性较差。把二者组合起来形成的晶闸管投切电容-晶闸管控制电抗型无功补偿器(TSC-TCR 型 SVC),可以克服上述两种缺点,其单相结构示意图如图 5-1 所示。

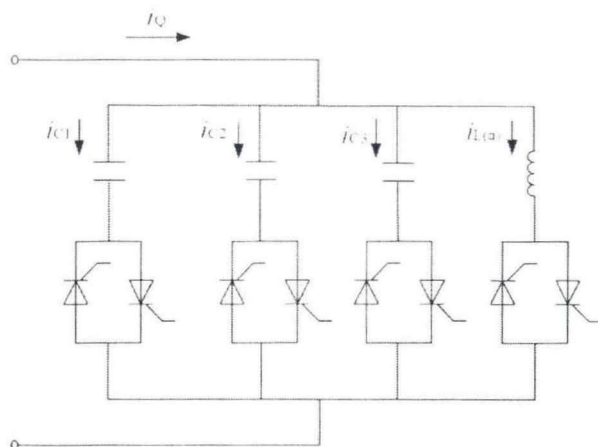


图 5-1 TSC-TCR 型 SVC 单相结构图

额定电压下，当所有 TSC 支路（如 n 条）投入而 TCR 支路断开时，输出最大无功功率 Q_{\max} ；当投入 k 条 TSC 支路，同时调节 TCR 支路的延迟触发角 α 时，可控制 SVC 输出 $\frac{k-1}{n}Q_{\max} \sim Q \sim \frac{k}{n}Q_{\max}$ ；当 TCR 支路投入而所有 TSC 支路断开时，通过控制 TCR 来获取所需要输出的感性无功，输出最大的感性无功功率为 Q_{\min} 。

本文选取的 SVC 控制模型如图 5-2 所示， V_1 为系统侧控制节点的实际电压幅值， DV 为电压偏差，通过自动控制环节输出补偿等效导纳 B_{SVS} ，因此有 SVC 补偿系统的无功功率 $Q = V^2 B_{SVS}$ 。

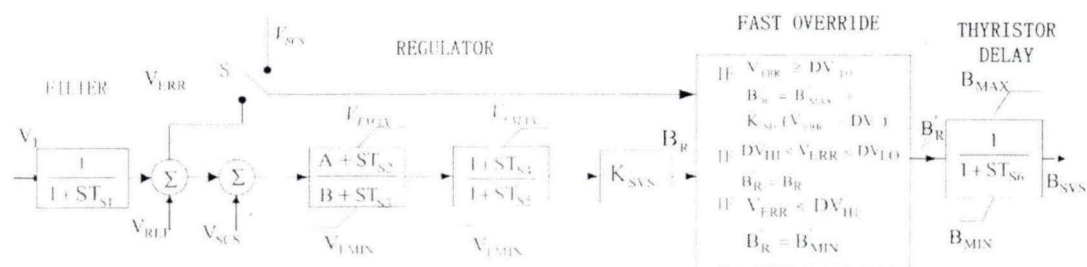


图 5-2 SVC 控制系统模型

2、STATCOM 模型

STATCOM 的主电路包括作为储能元件的电容和基于电力电子器件的电压源型变换器(voltage sourced converter, VSHC)。变换器通过连接电抗(或变压器)接入系统，简化模型见图 5-3 图 1 中， U_1 表示系统母线电压， U_2 表示变换器输出电压， I 和 U_1 分别表示系统流向 STATCOM 的电流和在电路上产生的压降， $R + jX$ 表示 STATCOM 与电网之间连接电抗器的阻抗， U_{dc} 和 i_{dc} 分别表示 STATCOM 直流侧的电容电压和电流。

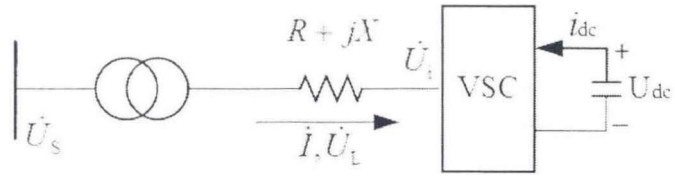


图 5-3 STATCOM 简化模型

如果忽略变换器的损耗，将 STATCOM 的输出等效成“可控”电压源 \dot{U}_i ，系统看成理想电压源 \dot{U}_s 。当 $|\dot{U}_i| > |\dot{U}_s|$ 时，从系统向 STATCOM 流入的电流相位超前系统电压一定角度，STATCOM 工作于“容性”区，输出感性无功；当 $|\dot{U}_i| = |\dot{U}_s|$ 时，系统与 STATCOM 之间的电流为零，二者之间没有无功交换；当 $|\dot{U}_i| < |\dot{U}_s|$ 时，从系统向 STATCOM 流入的电流相位滞后系统电压一定角度，STATCOM 工作于“感性”区，吸收感性无功。STATCOM 基本工作原理见图 5-4。

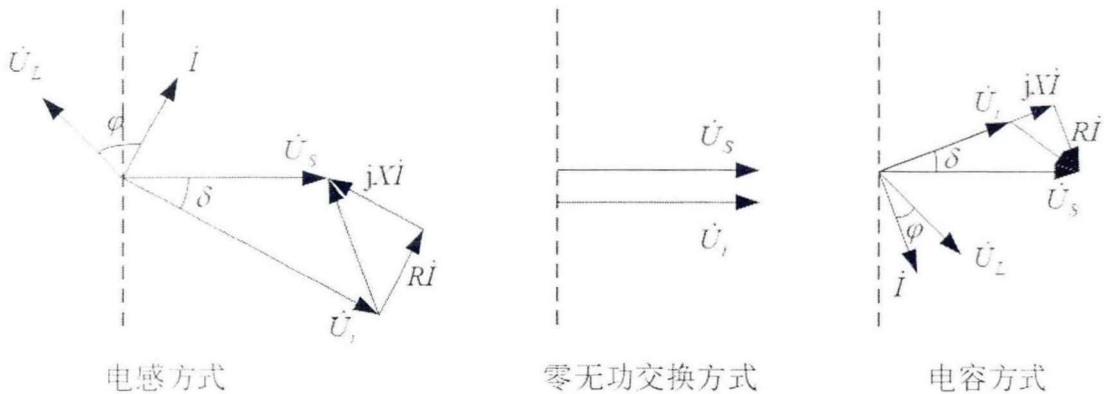


图 5-4 STATCOM 工作原理

选取 STATCOM 具体的控制模型如图 5-5 所示， I_s 为 STATCOM 注入控制节点的电流幅值， V 为 STATCOM 侧的实际电压幅值， V_T 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 $S = VI_s$ ，其注入的视在功率可视为 STATCOM 的容量。

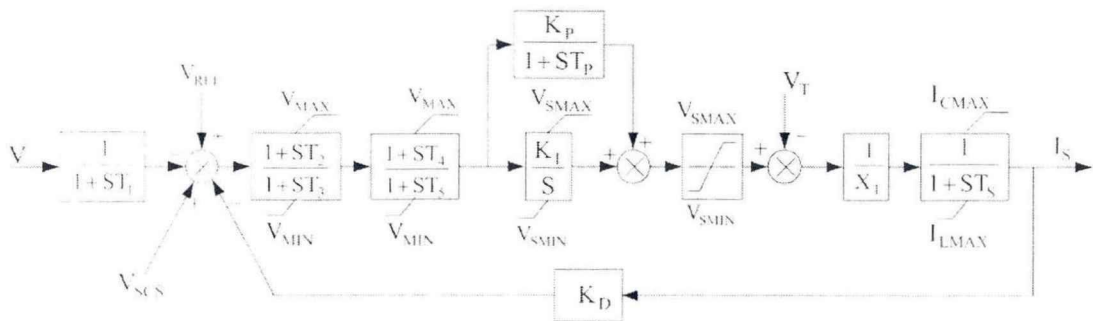


图 5-5 STATCOM 控制系统模型

5.1.2 多目标优化模型的确定

描述电力系统电压稳定性问题的动态约束方程如式(5-2)所示,其中 x 表示系统的状态变量, y 表示系统的代数变量。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= w(x, y) \\ g(x, y) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (5-2)$$

微分方程描述了包括考虑阻尼绕组的发电机动态过程、励磁系统 PID 控制动态过程、电力系统稳定器控制过程、带调速器的原动机动态过程、感应马达的动态过程、直流系统的恒功率-恒电压控制过程和 FACTS 控制器 (SVC 或 STATCOM) 动态过程。等式约束 $g(x, y) = 0$ 包括电力系统网络方程、发电机平衡方程和用多项式形式表示的静态负荷平衡方程模型^[40]。其中在电力系统网络方程中,接入 SVC 的节点处并联电抗 ΔB_s , 接入 STATCOM 的节点的注入电流为 $I' = I + I_s$ 。不等式约束 $h(x) \leq 0$ 包括发电机有功无功出力最大或最小值限制、负荷有功无功消耗最大或最小值限制、线路输送功率限制以及 SVC 或 STATCOM 接入容量范围。

为了更好的使动态无功补偿的配置方案有助于缓解交直流电网面临的暂态稳定问题,同时为了使配置方案更符合实际应用的意义,就不能忽略配置动态无功补偿装置的经济成本问题,因此选取动态无功补偿装置对系统电压的提升能力和配置动态无功补偿装置的经济成本两个方面作为优化的目标函数。

