

分类号: TM732

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220310113



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 有源配电网智能软开关选址定容与
运行控制研究

论 文 作 者 王浩

指 导 教 师 葛愿 教授

学 科 (专 业) 电气工程

研 究 方 向 电力系统及其自动化

论文提交日期: 2025 年 6 月 5 日

分类号：TM732

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220310113

题 目 有源配电网智能软开关选址定容与运行控制研究

题 目 Research on Siting, Sizing, and Operation Control
of Soft Open Point in Active Distribution Networks

学 生 姓 名： 王浩

校 内 导 师： 葛愿 教授

专 业（领 域）： 电气工程

研究方向（领域）： 电力系统及其自动化

论 文 答 辩 日 期： 2025 年 5 月 11 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：王浩

日期：2025年6月5日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：王浩

指导教师签名：[Signature]

日期：2025年6月5日

日期：2025年6月5日

有源配电网智能软开关选址定容与运行控制研究

摘 要

在联合国第 75 届大会上，我国明确了碳达峰、碳中和的“双碳”战略目标，这一承诺标志着我国在全球气候治理中承担的重要责任，彰显了负责任的大国形象，同时也成为推动国内能源结构转型、产业升级和绿色低碳发展的重要驱动力。随着“双碳”战略的推进，配电网正朝着高比例可再生能源接入与智能化方向发展，期间将面临着风电、光伏出力的不可控，系统运行损耗增加，电压与频率调节难度增加等问题。智能软开关(Soft Open Point, SOP)作为有源配电网中的柔性互联装置，通过精准调控端口变流器的传输功率，实现对电力系统运行的高效控制，在优化潮流分布、提升供电可靠性与促进可再生能源消纳方面具有显著优势。本文从有源配电网内 SOP 的选址定容出发，针对分布式电源(Distributed Generation, DG)和电动汽车(Electric Vehicles, EV)大规模接入下的配电网运行优化和故障恢复进行研究，主要研究内容如下：

(1)有源配电网内 SOP 选址定容的研究。SOP 的应用旨在解决由于风机和光伏出力不确定性对电网造成的冲击，因此对发电场景的准确建模是关键，为解决大量 DG 间歇性出力对配电网造成的影响，研究了一种基于生成对抗网络(Generative Adversarial Nets, GAN)的有源配电网 SOP 规划方法。使用 GAN 生成风光出力场景，通过 SOP 的应用，实现配电网不同馈线间的柔性互联，减小电压波动和可再

生能源的高效消纳。

(2)基于 SOP 的有源配电网运行优化的研究。针对配电网内 EV 和 DG 的大规模接入,加剧了网内源荷功率不均衡和电压波动,通过引入 SOP 的功率调节能力,设计了考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化模型。为减少 SOP 的建设成本,提高传统调压设备的利用率,将 SOP 与多个电压调节装置协同配合,通过实时调节有功功率和无功功率,快速响应由于源荷功率变化造成的电压波动和功率损耗。

(3)基于 SOP 的有源配电网故障恢复研究。故障后的供电恢复对提升有源配电网的自愈能力具有重要意义,针对使用联络开关通过网络重构等恢复方法,会严重降低部分节点电压,影响供电恢复范围。通过使用 SOP 的功率传输和电压支撑能力,分析基于 SOP 的故障处理策略和对供电恢复的影响因素,设计一种兼顾负荷恢复比例和功率损耗的模型,为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

关键词: 智能软开关, 选址定容, 运行优化, 故障恢复, 有源配电网

Research on Siting, Sizing, and Operation Control of Soft Open Point in Active Distribution Networks

ABSTRACT

At the 75th United Nations General Assembly, China clarified its "dual-carbon" strategic goals of achieving carbon peaking and carbon neutrality. This commitment underscores China's significant responsibility in global climate governance, highlights its role as a responsible major nation, and serves as a crucial driver for domestic energy structure transformation, industrial upgrading, and green low-carbon development. With the advancement of the "dual-carbon" strategy, distribution networks are evolving toward high-proportion renewable energy integration and intelligent operation. However, challenges such as the uncontrollable output of wind and photovoltaic power, increased system losses, and growing difficulties in voltage and frequency regulation have emerged. As a flexible interconnection device in active distribution networks, the Soft Open Point (SOP) enables efficient control of power system operation through precise regulation of power transmission at converter terminals. It demonstrates significant advantages in optimizing power flow distribution, improving power supply reliability, and enhancing renewable energy accommodation. This paper focuses on the siting and capacity determination of SOPs in active distribution networks, investigating operational optimization and fault recovery in distribution networks under large-scale integration of Distributed Generation (DG) and Electric Vehicle (EV). The main

research contributions are as follows:

(1) Research on SOP Siting and Sizing in Active Distribution Networks. The application of SOP aims to address the grid impacts caused by the uncertainty of wind and photovoltaic power output, making accurate modeling of generation scenarios crucial. To mitigate the effects of intermittent DG on distribution networks, this study proposes a GAN-based SOP planning method for active distribution networks. Generative Adversarial Networks (GAN) are employed to generate wind and photovoltaic output scenarios. Through SOP implementation, flexible interconnection between different feeders in the distribution network is achieved, which reduces voltage fluctuations and enhances efficient accommodation of renewable energy sources.

(2) Research on SOP-based Operational Optimization of Active Distribution Networks. To address the exacerbated source-load power imbalance and voltage fluctuations caused by large-scale integration of electric vehicles (EVs) and distributed generation (DG) in distribution networks, this study develops an operational optimization model for active distribution networks considering EV charging loads by leveraging the power regulation capability of Soft Open Points (SOPs). Aiming to reduce SOP construction costs and enhance the utilization of conventional voltage regulation devices, a coordinated control strategy between SOPs and multiple voltage regulation equipment is proposed. Through real-time adjustment of active and reactive power, the system achieves rapid response to voltage fluctuations and power losses induced by source-load power variations.