1、系统电压稳定提升能力

动态无功补偿装置接入电网之后,会改变系统的运行状态。由于本文对于系统电压稳定性比较感兴趣,同时考虑到配置动态无功补偿装置的容量、类型的变化,会导致电网母线电压的改变,所以研究动态无功补偿注入后,系统各个母线电压较未进行无功补偿之前的改善情况。鉴于本文的主要目的是为了提高系统在大扰动下的稳定性,通过评估故障发生并且保护动作后的一段时间内系统的电压变化情况,能够较好的反映系统暂态电压稳定性,因此选择在每个时刻动态无功补偿对系统节点电压的提升的轨迹变化,即轨迹灵敏度指标 (trajectory sensitivity index, TSI), 作为评判系统电压稳定提升能力的指标,如图 5-6 所示,阴影面积为考察时间段中电压提高指标。

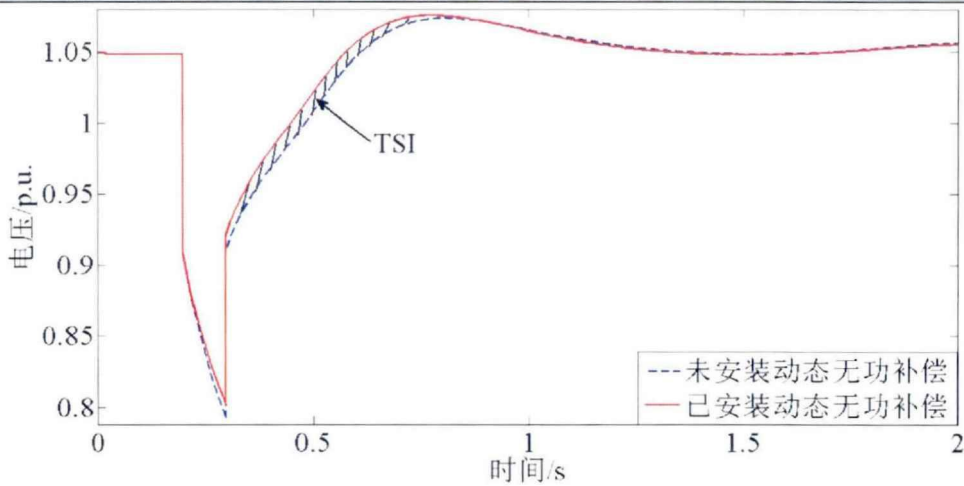


图 5-6 轨迹灵敏度指标示意图

通过故障后安装动态无功补偿设备前后的电压恢复快慢的差别，来反映动态无功补偿装置对系统电压稳定性的提高能力，需要考虑不同母线节点权重、采样时刻权重以及选取的故障权重 H_{ij} 。由于不同时刻电压变化情况通过对一段时间内的电压积分的处理，已经考虑进轨迹灵敏度指标中，所以不赋予采样时刻的权重，也就是说采样时刻权重取为 1。在本文提出的动态无功补偿优化配置策略中，首先通过第二章中对具有直流落点的交流电网的电气节点进行分群，从电网自身结构的角考虑了不同母线节点在反映系统电压稳定性中的权重，即把相互影响、电气距离较近的节点归纳在一起进行处理，减少了在全网中对不同节点赋权重的繁琐且具有主观性的工作。因此提出能够反映系统电压稳定提升能力的优化目标函数 f_1 如下：

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_t} [W_{ij} \sum_{j=1}^n (\sum_{t=1}^N U_{ij}(t, Q_0 + \Delta Q_{FACTS}) - U_{ij}(t, Q_0))] \quad (5-3)$$

其中， ΔQ_{FACTS} 表示配置无功补偿设备后注入系统的无功功率； N_t 表示计算的时间段时刻的总数量； n 表示计算轨迹灵敏度指标含盖的节点总数； H_{ij} 表示故障权重，通过对每个分区的严重故障的电压越限积分进行归一化处理，第 j 个故障权重计算表达式见式(5-4)； N_f 表示选取的考察故障总数。

$$H_{ij} = \frac{TTU_{ij} - \min(TTU_{ij})}{\max(TTU_{ij}) - \min(TTU_{ij})} \quad (5-4)$$

需要说明的是，在选取计算节点时，考虑到故障地点有可能位于分区边缘附近，因此在扩大每个分区选取的电压响应节点，即边缘有线路连接的节点也纳入电压响应计算。

2、经济成本

本文动态无功补偿优化配置的目标是在提高系统电压稳定性的同时，最大程度的减少安装无功补偿设备的经济成本。通常来说，安装动态无功补偿设备的经

济成本包括固定安装成本和可变成本, 无功补偿设备的容量与投资成本不成线性关系^[4]。根据文献[42]和文献[43]提出的动态无功补偿配置经济花销函数关系, 给出 SVC 和 STATCOM 的大体经济成本函数如下所示:

$$\begin{aligned} C_{\text{SVC}} &= 0.002s_{\text{v}}^2 - 2.04112s_{\text{v}} + 852.1722 \\ C_{\text{STATCOM}} &= 0.00378s_{\text{c}}^2 - 3.84426s_{\text{c}} + 1604.988 \end{aligned} \quad (5-5)$$

其中, 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, 单位为元/MVar; s_{v} 和 s_{c} 分别表示 SVC 和 STATCOM 的总运行容量, 单位为 MVar。

安装某种容量的 SVC 或 STATCOM 的总经济成本如图 5-7 所示。

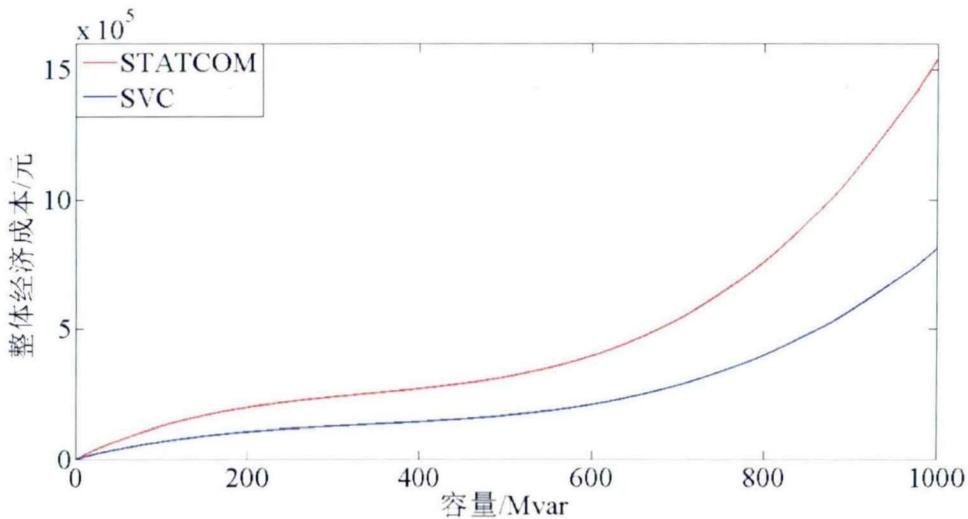


图 5-7 SVC 和 STATCOM 的经济成本曲线

因此提出配置动态无功补偿装置的经济成本优化目标函数 f 如下:

$$f = J(a, C_1, s_1) \quad (5-6)$$

其中, a 表示安装动态无功补偿设备的数量, J 表示安装补偿设备的总经济花销; C_1 表示安装补偿设备的单位容量经济成本; s_1 表示动态无功补偿设备的总运行容量。

综上, 动态无功优化配置的多目标问题描述如下:

$$\begin{cases} f(x) = \max[f_1, \frac{1}{f_2}] \\ \frac{dx}{dt} = w(x, y) \\ g(x, y) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

式中, $f(x)$ 表示优化的多目标函数, 微分方程、等式约束以及不等式约束为式(5-2)描述的电力系统动态约束。

5.1.3 基于改进灵敏度指标的建模

一般的多目标优化问题包含有不同本质的目标函数，由于不同目标函数切入角度不同、单位也大相径庭，不适于利用加权的方法进行统一，或相互之间进行简单的比较。分析本文研究的两个优化目标函数，一个是动态无功补偿设备能够提高系统电压稳定性，而提高性能的高低与无功补偿设备的容量有关系，另一个是安装动态无功补偿设备所需要的经济成本，也与补偿设备的容量密切相关。

在式(5-3)提出的灵敏度指标中，分母为安装的动态无功补偿设备的无功补偿容量，没有纳入无功补偿容量的经济成本。因此，考虑到安装动态无功补偿的主要目的是改善系统稳定性，本文提出以提升系统电压稳定能力为基础，加入经济成本因素的改进灵敏度指标函数（见式(5-8)，记为 TSI_C ），将优化配置的多目标问题转化为单目标优化问题。

$$TSI_C = \sum_{l=1}^{N_F} [W_{Fl} \sum_{i=1}^n (\sum_{k=1}^{N_k} \frac{U_{i,l}(t_k, Q_0 + \Delta Q_{FACTS}) - U_{i,l}(t_k, Q_0)}{s_F \cdot C_F})] \quad (5-8)$$

式中， s_F 表示无功补偿设备的总容量，单位为 Mvar； C_F 表示无功补偿设备的单位容量成本，单位为元/Mvar。

因此该动态无功补偿优化问题转化为寻找式(5-9)为目标函数的最优解的问题，其余的关于系统的微分方程、等式约束和不等式约束不变。

$$\max f(x) = \max(TSI_C) \quad (5-9)$$

上述目标函数的建立表明，安装的动态无功补偿装置的容量越大，经济成本越高，可维持系统的电压稳定性也会提升。但是如果经济成本提升的比例大于电压稳定性提升的比例，则会导致目标函数值下降，而远离最优解；相反的，如果经济成本升高的比例小于电压稳定性提升的比例，则目标函数值会增加，不断接近最优解。需要说明的是，为了消除不同目标数据之间的单位限制，便于不同单位或量级的目标值能够进行较好的比较，本文首先将不同目标值转化到同一数量级，然后对不同目标值进行 atan 函数转换，即利用式(5-10)来实现数据的归一化。

$$x^* = \text{atan}(x) \cdot 2 / \pi \quad (5-10)$$

其中， x^* 表示归一化之后的数值， x 表示实际数值。

基于改进灵敏度指标建立的目标函数模型能够很好的结合评估提升系统电压稳定性能力和经济成本花销量方面的因素，简化了问题的复杂程度，降低了优化求解的工作量。

5.2 基于改进帝国竞争算法的优化求解

20 世纪后期，人们通过借鉴其他学科知识，发展了智能优化算法，即以全域

优化问题为研究对象, 基于概率论和随机理论, 按照某种规则或思想进行全域搜索, 最终得到满足一定要求的结果。目前应用较为广泛的几种智能算法有遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等。其中, 遗传算法是美国密歇根大学的 J. Holland 教授提出的一种并行随机搜索最优化方法, 该算法基于生物进化论并模拟了自然界遗传机制^[44]; 粒子群优化算法是由 Eberhart 和 Kennedy 博士根据对鸟群捕食的行为研究而提出的^[45]。以上算法属于生物启发的计算, 而在社会启发计算方面, 帝国竞争优化算法(Imperialistic Competitive Algorithm, ICA)是一种基于帝国主义殖民竞争机制的新型优化算法, 它受到帝国主义竞争和人类社会政治进化的启发, 在全局寻优方面有较好的改进, 并具备扩展和开发的空间。有研究表明帝国竞争优化算法在求解涉及整数的最优问题方面要优于其他较为常用的智能算法^[46], 如粒子群算法、蚁群算法、遗传算法等。

5.2.1 帝国竞争算法流程

通常来讲, 帝国竞争算法具有初始帝国群体生成、帝国实力计算、同化政策作用、帝国之间的竞争等步骤, 有研究学者对其进行相应的改进^[47], 其基本优化流程如图 5-8 所示。

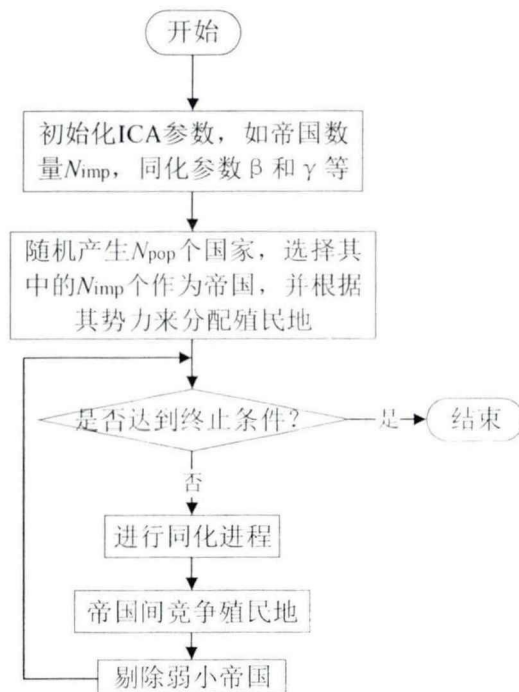


图 5-8 帝国竞争算法基本流程图

帝国竞争优化算法模拟了帝国之间竞争吞并的过程, 可覆盖优化范围内的所有个体。在图 5-8 所示的步骤中, 优化过程由一个随即产生的群体开始, 群体中的每一个都代表一个国家, 所有的国家被分为两类: 帝国主义国家和殖民地。帝国主义国家是初始化时最强的几个国家, 其余的国家就是帝国主义国家的殖民地。

殖民地在初始化时被归给初始确定的帝国主义国家。每个国家的实力显示了这个国家的适应性。在迭代与优化过程中，帝国主义国家相互竞争来获得更多的殖民地。更强大的帝国主义国家将得到更多的殖民地，弱小的帝国主义国家则会失去殖民地。当所有的殖民地都归属于同一个帝国主义国家时，算法结束。下面对几个重要步骤进行具体说明。

1、初始化帝国

对于具有 N 个决策变量的优化问题，在搜索空间内随机生成 N_{pop} 个 N 维向量，这些向量称为国家，这些国家随机的分布在要搜索的空间里，这些国家势力的大小通过一个代价函数 $f(x)$ 来衡量，与代价函数值成反比，即代价函数值越小，国家势力越大。 N_{imp} 个势力较大的国家被选作帝国主义国家，剩下的 N_{col} 个国家作为殖民地国家。帝国主义国家的相对代价值 C_i 计算如式(5-11)所示， c_i 表示第 i 个帝国主义国家的代价函数值，由代价函数值计算得来。

$$C_i = c_i - \max_{i=1}^{N_{pop}}(c_i) \quad (5-11)$$

根据帝国主义国家势力的大小，把殖民地国家分配给帝国主义国家。殖民地国家的分配方式和数量 $N_{c,i}$ 如式(5-12)所示。

$$N_{c,i} = \text{round}(p_i \cdot N_{col}) \quad (5-12)$$

式中， $p_i = \left| \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right|$ 表示帝国主义国家的相对势力。

一个帝国主义国家及其分到的殖民地国家组成一个帝国。

2、同化进程

在现实世界里，帝国主义国家为了更好地控制其殖民地国家，把自己的文化及规则推广到殖民地国家，这个过程称为同化。在 ICA 算法中，即殖民地国家在搜索空间中的位置向帝国主义国家所在的位置靠近，沿两个位置连线所在的直线偏移 θ 角度，随机移动一定的距离 x ， θ 和 x 定义如式(5-13)所示。殖民地国家所在空间位置移动后，可能是一个更好的位置，从而取代其所属的帝国主义国家成为该领域的统治者。

$$\begin{aligned} \theta &\sim U(-\gamma, \gamma) \\ x &\sim U(0, \beta d) \end{aligned} \quad (5-13)$$

其中， γ 和 β 为参数， $0 < \gamma < \pi$ ， $\beta > 1$ ， d 为殖民地和帝国主义国家之间的距离。

3、帝国主义国家间的竞争

在社会历史中，帝国主义国家通过占有别的帝国主义国家所属的殖民地来增加自己的势力。在算法中，竞争机制主要是依据每个帝国的总势力来判断被竞争殖民地国家的出处，整个帝国的总代价越大，总势力越小，最弱的帝国中代价函

数值越大的殖民地国家将要被竞争，计算帝国总代价的具体表达式如式(5-14)所示。

$$Tc_i = c_i + \xi \times \frac{\sum_{j=1}^{N_{c,i}} c_j}{N_{c,i}} \quad (5-14)$$

式中， Tc_i 为第*i*个帝国的总代价； ξ 为反映殖民地国家对整个帝国势力的影响情况的参数， $0 < \xi < 1$ ，大多数情况取 $\xi=0.1$ ^[48]； $N_{c,i}$ 表示第*i*个帝国拥有的殖民地国家数目。

为了遵循总势力强的帝国占有被竞争的殖民地国家概率较大的原则，同时考虑到给其他帝国创造占有该殖民地国家的机会，使随机概率参与选择最终占领帝国的过程，具体选择计算方法如下所示，计算时刨除筛选出来的最弱帝国。

$$TC_i = Tc_i - \max_{i=1}^n(Tc_i)$$

$$P_i = \left| \frac{TC_i}{\sum_{i=1}^n TC_i} \right| \quad (5-15)$$

$$P_{imp} = [P_1 - r_1, \dots, P_i - r_i, \dots, P_n - r_n], \quad r_1, r_2, \dots, r_n \sim U(0,1)$$

式中， TC_i 为第*i*个帝国的相对总代价； P_i 为依据相对成本计算的第*i*个帝国占领殖民地国家的概率； P_{imp} 为考虑随机概率后帝国占领殖民地的概率。

竞争的结果是把总势力最弱的帝国中最弱的殖民地国家给 P_{imp} 中概率最大的帝国。

4、最弱的帝国灭亡

当一个帝国主义国家丧失了其所有的殖民地国家时，其所在的帝国覆灭。经过一定的时间之后，所有帝国中最强大的帝国保存下来，而且保存下来的最强大的帝国中只有一个帝国主义国家和殖民地国家，这个帝国主义国家就代表最优解；或者算法达到最大迭代次数，则终止计算，剩余的帝国主义国家代表最优解。