(3) Research on SOP-based Fault Recovery in Active Distribution Networks. Post-fault service restoration is crucial for enhancing the self-healing capability of active distribution networks. Conventional methods employing tie switches through network reconfiguration may severely

depress nodal voltages and limit restoration scope. This study proposes an innovative approach by exploiting the power transfer and voltage support capabilities of Soft Open Points (SOPs). Through systematic analysis of SOP-based fault handling strategies and critical influencing factors, we develop a multi-objective optimization model that simultaneously maximizes load restoration ratio and minimizes power losses. The proposed methodology provides an economically viable, secure, and efficient solution for rapid network recovery under fault conditions, effectively addressing the voltage-quality degradation inherent in traditional restoration approaches.

Hao Wang(Electronic Engineering)

Supervised by Prof.Yuan Ge

KEY WORDS: Soft Open Point, Siting and Sizing, Operational Optimization, Fault Recovery, Active Distribution Network

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 有源配电网内 SOP 的选址定容研究现状	2
1.2.2 基于 SOP 的有源配电网运行优化研究现状	4
1.2.3 基于 SOP 的配电网故障恢复研究现状	6
1.3 论文主要研究内容及创新点.....	7
1.4 本文章节安排.....	8
第 2 章 基于生成对抗网络的有源配电网智能软开关规划方法.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 B2B VSC 型 SOP 原理.....	10
2.2.1 SOP 数学模型	10
2.2.2 SOP 控制策略	13
2.2.3 运行约束.....	14
2.3 基于 Wasserstein 距离的生成对抗网络.....	15
2.3.1 生成对抗网络原理.....	15
2.3.2 Wasserstein 距离.....	17
2.3.3 GAN 结构设计	17
2.4 SOP 规划模型	19
2.4.1 目标函数.....	19
2.4.2 约束条件.....	20
2.4.3 规划流程.....	21
2.5 算例分析.....	22
2.5.1 测试平台与算例系统.....	22
2.5.2 规划结果.....	22
2.6 本章小结.....	25
第 3 章 考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化.....	26
3.1 引言.....	26
3.2 电动汽车充电模型.....	26

3.3 基于 SOP 的有源配电网运行优化模型	29
3.3.1 运行优化模型.....	30
3.3.2 系统运行约束.....	31
3.4 模型转化.....	32
3.4.1 二阶锥规划模型.....	33
3.4.2 模型转化.....	33
3.5 算例分析.....	34
3.5.1 源荷场景生成.....	35
3.5.2 优化结果分析.....	36
3.6 本章小结.....	40
第 4 章 基于 SOP 的有源配电网故障恢复研究.....	41
4.1 引言.....	41
4.2 基于 SOP 的有源配电网故障恢复策略	41
4.2.1 SOP 故障恢复原理	42
4.2.2 基于 SOP 的配电网故障处理流程	42
4.2.3 影响 SOP 供电恢复因素分析	45
4.3 基于 SOP 的有源配电网故障恢复模型	46
4.3.1 数学模型.....	46
4.3.2 转化为二阶锥模型.....	48
4.4 算例分析.....	48
4.5 本章小结.....	53
第 5 章 总结与展望.....	54
5.1 总结.....	54
5.2 展望.....	55
参考文献.....	56
攻读学位期间发表的学术论文.....	63
致谢.....	64

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的双碳发展目标^[1]。“双碳”战略的提出是我国应对全球气候变化、推动可持续发展的重要决策，不仅是我国实现高质量发展的内在要求，更是对全球气候治理和人类可持续发展的重大贡献，展现了中国作为一个负责任的大国形象。配电网作为能源传输的关键节点，是电网的重要组成部分，在实现“双碳”目标中起着关键作用^[2]。作为电能从发电端到用户端的最后一环，应持续扩大可再生能源供给，构建一个更加清洁、安全且高效的现代低碳能源体系，有力助推着“双碳”目标成为现实。

配电网作为电力系统中与终端用户直接相连的重要环节，在电能传输与使用过程中发挥着不可替代的作用。电网的建设、发展和运营中，科学合理的配电系统规划起着至关重要的作用。如今，随着可再生能源的广泛普及、负荷需求的急剧上升以及多样化接入方式的出现，传统配电网的形态结构与运行特性正经历着深刻的变革^[3]。未来新型配电系统的发展存在以下挑战：(1)新能源大规模接入与系统安全稳定运行的冲突：随着大量分布式新能源的接入，配电网的运行状态变得更加复杂，需要在保障系统安全稳定的前提下，有效接纳和消纳新能源；(2)复杂不确定性与系统经济高效性的矛盾：新能源出力的间歇性和不确定性增加了系统运行的复杂性，同时为了适应新能源的接入，配电网需要进行大量的投资和改造，这又增加了系统的经济负担^[4]；(3)数字化智能化与系统经济安全的平衡难题：为了提高配电网的运行效率和管理水平，需要引入大量的数字化智能化技术，如智能监测、智能控制等，但这些技术的应用需要投入大量的资金，同时也会带来一定的安全隐患；(4)多种调控手段与系统可靠性的协调挑战：为了应对新能源接入带来的不确定性，配电网需要采用多种调控手段，如储能、需求响应等，但这些手段的实施和协调增加了系统的复杂性，可能会影响系统的可靠性^[5]。鉴于当下配电网在供电能力、电能质量和供电稳