5.2.2 帝国竞争算法的改进

在基本的 ICA 算法中，结合社会情况的复杂性和多样性，考虑了同化进程中殖民地国家自身经验指导信息、殖民地国家自我更新变革的机制和帝国主义国家联盟合并的情况，对上一节所述的帝国竞争算法进行改进。

1、改进同化机制

在殖民地国家每一次迭代同化过程中，会出现同化后的势力不如原来势力的

情况,有必要参考之前势力最大时所处的状态,使移动进程更好地向最优解移动。因此在每个殖民地国家同化的过程中,通过比较,保留自身经历过的最优位置 Col_{best} 。提出改进同化过程:按式(5-13)进行位置移动后,再以当前位置 Col 与历史最优位置连线所在的直线偏移 θ' 角度,随机移动一定的距离 x' , θ' 和 x' 定义如式(5-16)所示。

$$\begin{aligned} \theta' &\sim U(-\gamma, \gamma) \\ x' &\sim U(\beta(Col_{best} - Col)) \end{aligned} \quad (5-16)$$

在本文研究的动态无功补偿优化配置问题中,由于动态无功补偿安装地点属于整数型决策变量,同时考虑到在实际中动态无功补偿设备的总容量一般为整数,所以该问题视为在整数型搜索空间中寻找最优解。殖民地国家按式(5-13)和式(5-16)移动后,得到的位置信息每一维按四舍五入取值作为最终的同化移动结果。

2、殖民地国家变革机制

借鉴差分进化算法中变异的思想,在 ICA 算法中引入殖民地变革机制,以一定变革概率使殖民地国家自我更新,有助于增加国家群的多样性,避免早熟收敛,从而保证帝国竞争算法的有效性。为了使算法在初期可以进行大范围搜索,在中后期通过减小变革概率来改进收敛效率,变革概率 P_{MR} 按式(5-17)计算。

$$P_{MR} = P_0 \cdot (1 - j / N_{loop})^m \quad (5-17)$$

其中, P_0 表示算法初始变革概率, j 表示当前迭代次数, N_{loop} 表示最大迭代次数, m 为变革参数。

某殖民地国家 Col_0 位置变革方法如式(5-18)所示。

$$Col = Col_0 + F(Col_{r2} - Col_{r1}) \quad (5-18)$$

其中, Col 表示殖民地国家变革后的位置; Col_{r1} 和 Col_{r2} 为随机产生的殖民地国家位置; $F = \text{gaussian}(x, \sigma)$ 表示缩放概率函数, x 为 Col_{r1} 中的决策变量,取 σ 为搜索空间每一维长度的 0.1 倍,一般认为 σ 取此值时效果最好^[49]。

如果变革后殖民地国家的势力大于变革前的势力,则更新殖民地国家位置,否则变革失败。

3、帝国主义国家合并

随着帝国主义国家和殖民地国家不断向最优目标前进,某些帝国主义国家会移动到相近的位置,可以认为这些国家的统治情况类似,可形成友好联盟。为了加快 ICA 算法的收敛速度,减少计算量,提出帝国主义国家合并方法。如果两个帝国主义国家之间的距离小于某一初始化参数距离(初始化参数距离的设定根据优化问题的具体情况而定),它们将会合并成一个新的帝国,原来两个帝国的殖民地国家都成为新帝国的殖民地,新帝国的帝国主义国家位置将由原来两个帝国主义国家中势力较大的取代。

提出改进后的帝国竞争算法流程如图 5-9 所示。

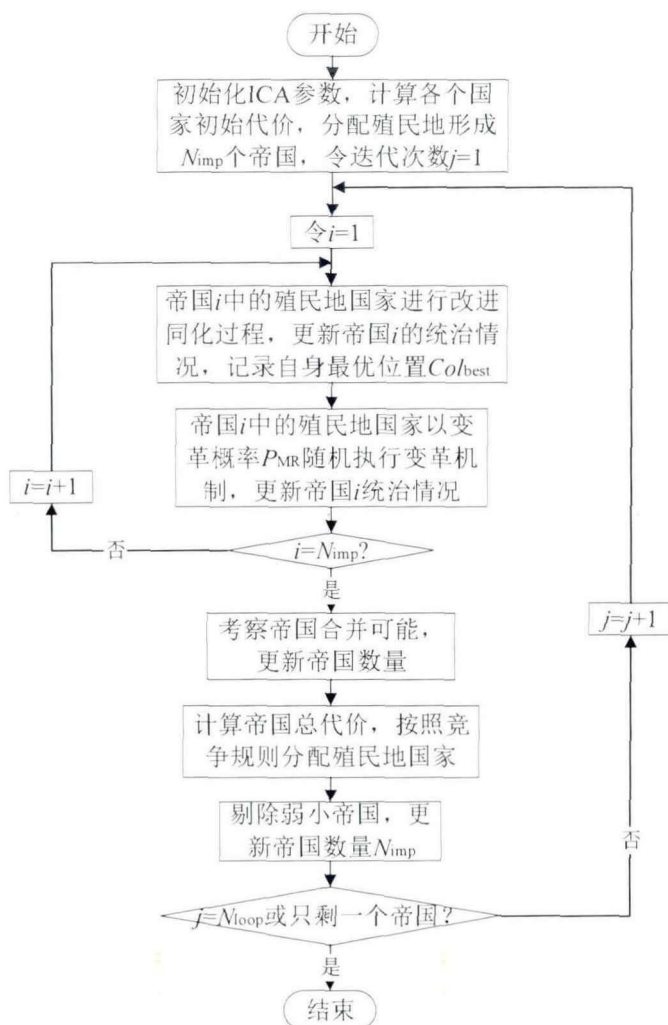


图 5-9 改进帝国竞争算法步骤

5.2.3 基于改进帝国竞争的优化配置计算方法

按照 5.1 节所述, 优化模型中的决策变量包括动态无功补偿设备类型的选择, 无功补偿配置地点和无功补偿容量。其中, 无功补偿配置地点受地域范围的限制, 无功补偿容量也因实际生产的限制而具有上限值。如果把不同安置地点进行编号, 可安置地点的最大编号记为 N_{bmax} , 则对设备配置地点的约束描述如下:

$$\begin{aligned} h_1(k) - k - N_{bmax} &\leq 0 \\ h_2(k) - 1 - k &\leq 0 \end{aligned} \quad (5-19)$$

式中, k 表示无功补偿设备安装的地点编号。

对无功补偿容量的约束描述如下:

$$\begin{aligned} h_3(s) - s - S_m &\leq 0 \\ h_4(s) - s &\leq 0 \end{aligned} \quad (5-20)$$

式中, s 表示无功补偿设备的安装容量, S_m 表示无功补偿设备可安装容量的最大值。

在动态无功补偿设备类型的选择方面, 分别对 STATCOM 和 SVC 进行优化配置, 最后综合结果再进行进一步选择得出结论。

由于上述给出的优化 ICA 算法没有对决策变量进行约束, 即搜索空间没有限制, 所以利用罚函数法^[1], 给出优化 ICA 算法中的代价函数如式(5-21)所示:

$$f(k,s) = -TSI_t(k,s) + \sum_{i=1}^4 M \max[0, h_i(k,s)] \quad (5-21)$$

式中, $TSI_t(k,s)$ 由式(5-8)计算得到; M 为罚因子, 取很大的正数。

为了基于扰动下电压的动态变化过程对无功补偿设备进行优化配置, 本文利用电力系统分析软件 PSD-BPA 建立 STATCOM 或 SVC 无功补偿前后的模型, 结合电力系统潮流约束和 STATCOM 或 SVC 控制约束, 计算得到电压变化动态过程, 用以计算代价函数值。由于本文在 MATLAB 上运行改进 ICA 算法, 为了实现 PSD-BPA 将代价函数值传递给 MATLAB 进行寻优, 同时 MATLAB 将决策变量值传输给 PSD-BPA 进行建模计算代价函数值, 在 Windows 系统上利用 DOS 语言对 PSD-BPA 和 MATLAB 进行了相互调用, 解决了二者之间数据实时交互的问题。利用暂态计算数据和优化帝国竞争算法, 解决该动态无功补偿优化配置问题的计算方法流程框图如图 5-10 所示。

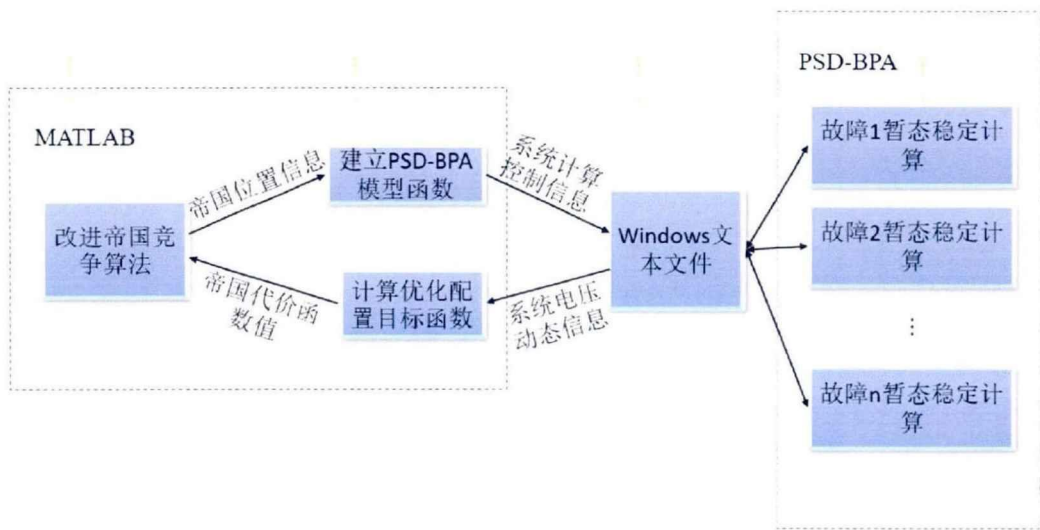


图 5-10 基于改进帝国竞争的优化配置计算方法框图

该基于改进帝国竞争的优化配置计算方法综合了 MATLAB 强大的数据处理能力和 PSD-BPA 较为准确的计算仿真优势, 实现了利用暂态计算数据解决动态无功补偿优化配置问题。

5.2.4 动态无功补偿配置方法

本文提出的动态无功补偿配置方法，首先通过对系统结构的分析，评估节点电压稳定的关联度，缩小动态无功补偿控制器配置地点的范围，并粗略确定配置数量和地点，使得交直流电网的动态无功补偿优化配置问题逐步精简为小区域的动态无功补偿优化配置问题；其次基于暂态稳定分析，对区域电网处于大扰动的状态进行研究，筛选出区域电网中的电压失稳关键事故集；最后在各个区域电网内部，利用改进帝国竞争算法求解该多目标优化问题，最终综合得到交直流电网动态无功补偿的优化配置方案。动态无功补偿配置方法的流程图如图 5-11 所示。

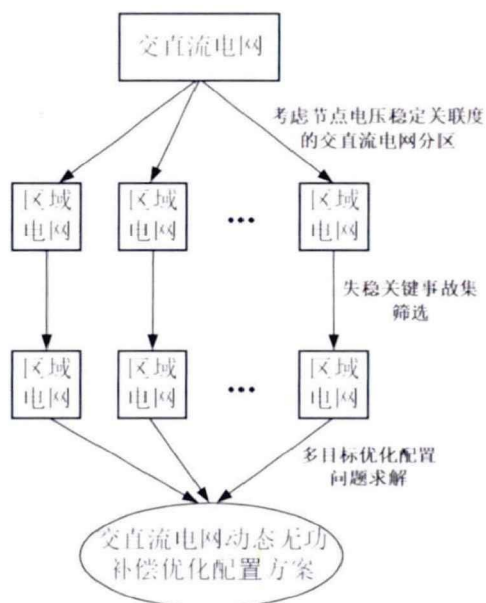


图 5-11 动态无功补偿配置方法的流程图

5.3 实例验证

5.3.1 实例计算

在基于改进帝国竞争算法的优化配置计算中，选择随机生成 $N_{pop}=200$ 个由动态无功补偿配置地点和配置容量构成的二维向量，设置初始帝国主义国家 N_{imp} 为 8 个，在同化机制过程中取角度变化范围参数 γ 为 0.5，距离改变范围参数 β 为 2；在变革机制过程中取变革参数 m 为 2，算法初始变革概率 P_0 为 0.5。下面针对广州电网中的江门丰峰区域进行具体说明。

对江门丰峰区域中 SVC 进行最优配置求解，改进 ICA 算法前后的收敛曲线如图 5-12 所示。改进后的 ICA 算法比改进前先获取最优解，改进后的 ICA 算法得到的 SVC 优化配置方案为在唐美变电站 C 对 LANGMI-E 220kV 母线进行控制，接入 52MVar 的 SVC，其代价函数值为 -0.991。

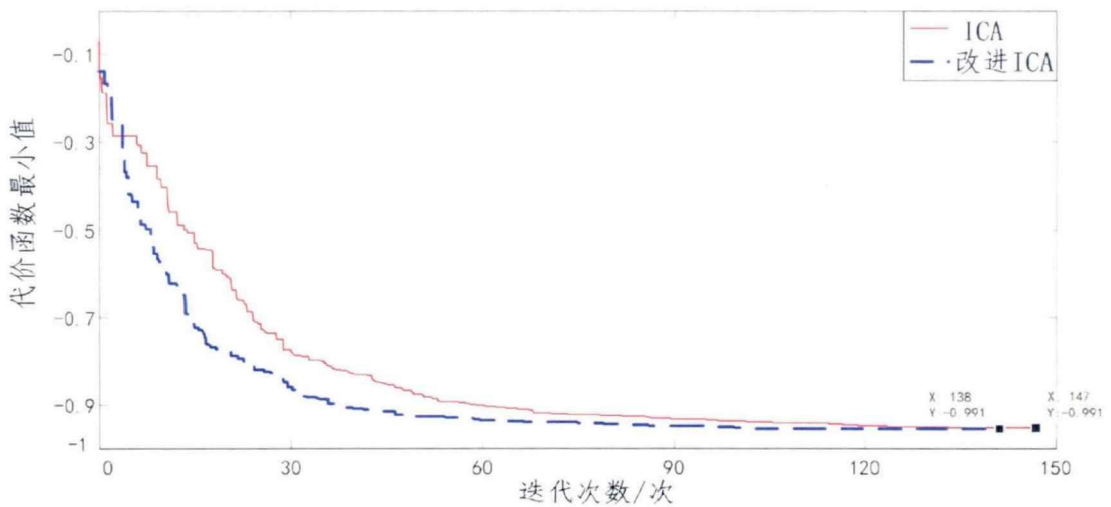


图 5-12 对江门丰峰区 SVC 配置的改进 ICA 前后收敛曲线对比

对该区域的 STATCOM 进行最优配置求解，对比改进前 ICA 算法和改进的 ICA 算法的收敛曲线如图 5-13 所示，可以看到改进前的 ICA 算法在 150 次迭代后还没有达到最优解，改进后的 ICA 算法收敛速度比改进前加快了，且能够在迭代次数较少的情况下得到最优结果。计算得到在唐美变电站出口处接入 169MVar 的 STATCOM（对 TANGMEI 220kV 母线进行控制）对提升电压稳定性最优，其代价函数值为-0.938。

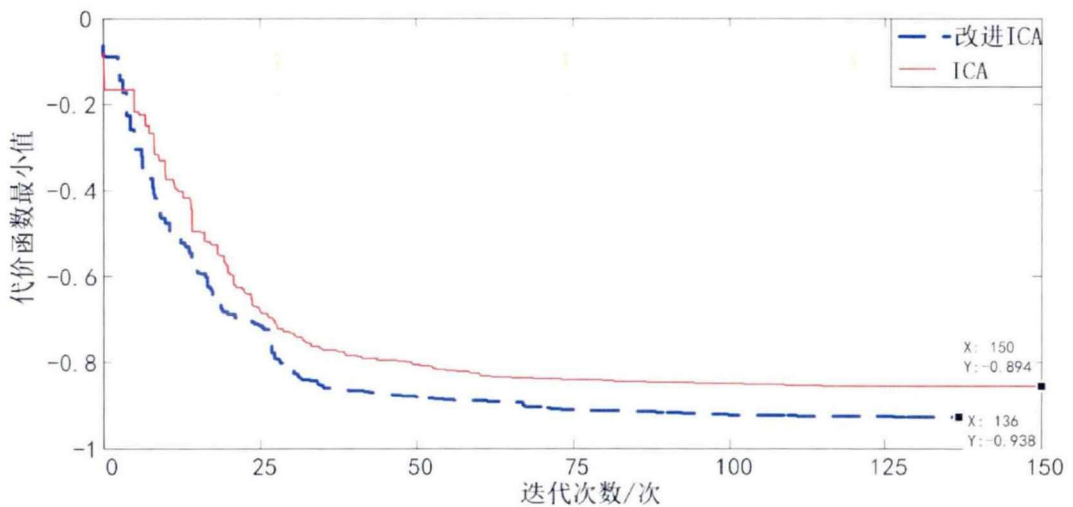


图 5-13 对江门丰峰区 STATCOM 配置的优化 ICA 前后收敛曲线对比

由于对江门丰峰区中两种类型的动态无功补偿设备最优配置的代价函数有同样的物理意义，对比最后的最优结果，在兼顾提升暂态电压稳定性和配置经济性两个方面的前提下，配置最优的 SVC 结果好于配置最优的 STATCOM。最终得到广州电网中其余各区域动态无功补偿的优化配置方案如表 5-1 所示。