定性上存在不足,新型配电系统在高效利用 DG,提高供电质量与可靠性,满足用户多元化用电需求,提高电力传输经济性方面提出了更高的要求。

传统配电网系统采用“闭环设计、开环运行”的模式,利用联络开关实现各馈线之间的电力互通,形成环状或网状拓扑结构,实现分段控制和事故后恢复供电。随着可再生能源的广泛接入和负荷的快速增长,系统面临着潮流反向和运行工况复杂等问题,开环运行模式在调节潮流方面的局限性日益凸著。基于电力电子技术的柔性互联装置正逐渐取代传统联络开关,可以实现不同供电单元间的闭环互联,通过控制配电网潮流完成不同交流分区间的功率均衡^[6]。SOP 是在上述背景下诞生的一种取代传统联络开关的柔性互联装置,有效地弥补了配电系统中功率调节能力不足的问题,SOP 不是简单的开或关两种状态,而是通过在馈线之间提供快速、连续的有功和无功功率控制,用于平衡负载并优化电压波动。不同于传统的故障特征,SOP 由于中间直流模块的隔离和电流的瞬时控制,其短路电流是有限的。配电网中 SOP 的应用,不仅提升了潮流可控性,还增强了系统运行的灵活性、经济性和可靠性。因此,本文首先对有源配电网内 SOP 的选址定容进行研究,然后针对大规模 DG 和 EV 接入下的配电网运行优化和故障恢复进行研究。

综上,有源配电网内 SOP 的选址定容与运行优化研究是十分有价值的,不仅可以增加 DG 的利用率,还可以提高配电网的灵活性与稳定性,具有广阔的研究意义和应用前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 有源配电网内 SOP 的选址定容研究现状

SOP 作为一种新型电力电子装置,通过主动的功率调节来改变配电网内的潮流分布,解决由于 DG 大规模接入和 EV 充电负荷增加所造成的源荷功率不平衡和电压波动,满足配电网在规划建设、运营调控、安全防护等方面的多元化需求^[7]。SOP 的拓扑结构主要有三种,分别为串联补偿器(Static Series Synchronous Compensator, SSSC)、统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)、背靠背电压源型变流器(Back to Back Voltage Source

Converter, B2B VSC)^{[8][9][10]}, 如图 1-1 所示。

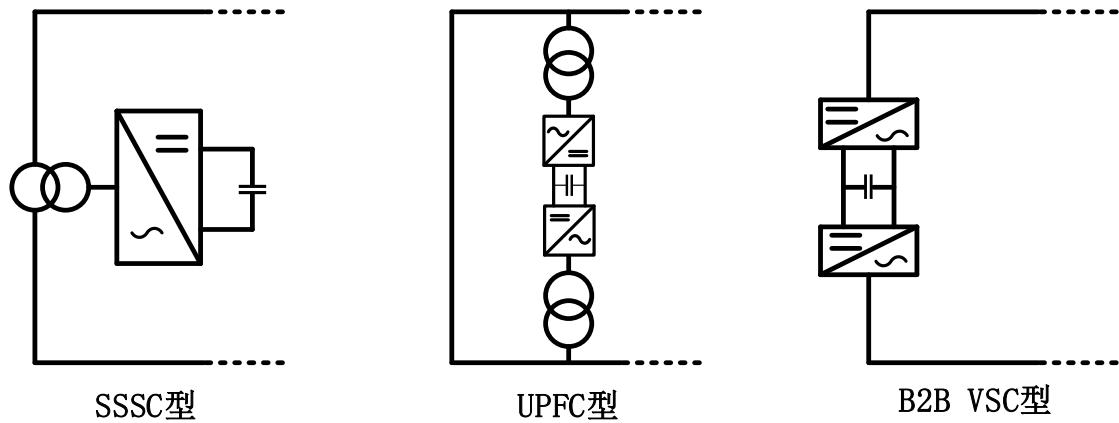


图 1-1 SOP 的三种拓扑结构

SSSC 是一种串联补偿器, 通过向输电线施加与线路电流相位差 90° 的可控电压矢量, 实现对线路等效阻抗的动态调控, 从而控制潮流分布, 可以工作在容性补偿模式或感性补偿模式, 通过改变注入电压的相位来实现对线路传输功率的调节。UPFC 结合了并联和串联补偿的功能, 由两个电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)组成, 一个并联连接到输电系统, 另一个串联连接。并联 VSC 可以提供或吸收无功功率, 而串联 VSC 可以调节线路的电压幅值和相位, 从而控制潮流分布。SSSC 主要提供串联补偿, 通过调节线路阻抗来影响潮流, 相对容易实现, 而 UPFC 集成了串并联复合补偿功能, 可对线路有功/无功功率实施解耦控制, 相较 SSSC, 其拓扑结构较为复杂, 导致较高的设备成本和控制难度, 两类装置均采用变压器作为电磁耦合接口, 通过同步联接实现与配电网的能量交互。SOP 的另一种实现结构 B2B VSC 是异步联接方式, 通过中间直流电容将两侧交流电网解耦, 这样的设计在维持系统稳定性以及控制短路电流方面具有显著的优势。文献[11]研究了基于 B2B VSC 的 SOP 在正常和故障工况下的运行原理, 通过时域仿真与暂态稳定性分析, 得出 SOP 在配电网稳态运行、故障瞬态及自愈恢复阶段的动态响应特性, 在工况变化时, 采用基于 PLL 的模式切换方法, 实现恒功率控制与电压补偿模式间的转换。本文将采用 B2B VSC 结构的 SOP 进行研究, 通过 SOP 的安装实现对配电网运行优化和故障恢复。

SOP 通过 VSC 的柔性功率控制能力, 能够精准调控配电网中两节点的功率流动, 展现出显著的技术应用价值。然而, 受制于设备投资成本高昂, 以及接

入规模与对配电网性能提升呈现非线性关系（即存在明显的边际效益递减规律），因此合理规划 SOP 的接入位置、数量和容量，是推广 SOP 应用必须解决的核心问题。本文中有源配电网内 SOP 的选址定容研究将从场景生成和规划策略两方面开展。