表 5-1 广州电网各区域动态无功补偿优化配置方案

区域	SVC 配置方案	配置 SVC 的代价值	STATCOM 配置方案	配置 STATCOM 的代价值
江门圭峰区	TANGMEI 出口接 52MVar	-0.991	TANGMEI 出口接 169MVar	-0.938
茂名蝶呤西南区	DENGGAO 出口接 60Mvar	-0.951	DENGGAO 出口接 134Mvar	-0.936
砚都玉城西区	JIANYUN 出口接 76MVar	-0.978	JIANYUN 出口接 76MVar	-0.954
北郊增城互联部分区域	QINGYUAB 出口接 70MVar	-0.979	QINGYUAB 出口接 190MVar	-0.940
狮洋文山区	HUANGPUC 出口接 57MVar	-0.996	HUANGPUC 出口接 138MVar	-0.938
珠海加林区	ZHUCHANG 出口接 53MVar	-1.000	ZHUCHANG 出口接 140MVar	-0.938
木棉横沥区	BJ3 220kV 出口接 48MVar	-1.005	BJ3 220kV 出口接 155MVar	-0.939
福园上寨北区	LIANHE 出口接 61MVar	-0.978	LIANHE 出口接 36MVar	-0.983
宝安象山区	CHANGANB 出口接 59MVar	-0.961	CHANGANB 出口接 165MVar	-0.934
鹏城紫荆南区	HUANGGAN 出口接 63MVar	-0.946	HUANGGAN 出口接 98MVar	-0.939
鲲鹏茅湖互联部分区域	WUTONG 出口接 79MVar	-1.003	WUTONG 出口接 120MVar	-0.949
禛州区	QIANFAN 出口接 50MVar	-0.927	QIANFAN 出口接 34MVar	-0.952
榕江嘉应东北区	LAIAN 出口接 71MVar	-0.972	LAIAN 出口接 192MVar	-0.938

表 5-1 中配置方案的代价值越小,配置方案的性能越优。优化配置结果表明,为了兼顾提升暂态电压稳定性和配置经济性两方面,有些区域配置 SVC 较好,有些区域配置 STATCOM 较好。

5.3.2 仿真验证

为了验证动态无功补偿配置结果的有效性,本文选取广州电网中的江门圭峰区域作为仿真对象,验证时选择导致系统电压失稳严重的故障情况,本文设置腰古湾-唐美线路上靠近腰古湾变电站的一侧发生三相短路故障(故障时间设为 0.2s 时刻),0.1s 后故障切除。

为了考察动态无功补偿设备配置后电网电压变化情况,选择离配置地点不远的彩虹变电站(CAIHONG)的母线电压进行仿真,地理位置如图 5-14 所示。

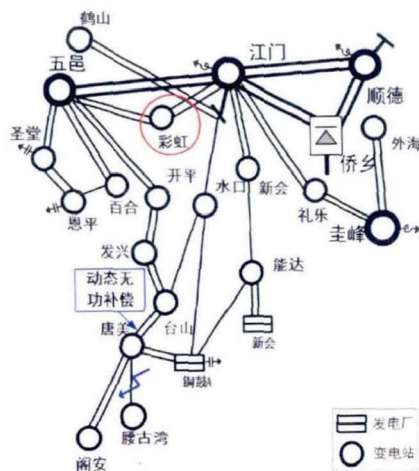


图 5-14 仿真地点地理位置图

首先验证 STATCOM 配置地点的较优性,选择最优配置地点附近的位置进行比较配置,并进行了电压仿真对比。图 5-15 为在故障后未配置 STATCOM 以及分别在唐美、台山和铜鼓母线接入 169Mvar 容量的 STATCOM 的彩虹母线的正序电压仿真图。同时为了对比接入相同容量的 STATCOM 和 SVC 对系统电压的恢复情况,图 5-15 中也展示了在唐美母线接入 169Mvar 容量的 SVC 的彩虹母线电压变化情况。

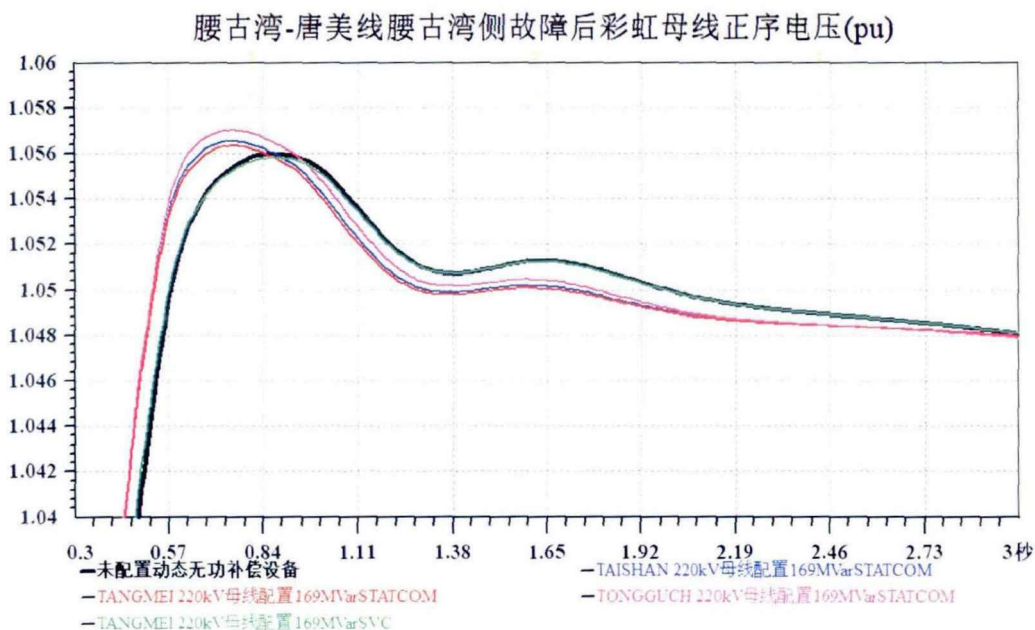


图 5-15 不同地点配置 STATCOM 前后 CAIHONG 处暂态电压对比

从图中可见在 TANGMEI 处设置容量为 169MVar 的 STATCOM 能够使电压在故障后恢复速度较快,且不出现较大峰值;同时在后续阶段能够使电压较快的恢复到稳定水平。在相同配置容量下, SVC 配置方案中节点电压恢复速度改善不

明显, 而代替配置 STATCOM 后, 能够较好的提高系统电压恢复水平, 并且较快的恢复到稳定水平, 增大了系统暂态稳定裕度。

为了验证 STATCOM 配置容量的较优性, 对在同一地点唐美 220kV 变电站出口分别安装 100MVar、169MVar 和 238MVar 的 STATCOM 进行仿真, 得到彩虹母线的电压变化情况如图 5-16 所示

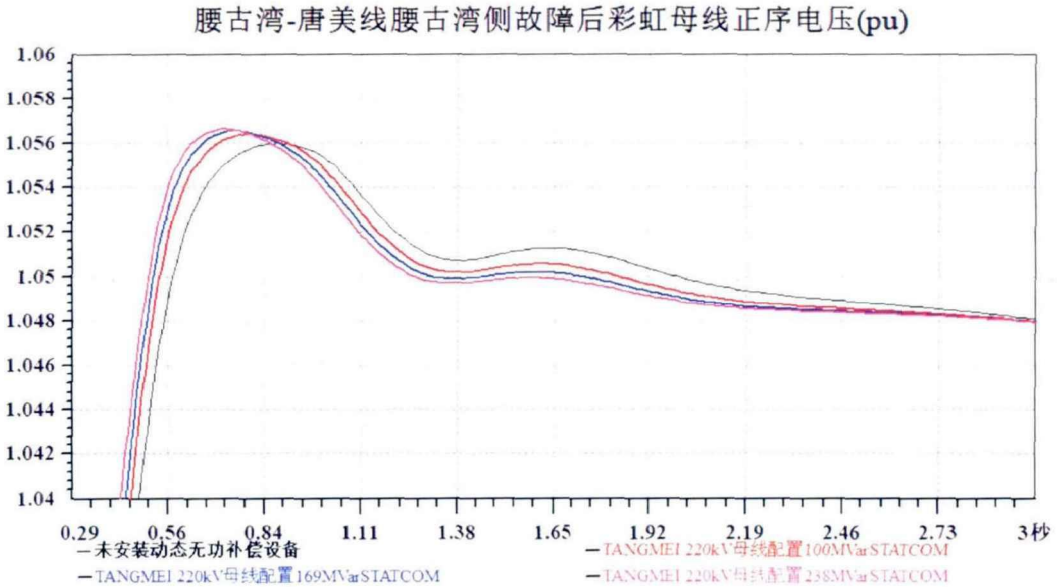


图 5-16 配置不同容量 STATCOM 前后 CAIHONG 处暂态电压对比

仿真显示, 配置 169MVar 的 STATCOM 对电压改善情况优于配置 100MVar 的 STATCOM; 而当配置容量再提升同一差额后, 电压改善幅度有所降落, 同时由于 STATCOM 容量的提升会导致经济成本大幅升高, 如表 5-2 所示, 配置更高容量的 STATCOM 性价比不高, 此与优化配置的结果相符

表 5-2 STATCOM 不同配置容量的经济成本

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

在验证 SVC 配置地点的较优性时, 选择在故障后未配置 SVC 以及分别在唐美、台山和铜鼓母线接入 52Mvar 容量的 SVC 进行仿真, 得到母线电压变化情况如图 5-17(a)所示。在验证 SVC 配置容量的较优性时, 仿真在唐美分别安装 52MVar、169MVar 和 350MVar 的 SVC 如图 5-17(b)所示, 图中也加入了在唐美安装 52MVar 的 STATCOM 的对比曲线。

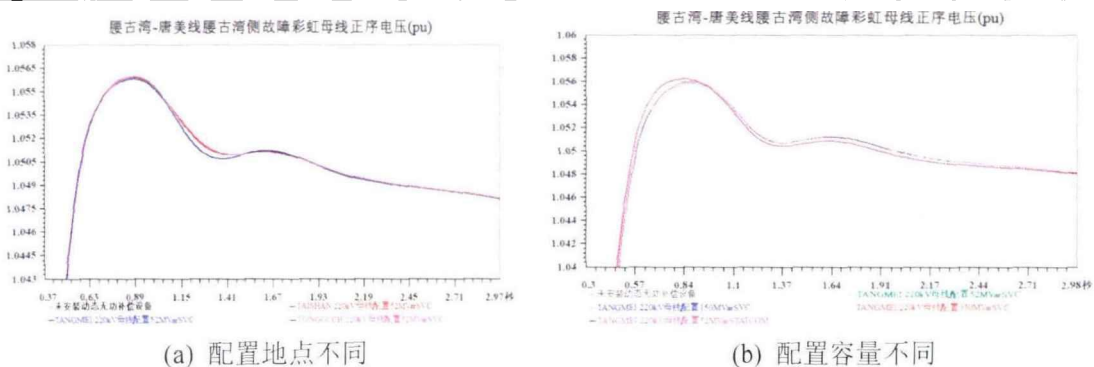


图 5-17 配置不同 SVC 前后 CAIHONG 处暂态电压对比

图 5-17(a)中，由于配置 52MVar 的 SVC 容量较小，所以仿真时对电压提升改善性不明显，但是也能看到在唐美母线进行补偿时，对电压在故障切除后的电压提升性以及恢复到稳定状态的速度性较其余两个地方好。图 5-17(b)表明，配置更高容量的 SVC 在该仿真情况下对电压改善提升情况不大，具体原因是配置更高容量的 SVC 实际无功输出提升不高，导致配置更高容量的浪费。因此在该算例中，没有必要配置太高容量的 SVC。而对比 STATCOM 配置方案，由于有经济成本方面的影响，配置 SVC 更胜一筹。

在本文的优化过程中，认为在对每个区域优化时，因为无功补偿具有局部补偿特性，电气距离较远的周边区域对优化的区域内部影响很小，可以不考虑周边区域配置动态无功补偿的影响。为了检验周边区域配置动态无功补偿设备对本区域内部节点的影响，对江门圭峰区域以及周边相邻区域均配置最优的 STATCOM 时的系统电压变化情况进行仿真，与只在江门圭峰区域配置 STATCOM 进行对比，仿真情况如图 5-18 所示。

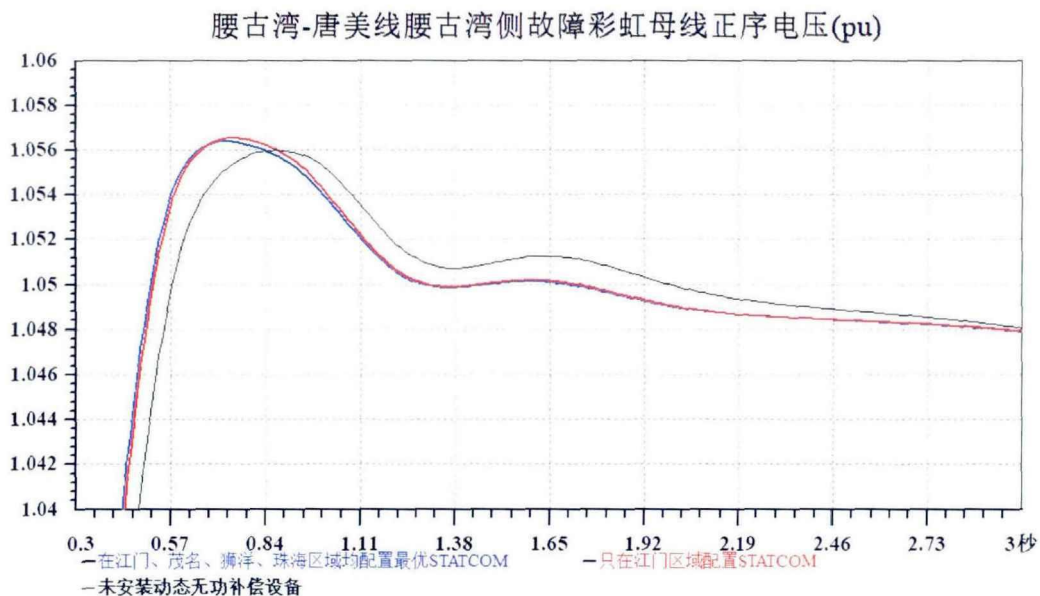


图 5-18 周边区动态无功补偿配置对 CAIHONG 处暂态电压的影响对比

结果表明, 周边区域配置 STATCOM 对该区域内部节点电压有一定的改善作用, 相比于只在该区域内部配置 STATCOM 对系统电压稳定更好, 但是影响不大。因此区域内部电压改善主要靠区域内的动态无功补偿, 说明了本文提出的优化方法的正确性。

通过实例计算与仿真发现, 配置同等容量的 SVC 和 STATCOM 时, 从本文优化的目的来看, 配置容量较大时 STATCOM 的整体性能优于 SVC, 配置容量较小时 SVC 的整体性能优于 STATCOM; 而对比 SVC 和 STATCOM 各自最优的配置方案时, 大部分情况下 SVC 的整体性能好于 STATCOM, 其主要优势因素是经济成本偏低。

5.4 本章小结

本文研究的目的是为了改善系统暂态电压稳定情况, 在优化配置时需要考虑动态无功补偿前后系统电压的变化情况。本章在第三章节初步确定动态无功补偿区域之后, 同时在上一章节明确了严重故障集的环境下, 基于第二章节分析的无功补偿理论以及第三章节的灵敏度分析方法的基础, 建立了考虑系统电压改善情况和经济成本的多目标数学优化模型。分析了该动态无功补偿优化配置问题的特性之后, 对帝国竞争算法进行了改进, 提出了基于改进帝国竞争算法的优化求解方法。对广东电网进行了实例计算与仿真, 得到了相应的动态无功补偿优化配置方案, 验证了模型和算法的有效性。

第 6 章 总结与展望

当前对动态无功补偿优化配置问题的绝大部分研究,都是在交流电网的背景下进行具体分析的,没有考虑直流输电工程加入的影响因素。电网遭受大扰动后发生的不稳定事故,大多数是由于部分节点电压大幅下降,进而导致不可控连锁事故。动态无功补偿方式能够满足快速调节交直流电网电压稳定性的要求,对相关设备进行优化配置有助于改善系统的运行情况。本文针对交直流电网动态无功补偿优化配置问题进行研究,不同于将系统状态线性化后进行优化的手段,提出了适用于该问题的多阶段优化方法。完成的核心工作如下:

1) 基于并联型 FACTS 设备工作原理,分析了其对提高系统电压稳定性的效果,以及暂态情况下对系统整体稳定性的改善,同时对比分析了 STATCOM 和 SVC 的工作性能,并具体列出了动态无功补偿对一些电网运行状态指标的影响,为优化问题的建模提供理论基础。

2) 通过分析交直流电网的电压稳定性问题,结合直流系统的工作特性和交直流系统的有功无功特性,建立了基于电压无功灵敏度的交直流电网电压稳定分析模型,来评估节点电压稳定的关联度,并提出基于密度聚类的交直流电网分区方法,完成了动态无功补偿优化配置问题的初步配置研究。通过对广东电网进行实例计算,并在 PSD-BPA 上对结果进行了验证,证明了研究方法的可靠性。

3) 考虑到交直流电网故障时直流系统发生换相失败的可能,分析了系统在大扰动下的电压变化情况,利用暂态电压越限积分评估电压波动情况,用来描述节点电压不稳定严重度,提出了筛选导致电压降落的严重故障集的方法,并验证了该分析方法的正确性,为进一步研究动态无功补偿优化配置问题提供条件。

4) 利用基于灵敏度分析方法初步确定动态无功补偿区域后,在明确了严重故障集的环境下,结合动态无功补偿设备的基本工作原理,考虑无功补偿对系统电压的改善情况和经济成本两个方面,建立了多目标优化模型。分析两个目标的关联程度,形成了基于轨迹灵敏度的优化目标。在完善了帝国竞争算法之后,提出了一种基于改进帝国竞争算法的优化求解方法。通过在 PSD-BPA 上建立模型,验证了模型和算法的有效性。

针对交直流电网动态无功补偿的优化配置问题,本文提出的多阶段配置研究方法,是利用电网拓扑结构、交直流系统的准稳态特性以及系统运行的暂态信息,一步步优化得到补偿配置结果。为了贴近实际生产应用需要,本文在优化配置问题中考虑了经济成本的影响因素,而获取的经济成本函数是参考国外相关文献提出的平均水平,可能与当前实际经济成本有出入,在具体实施应用时需根据实际

情况进行调整，以获取最佳的动态无功补偿配置方案。

在优化问题的模型建立方面，未考虑动态无功补偿设备具体控制参数(如比例积分倍数等)的不同对系统的影响，相同设备控制特性的不同可能会影响系统的稳定性，可以在建立优化配置模型时考虑其控制特性，提高模型的精度。在优化求解方面，对帝国竞争的优化算法在动态无功补偿优化问题中的应用进行了初探，在优化多目标时，还需对目标进行简化处理，如果进一步深入研究，完善优化算法在模型中的应用，计算过程中的工作量还可进一步减少。