针对场景生成方面，文献[12]采用 K-means 聚类算法对 DG 的历史数据进行分析，根据数据特征来减少场景的数量。文献[13]采用拉丁超立方体采样，用于 DG 和负载的不确定性采样并生成概率场景。文献[14]通过 Wasserstein 概率距离的应用，将风光出力的连续分布概率函数转化为具有概率信息的分位点，段内采用改进 K-medoids 聚类算法进行消减。相较于上述文献采用传统数学模型提取数据特征值，使用深度学习的方法可以很好地捕捉 DG 出力变化的多样性。文献[15]使用生成式对抗网络进行场景生成，该方法基于两个相互连接的深度神经网络，与现有的基于概率模型的方法相比，可以在更大的时间和空间维度上学习数据的特征。文献[16]采用条件生成对抗网络的方法，学习噪声分布与发电数据在预测条件下的映射关系。结果表明，采用深度学习的方法可以更准确的描述风光发电的随机性，为 SOP 的规划问题提供准确的基础数据。

在 SOP 的规划策略方面，文献[17]采用双层规划模型解决 SOP 选址定容问题，通过线性化和二次松弛将原问题转化为 MISOCP 模型，使用模拟退火算法和锥规划算法求解规划模型。文献[18]提出了一种多端 SOP 优化配置方法，着重考虑了重要用户失负荷风险这一关键因素，使用混合优化算法求解目标函数，该方法有效地减少了重要用户的停电损失，并降低了 SOP 的年运行综合成本。文献[19]构建了一个基于条件风险价值理论的 SOP 三层规划模型，该模型综合考虑了网络重构因素，通过最小化综合成本和安全风险来确定 SOP 的位置和容量，通过多个日前场景的运行成本最小进行网络重构的中层模型，使用 SOP、有载调压变压器和电容器组传输功率优化配电网运行的下层模型。文献[20]将 SOP 的规划模型与配电网电压优化相结合，结果既改善了配电网的电压波动，又降低了 SOP 的安装和运行费用。

1.2.2 基于 SOP 的有源配电网运行优化研究现状

SOP 的关键作用之一是促进配电网的运行优化。为了充分利用 SOP 的灵活

性和可控性，提高配电网内其他设备的利用率，需要 SOP 与其他设备在不同时间尺度上的协调配合。此外，通过应用大数据和人工智能等前沿技术，并结合大规模的高级计量设备，可以深入分析配电系统中海量多元化的数据，可以提升 SOP 在控制策略方面对实际物理模型的依赖，同时提升 SOP 策略的精确度和适配性^[21]。

基于 SOP 的多手段协同运行优化：将 SOP 与 DG、EV、储能、有载调压变压器、电容器组等调度资源协同配合，还可以使用网络重构改变配电网的拓扑结构，使得 SOP 优化调度潮流的能力充分发挥^[22]。传统电压调节装置和基于联络开关的网络重构技术因响应迟缓且电压调节离散的制约，无法有效应对 DG 和负荷波动对有源配电网实时电压控制带来的挑战。文献[23]提出了一种两阶段的 SOP 与联络开关协调优化控制策略。在日前阶段，构建以最小化网损和弃风弃光为目标的优化模型；在日内阶段，基于模型预测控制对 SOP 功率进行滚动修正，并通过混合整数二阶锥规划算法统一求解网络重构与 SOP 功率的协同优化。文献[24]以配电网功率损耗最小为目标，使用锥优化模型求解，相比网络重构，SOP 的应用可以降低网损、电压波动。文献[25]建立 SOP 与联络开关配合的双层优化模型，以网损最小为目标函数，上层采用模拟退火算法，下层采用锥优化算法，通过 SOP 的功率传输优化配电网的运行。文献[9]研究了 SOP 在中压配电网中馈线负载平衡的性能，采用 Powell 直接集方法求解非线性优化模型，通过平衡馈线之间的负载，减少网络损耗和电压波动。文献[26]提出了一种分散与局部相结合的 SOP 电压控制策略，根据配电网的状态动态分区，采用分散优化的方法对各连接区域间电网的有功功率进行调节。与目前广泛使用的集中式控制策略相比，分散控制策略可以有效地减少通信和计算负担，具有良好的电压控制能力。文献[27]考虑到 SOP 与多个调节设备的协同作用，提出了一种基于 SOP 的有源配电网协调电压调节方法，以消除电压越限和降低运行成本。将 SOP 与有载调压变压器和电容器组协同作用，建立时间序列优化模型进行求解。

计及不确定性的 SOP 运行优化：随着 DG 在配网侧的高渗透率接入，其光伏/风机出力的波动特性与多元化负荷需求的时空差异性，共同构成了新型电力系统的不确定特征。源荷功率不平衡的频繁波动会影响 SOP 运行优化的效果，

可以通过细致的优化调度和对源荷场景的精确建模来解决，提升配电网运行的鲁棒性。在优化调度策略方面，文献[28]提出了一种多阶段协同优化框架，在日前长时间尺度上构建以网损最小为目标的混合整数非线性规划模型，在日内短时间尺度上建立电压控制模型，通过动态调节 SOP 的功率传输消除电压越限风险。文献[29]构建了日前-实时两阶段鲁棒运行优化模型，在长时间尺度上，通过优化 SOP 的运行，最小化系统损耗和电压波动；短时间尺度上，针对 DG 出力的随机波动特性，通过在 SOP 中引入下垂控制策略，增强三相不平衡工况下电力网络的运行可靠性。在源荷场景的精确建模方面，文献[30]提出的基于概率多场景的鲁棒性运行优化模型，通过拉丁超立方抽样生成多场景以表征系统不确定性，通过三端口 SOP 的功率调节实现多场景下的配电网最优运行。