参考文献

- [1] 舒印彪,刘泽洪,高理迎等. $\pm 800\text{kV}$ 6400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术,2006,(01):1-8
- [2] 刘海峰,徐政,金丽成. 世界远距离大容量高压直流输电工程可靠性调查综述[J]. 高压电器,2002,(03):1-4,6
- [3] 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
- [4] 徐政,杨靖萍,高慧敏. 南方电网多直流落点系统稳定性分析[J]. 高电压技术,2004,(11):21-23,26
- [5] 杨镝. 特高压直流输电系统可靠性及其对交流系统的影响[D]. 上海交通大学, 2011
- [6] 赵彤,吕明超,娄杰等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. 电网技术,2015,39(03):705-711
- [7] 郭小江,马世英,卜广全等. 上海多馈入直流系统的无功控制策略[J]. 电网技术,2009,33(07):30-35
- [8] 邱一苇,吴浩,宋永华等. 考虑静态并联无功补偿的发电机无功储备优化方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(18):31-36,48
- [9] 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
- [10] 谢小荣,姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:1-63
- [11] 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
- [12] Taylor C W. Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse[M]. CIGRE,1995:50-80
- [13] Kunder P. Power system stability and control[M]. 北京:中国电力出版社, 2002: 351-354
- [14] 刘彦呈,王川,魏一. 电力系统大扰动下暂态电压稳定的动态特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011(10): 11-17

- [15] Praprost K L, Loparo K A. An energy function method for determining voltage collapse during a power system transient[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1994,V41(10): 635-651
- [16] 曹旌. 基于模式识别的电力系统暂态稳定评估技术的研究[D]. 天津大学,2005
- [17] H. Mehrjerdi, S. Lefebvre, M. Saad, et al. Coordinated control strategy considering effect of neighborhood compensation for voltage improvement in transmission systems[J]. IEEE Trans. Power Syst.,2013,V28(4):4507-4515
- [18] 杨柳青,刘明波,林舜江. 控制分区中含有多个先导节点的静态电压稳定裕度计算[J]. 电网技术,2013,37(05):1346-1352
- [19] Song S H, Lim J U, Moon S II. Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security[J]. Electric Power Systems Research, 2004, V70(1):7-15
- [20] 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,2007,27(34):7-11
- [21] Sapkota B, Vittal V. Dynamic var planning in a large power system using trajectory sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,V25(1): 461-469
- [22] Wildenhues S, Rueda t L, Erlich I. Optimal Allocation and Sizing of Dynamic Var Sources Using Heuristic Optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,V30(05):2538-2546
- [23] Xia R, Hu Z, Zhou Q. Optimal planning of dynamic VAR compensation based on transient voltage stability analysis[A]. 2014 International Conference on Power System Technology [C]. IEEE,2014:916-921
- [24] Mangaiyarkarasi S P, Sree Renga Raja T. Optimal location and sizing of multiple static VAR compensators for voltage risk assessment using hybrid PSO-GSA algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering. 2014,V39(11):7967-7980
- [25] 尤翠莲,马红艳,苏珂. 运筹学基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2018
- [26] 李庚银. 电力系统分析基础[M]. 机械工业出版社, 2011
- [27] P. Lagonotte, J. C. Sabonnadiere, J.Y. Leost, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Trans. Power Systems,1989,V4(02):479-486
- [28] M. Daszykowski, B. Walczak, D. L. Massart. Looking for Natural Patterns in Data. Part 1: Density Based Approach[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2001,V56(02):83-92

- [29] L. Duan, D. Xiong, J. Lee, et al. A Local Density Based Spatial Clustering Algorithm with Noise[A]. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C]. IEEE,2006,V5:8-11
- [30] 项响琴,李红,陈圣兵. CLIQUE 聚类算法的分析研究[J]. 合肥学院学报(自然科学版),2011,21(01):54-58,66
- [31] Alex Rodriguez, Alessandro Laio. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Science, 2014,V344(6191):1492-1496
- [32] Louhichi S , Gzara M , Hanène Ben Abdallah. A density based algorithm for discovering clusters with varied density[A]. Computer Applications & Information Systems[C]. IEEE, 2014:1-6
- [33] DL 755-2006. 电力系统安全稳定导则[S]. 北京:中国标准出版社,2001
- [34] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社, 2010
- [35] 郑德如. 回归分析和相关分析[M]. 上海:上海人民出版社,1984
- [36] 赵渊,杨晓嵩,谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化,2012,36(01):55-60
- [37] 李海深,刘明波,林舜江. 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(05):69-76,80
- [38] D. Shakib, G. Balzer. Optimal location and control of shunt FACTS for transmission of renewable energy in large power systems[A]. Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference[C]. IEEE,1998:890-895
- [39] S.R.Najafi, M. Abedi, S. H. Hosseinian. A novel approach to optimal allocation of SVC using genetic algorithms and continuation power flow[A]. 2006 IEEE International Power and Energy Conference[C]. IEEE,2006:202-206
- [40] Thierry van Cutsem, Costas Vournas. Voltage Stability of Electric Power System [M]. New York:Springer Science+Business Media,1998
- [41] 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(02):88-94
- [42] 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
- [43] L.J. Cai, I. Erlich, G. Stamtis. 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
- [44] 梁旭,黄明. 现代智能优化混合算法及其应用(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社,2014

-
- [45] Kennedyj, Eberhart R C. Particle swarm optimization[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Service Center,1995:1942-1948.
- [46] A. Rezaee Jordehi. Optimal allocation of FACTS devices for static security enhancement in power systems via imperialistic competitive algorithm (ICA)[J]. Applied Soft Computing,2016,V48:317-328
- [47] Lin J-L, Cho C-W, Chuan H-C. Imperialist competitive algorithms with perturbed moves for global optimization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,V284:3135-3139
- [48] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[A]. 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation[C]. IEEE,2007:4661-4667
- [49] 汪定伟. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,2007
- [50] 何郁波,马昌凤,田亚娟. 非线性互补问题的罚函数法[J]. 桂林电子工业学院学报,2005,25(06):61-63

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

(一) 发表的学术论文

- [1] 第一作者.送端系统对交直流系统输送功率极限的影响[J].电力系统自动化,2017,41(17):101-105+141(EI 收录号: 20174204272185)
- [2] 第一作者. A Two-Stage Optimization Method of Dynamic VAR Compensation for Multi-infeed HVDC-AC Receiving System[A]. The 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration[C]. Beijing,2018
- [3] 第二作者(除导师外).送受端系统短路比关系对直流输电系统最大输送功率的影响[J].现代电力,2018,35(04):45-51(中文核心刊源)
- [4] 第一作者. Start-up and Recovery Methods with HVDC Systems participation during AC/DC System Black-starts[J]. IET Generation, Transmission & Distribution(SCI 刊源一修)

(二) 申请及已获得的专利

- [1] 第一发明人(除导师外).“考虑直流输电系统启动顺序和恢复过程的系统恢复方法”,已受理.(受理号: 201711380063.4)

(三) 已获得的软件著作权

- [1] 第一作者(除导师外). 直流输电系统参与系统恢复的启动过程软件 V1.0. 已登记.(登记号: 2018SR111121)

攻读硕士学位期间参加的科研工作

[1] 广东电网公司电力调度控制中心：“交直流混联电网智能解列控制与自愈恢复技术研究(自愈恢复部分)”，2016.09-2017.11，主要参与人。

[2] 广东电网公司电力调度控制中心：“大电网解列后分区电网稳定分析及控制技术研究”，2016.09-2018.11，主要参与人。

致 谢

师门女子按常每届仅有一人，我有幸成为总舵下的一员。衷心感谢恩师在我读研期间对我的关心、指导与督促。恩师治学严谨，精益求精，或劳而忘食，或忙而无休，对其敬佩敬重之情常油然而生。我生性喜欢自由，而或出勤不能按时至，师叱咄，我不敢出一言以复。叱毕，视我领悟，教我求学之道。恩师亦常念门下学生生活之困，为我排忧解难，亦可称之为心灵导师。唯望恩师劳逸结合，爱惜身体，如此方能健康长久，永葆青春，履清华学子“为祖国健康工作五十年”之诺。

感谢师门下的兄弟姐妹，自我入师门以来，倍受鼓舞。前有我师兄严谨求实，不嫌我愚钝，传道授业解惑于我。后有我师弟辰时而作，四更而休，书每读至兴致之处，则废寝忘食也。平日，我师兄弟们互帮互助，其乐融融。同门皆着素衣，不慕他人人口体之奉，专心学术。华电校训，团结勤奋，求真创新，盖之如此。

感谢我父我母，成长过程中的一毫一厘离不开你们的关心和爱护，你们永远是我不断前进、激流勇进的动力和依靠。感谢予我关心、支持、批评和指正的家人朋友们，每一次赞扬和批评于我弥足珍贵，即便今后忙碌交织，我将永怀这份情谊。

我何德何能，逢此师门及家人友人因缘，不胜感激涕零，有感于此，作此文。唯借只纸片言，敬表谢意！