1.2.3 基于 SOP 的配电网故障恢复研究现状

SOP 的快速故障响应能力显著提升了配电网的自愈能力，对于外部电网故障，SOP 具备毫秒级闭锁能力，通过多级协同保护机制快速切除故障；对于 SOP 自身发生故障，为防止损坏设备，影响系统安全，SOP 会快速切断与电网的联接。SOP 的故障处理机制为系统提供了双重安全保障，既可通过暂态控制策略实现短路电流主动抑制，又能基于优化算法动态网络重构完成恢复供电，含 SOP 的配电网故障恢复研究主要从恢复机制和策略两个角度开展^[31]。

含 SOP 的配电网供电恢复机制：由于 SOP 采用全型电力电子器件能够在系统发生故障时迅速切断电路，其响应速度超过了传统的机械式开关。一旦检测到故障，SOP 能够立即在各个互联的馈线之间建立电气隔离，为正常区域继续供电，为故障区域提供电压支撑，从而避免停电区域的进一步扩散。在故障定位方面，文献[32]提出了一种基于低频信号叠加的谐振接地配电系统中定位单相接地故障的方法，SOP 通过主动信号注入机制，向电网施加 25Hz 平衡三相电压信号，随后基于馈线中同频零序电流分量的特征检测，实现故障区段的快速辨识与隔离。文献[33]创新性的提出利用 SOP 附加三相对称低频电压的方法来定位故障区域。在供电恢复机制方面，文献[34]建立含 SOP 的多端柔性互联配电网可靠性模型，设计了考虑重要负荷的故障恢复方法。文献[35]提出了负荷转移机制，能够在配电网正常安全运行的前提下最大化恢复失电负荷。文献[36]

以恢复最多负荷为目标，提出一种考虑配电网鲁棒性的 SOP 选址定容方法，通过 SOP 的应用优化调度配电网潮流，当发生故障时通过 SOP 为正常区域提供电力。

基于 SOP 的配电网供电恢复策略：基于 SOP 的智能配电网故障处理策略可概括为"闭锁-隔离-重构"三个阶段：在故障感知阶段，SOP 依托全控器件快速闭锁特性实现毫秒级故障电流阻断；在故障隔离阶段，SOP 与配电网保护装置信息交互实现故障区段精准定位，并形成最小化停电孤岛；在供电恢复阶段，SOP 失电侧的 VSC 切换为电压-频率控制模式，采用动态功率前馈与下垂控制相结合的复合策略，在维持直流电压稳定的同时，为停电区域转移电能，快速恢复供电。文献[37]从多个 SOP 协调的角度出发，提出了一种可实现故障自愈的有源配电网供电恢复方法，探讨了 SOP 在供电恢复中的潜在效益，并进一步考虑了 SOP 与网络重构的组合，为有源配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的手段。文献[11]研究了在有源配电网中使用 SOP 恢复供电的方法，提出了在正常工作情况和故障情况下 SOP 的各种控制模式。文献[38]针对含 SOP 的有源配电网，通过建立电网侧短路故障下的多时间尺度动态响应模型，证明了 SOP 的暂态电压支撑能力与供电自愈控制原理，表明传统的故障分析技术同样适用于含 SOP 的配电网。文献[39]提出了一种混合双层优化方法，以最小化停电负荷、开关操作次数和网络损耗为目标，结果证明 SOP 的应用有助于减轻故障影响，并简化开关操作。文献[40]考虑到 DG、储能和负载的运行特性，建立了含 SOP 的时间序列孤岛分区模型，利用 SOP 灵活提供功率来提高负载恢复水平。文献[41]在负荷、DG 和线路参数不平衡的情况下，提出了一种基于多端 SOP 的不平衡配电网恢复模型，以恢复负荷加权最大和电压不平衡度最小为目标，在故障恢复的基础上考虑了源荷功率不平衡，提高了系统对不确定场景的应对能力。

1.3 论文主要研究内容及创新点

本文针对配电网内可再生能源出力的随机性和电动汽车负荷的不确定性，导致源荷功率不平衡程度加深，造成网络损耗和电压波动增大，故障后供电恢复困难，将 SOP 在配电网内的应用分为三种情况进行研究，分别是有源配电网

内 SOP 的选址定容，基于 SOP 的有源配电网运行优化和基于 SOP 的有源配电网故障恢复。论文的主要研究内容分为以下三个部分：

(1)有源配电网内 SOP 的选址定容

针对大量 DG 出力随机性造成配电网电压波动剧烈，影响电能质量的问题，首先利用生成对抗网络学习和训练风光发电数据，得到发电场景。然后将年综合费用最小作为目标函数建立含 SOP 的配电网规划模型，为高效计算非凸非线性规划问题，通过运用线性化和凸松弛方法，将原始数学模型重构为混合整数二阶锥规划形式。最后在 IEEE 33 节点系统测试，对所构建的场景生成算法与规划模型的可行性和有效性进行了实证研究与验证分析。

(2)基于 SOP 的有源配电网运行优化

为解决 EV 和 DG 的广泛接入，造成有源配电网的源荷功率不均衡、功率损耗增大和电压波动的问题。设计一个考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化方法，为了模拟 EV 的充电负荷数据，采用蒙特卡洛法生成日前场景，然后将 SOP 与传统无功调压装置进行协同配合，建立运行损耗最小和电压波动最小的运行优化模型。最后，在改进的 IEEE 33 节点配电系统对优化模型进行仿真分析，验证优化策略的有效性。

(3)基于 SOP 的有源配电网故障恢复

针对使用联络开关通过网络重构来实现故障恢复的方法，不能提供电压支持，网络重构后部分节点电压迅速下降到电压下限，阻碍了恢复水平的进一步提高，而可控 DG 在故障情况下提供关键负荷恢复受功率波动的限制，不能提供稳定的电压支持。通过使用 SOP 替代传统联络开关，当电力系统遭遇故障时，直流隔离能够发挥关键作用，防止故障电流扩散至其他区域；而在进行供电恢复阶段，还能为受影响的区域提供电压支持，进而增加恢复供电的覆盖面积。本章针对配电网内故障恢复问题，首先分析了基于 SOP 的配电网故障处理流程，构建了一个基于 SOP 的有源配电网故障恢复模型，通过 IEEE 33 节点测试模型并进行了案例分析，以确认所提出模型的准确性和实用性，为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

1.4 本文章节安排

本文主要围绕有源配电网内 SOP 的选址定容与运行优化展开研究。论文中各章节的主要研究内容如下：

第 1 章：绪论。主要论述在碳达峰和碳中和背景下 SOP 应用的研究背景和意义，并着重介绍了国内外对 SOP 的选址定容、配电网运行优化和故障恢复的研究现状与研究进展，此外介绍本文各章节的研究内容。

第 2 章：基于生成对抗网络的有源配电网智能软开关规划方法。本章首先介绍了 SOP 的原理和模型，针对生成对抗网络和 Wasserstein 距离的理论，设计了用于训练风光发电数据的生成对抗网络模型。然后将年综合费用最小作为目标函数建立含 SOP 的配电网规划模型，为克服非凸非线性规划问题的求解困难，本章通过线性近似与凸松弛方法，将原始数学模型转化为混合整数二阶锥规划形式。最后，在 IEEE 33 节点系统测试，对提出的场景生成算法与规划模型进行了可行性验证与性能评估。

第 3 章：考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化。本章首先介绍了 EV 的充电模型，由此使用蒙特卡洛法计算充电负荷，然后考虑了 SOP 功率调节、DG 出力、EV 的充电负荷、OLTC 挡位调节、CB 投切等控制变量，以运行损耗和电压波动最小的加权组合为目标函数构建模型，通过线性化与锥松弛技术，将原始模型转换为可高效求解的混合整数二阶锥规划模型。最后改进 IEEE 33 节点配电系统测试平台，系统性地对模型进行仿真验证实验。

第 4 章：基于 SOP 的有源配电网故障恢复研究。本章首先研究了基于 SOP 的配电网故障处理与供电恢复方案，建立了相应的有源配电网故障恢复模型。由于模型属于大规模非线性规划问题，采用二阶锥规划方法进行模型重构与求解。最后，在基于 IEEE 33 节点测试系统开展分析，验证所提模型的准确性和实用性，为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

第 5 章：总结与展望。本章系统梳理了全文的研究脉络，通过阐释论文的体系架构与模块间的逻辑关联性，同时从方法论层面分析现有研究的不足之处及其潜在优化路径，最后对未来的进一步研究方向进行规划与预测。

第 2 章 基于生成对抗网络的有源配电网智能软开关规划方法

2.1 引言

作为电力传输的终端环节，配电网承担着电能配送至终端用户的核心职能。在能源转型背景下，其不仅要实现分布式可再生能源的高效消纳与电动汽车的灵活接入，还需支撑用户侧服务品质优化及双向互动需求。构建适应综合能源系统发展的智能配电体系，已成为全球能源领域的战略共识^[31]。随着配电网内 DG 接入比例的持续上升，由于风电、光伏等可再生能源的出力受气象因素影响而呈现间歇性和波动性特征，导致配电网面临电压越限、潮流失衡、网络调节能力不足等经济与安全风险^[19]。相较于机械式联络开关，SOP 通过背靠背 VSC 结构实现潮流的主动调控，不仅能够完成馈线间的有功功率传输，还可通过电压源换流器的四象限运行特性实施无功功率双向补偿，显著提升了配电网的运行灵活性^[12]，基于 SOP 的柔性互联配电网建设正日益受到广泛关注与重视。

随着配电网内新能源接入比例的不断提高，配电网对可靠、经济运行提出了更高的要求。为解决大量 DG 间歇性出力对配电网造成的影响，本章提出了一种基于生成对抗网络的有源配电网 SOP 规划方法。本章首先介绍了 SOP 的原理和模型，针对生成对抗网络和 Wasserstein 距离的理论，设计了用于训练风光发电数据的生成对抗网络模型。为准确模拟 DG 的运行特性，采用生成对抗网络进行场景生成。然后以年综合成本最小为优化目标，构建了基于 SOP 的配电网规划模型，针对非凸非线性规划问题的求解难题，本章采用线性化与凸松弛技术对原数学模型转化为混合整数二阶锥规划模型。最后，在 IEEE 33 节点算例上，对所提出的场景生成算法和规划模型进行了分析和验证。

2.2 B2B VSC 型 SOP 原理

2.2.1 SOP 数学模型

智能软开关的概念最早由英国研究团队提出，采用背靠背电压源换流器

(B2B VSC)结构。通过施加适当的控制策略，SOP 不仅可实现馈线间有功-无功的精准解耦控制，还能提供动态电压支撑。相较于联络开关，馈线间 SOP 的柔性互联特性既保持了配电网开环运行的优势，又具备闭环调控能力，极大增强了配电网运行的灵活性与稳定性。

基于 SOP 对功率的灵活调节能力，正常运行时，通过 $d-q$ 坐标系解耦控制，实现有功功率双向传输与无功-电压协同控制；故障发生时，通过直流隔离防止故障规模扩大，通过功率传输完成恢复供电。因此，SOP 能够改善配电网运行，并促进 DG 的高比例接入。图 2-1 为基于 B2B VSC 的 SOP 互连双馈线配电网。两个 VSC 位于配电网两节点之间并通过公共直流链路连接。SOP 的主电路拓扑如图 2-2 所示，它由两个三相绝缘栅双极晶体管(IGBT)为基础的 VSC 组成，中间为直流电容，通过使用脉冲宽度调制(PWM)产生电压波形。每个 VSC 端子连接一个串联滤波器，其电感由 L 表示。该电感提供高频谐波衰减，限制了短路电流的上升速度，并便于控制功率。

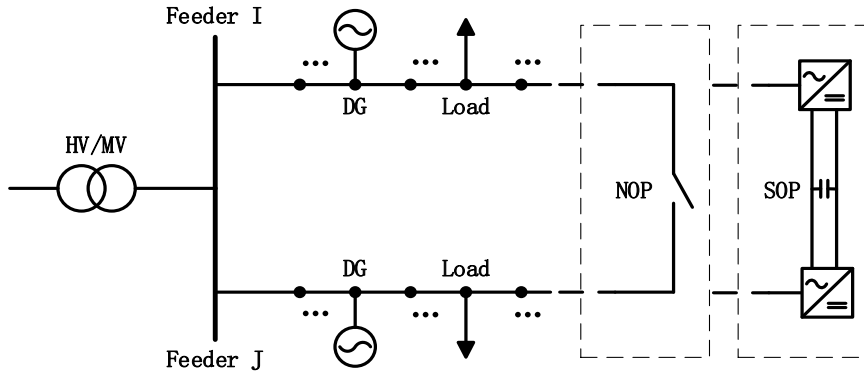


图 2-1 SOP 接入位置

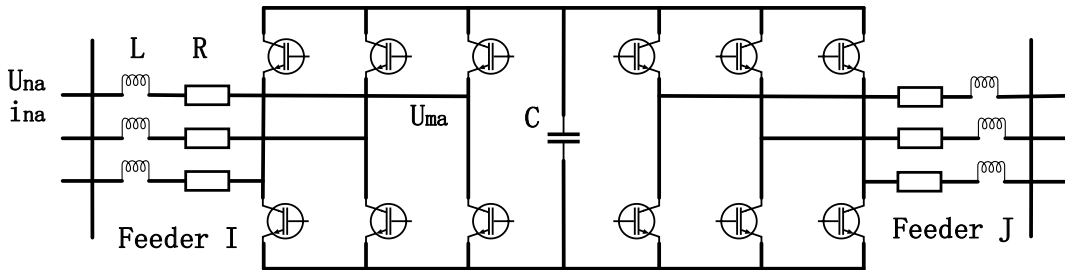


图 2-2 SOP 拓扑结构

由于 SOP 两端完全对称，本章只对其中一侧的 VSC 建模分析，图 2-2 中 u_{na} 、 u_{nb} 、 u_{nc} 、 i_{na} 、 i_{nb} 、 i_{nc} 为配电网侧的电压和电流， u_{ma} 、 u_{mb} 、 u_{mc} 为 SOP 桥臂

上的电压， P 、 Q 为传输的有功功率和无功功率， R 、 L 、 C 为电阻、电感和电容。分析中假设电网侧为三相对称交流电，变流器工作在理想开关状态，忽略导通损耗与开关瞬态过程。

由配电网侧的交流系统为三相对称得：

$$\begin{cases} u_{na} + u_{nb} + u_{nc} = 0 \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

配电网的三相交流系统到 SOP 桥臂间的等效电路方程为：

$$\begin{cases} u_{na} = u_{ma} + L \frac{di_{na}}{dt} + Ri_{na} \\ u_{nb} = u_{mb} + L \frac{di_{nb}}{dt} + Ri_{nb} \\ u_{nc} = u_{mc} + L \frac{di_{nc}}{dt} + Ri_{nc} \end{cases} \quad (2-2)$$

u_{na} 等于 u_{ma} 加上线路阻抗上的电压降。通过 Park 变换将原坐标系转换为 $d-q$ 旋转坐标系：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -R & -\omega L \\ \omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{nd} \\ u_{nq} \end{bmatrix} - \frac{MU_{dc}}{2L} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

式中： i_d 、 i_q 、 u_{nd} 、 u_{nq} 为电流和电压在 $d-q$ 旋转坐标系上的分量， ω 为角频率， M 为调制比， δ 为触发角。

SOP 一侧变流器输出功率为：

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{nd} i_d + u_{nq} i_q) = \frac{3}{2} u_{nd} i_d \\ Q = \frac{3}{2} (u_{nd} i_q - u_{nq} i_d) = \frac{3}{2} u_{nd} i_q \end{cases} \quad (2-4)$$

由式(2-4)分析可得 SOP 传输的有功功率与无功功率是独立可控的，只与电流在 $d-q$ 旋转坐标系上的分量有关。因此 SOP 可以实现对配电网两侧的潮流控制。

交流测电压基波分量为：

$$\begin{cases} u_d = u_{nd} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_q = u_{nq} - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2-5)$$

式中： u_d 、 u_q 为 VSC 交流测电压在 $d-q$ 旋转坐标系上的分量。

2.2.2 SOP 控制策略

SOP 通过控制两侧 VSC 的四象限运行模式，动态调节有功功率与无功功率，实现潮流优化与电压调节的控制目标目标，控制方法通常包括幅值相位控制和矢量控制。其中，幅值相位控制不具有限制电流的功能，因此实现过电流保护较为困难。相比之下，矢量控制采用了电流内环和功率外环的双闭环控制结构，外环由 SOP 的控制目标计算得到 i_d 、 i_q ，内环将电流在 $d-q$ 旋转坐标系上的分量用于输入，调节 VSC 输出的电压，通过对电压基波分量的控制使得 SOP 快速调节功率，这在 VSC 中是一种广泛使用的控制策略^[42]。

由于 SOP 代替传统联络开关将配电网中的两个节点相连接，由两个 VSC 和一个直流电容器组成，其潮流模型会呈现为两种节点类型的复合形式。表 2-1 列出了不同工作场景与节点类型下 SOP 的控制模式。

表 2-1 SOP 控制模式

控制模式	VSC1 控制模式	VSC2 控制模式	节点类型	场景
1	PQ 控制	$U_{dc}Q$ 控制	$PQ-PQ$ 节点	正常运行
2	PQ 控制	$U_{dc}U_{ac}$ 控制	$PQ-PV$ 节点	正常运行
3	PU_{ac} 控制	$U_{dc}Q$ 控制	$PV-PQ$ 节点	正常运行
4	PU_{ac} 控制	$U_{dc}U_{ac}$ 控制	$PV-PV$ 节点	正常运行
5	$U_{ac}f$ 控制	$U_{dc}Q$ 控制	$V\theta-PQ$ 节点	VSC1 侧故障
6	$U_{ac}f$ 控制	$U_{dc}U_{ac}$ 控制	$V\theta-PV$ 节点	VSC1 侧故障
7	$U_{dc}Q$ 控制	$U_{ac}f$ 控制	$PQ-V\theta$ 节点	VSC2 侧故障
8	$U_{dc}U_{ac}$ 控制	$U_{ac}f$ 控制	$PV-V\theta$ 节点	VSC2 侧故障

在系统正常运行时控制模式为 $PQ-V_{dc}Q$ ，换流器 VSC1 负责调节传输的功率，而另一个换流器 VSC2 则负责维持直流电压的稳定。若故障发生在 VSC1 侧的配电网中，VSC1 将提供电压支撑，为正常区域供电，采用 $U_{dc}f$ 控制模式；若故障发生在 VSC2 侧的配电网中，则 VSC2 将采用 $U_{dc}f$ 控制模式。

2.2.3 运行约束

从理论层面分析，SOP 具有高效的功率传输特性，然而在 DG 和负荷分布不均衡的情况下，大范围功率传输将不可避免的产生功率损耗。本章以双端口 SOP 为研究对象，考虑功率传输损耗，控制模式采用 $PQ-V_{dc}Q$ 。假设 SOP 中功率流向电网的方向为正方向，两个变流器输出的无功功率因直流环节的隔离而互不影响，仅需要满足各自变流器的容量约束即可^[24]。

SOP 的约束方程如下：

1) SOP 有功功率约束

$$P_{i,t}^{SOP} + P_{j,t}^{SOP} + P_{ij,t}^{SOP.loss} = 0 \quad (2-6)$$

$$P_{ij,t}^{SOP.loss} = A_i^{SOP} \sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} + A_j^{SOP} \sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \quad (2-7)$$

2) SOP 无功功率约束

$$-\mu S_{ij}^{SOP} \leq Q_{i,t}^{SOP} \leq \mu S_{ij}^{SOP} \quad (2-8)$$

$$-\mu S_{ij}^{SOP} \leq Q_{j,t}^{SOP} \leq \mu S_{ij}^{SOP} \quad (2-9)$$

3) SOP 容量约束

$$\sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \leq S_{ij}^{SOP} \quad (2-10)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{SOP})^2 + (Q_{j,t}^{SOP})^2} \leq S_{ij}^{SOP} \quad (2-11)$$

式中： i, j 为 SOP 接入配电网节点的编号； $P_{i,t}^{SOP}$ 、 $P_{j,t}^{SOP}$ 、 $Q_{i,t}^{SOP}$ 、 $Q_{j,t}^{SOP}$ 为 t 时刻 SOP 两端变流器传输的有功功率和无功功率； A_i^{SOP} 和 A_j^{SOP} 为两 VSC 功率传输的损耗系数； $P_{ij,t}^{SOP.loss}$ 为 SOP 的功率传输损耗； μ 为功率因数角正弦的绝对值； S_{ij}^{SOP} 为连接在 i 、 j 节点间 SOP 的容量。

2.3 基于 Wasserstein 距离的生成对抗网络

2.3.1 生成对抗网络原理

由 Goodfellow 等学者于 2014 年首先提出的生成对抗网络 (Generative Adversarial Nets, GAN), 作为深度学习领域的里程碑式模型, 由生成器和判别器两个网络进行对抗训练, 生成器通过映射生成数据, 判别器则用来区分数据来源, 在达到纳什均衡时, 生成数据的分布逐步逼近真实数据。本章使用的 GAN 网络结构如图 2-3 所示。

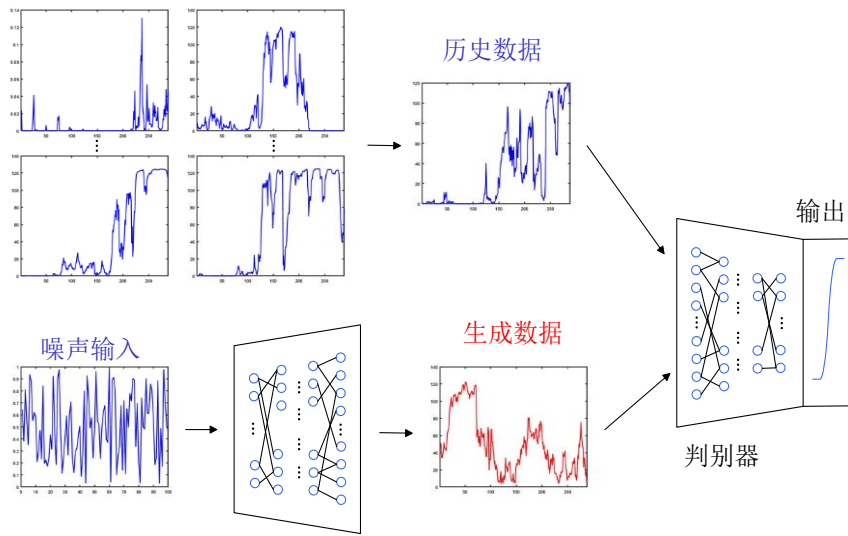


图 2-3 GAN 网络结构

GAN 的核心在于构建生成器与判别器的极大极小值博弈, 其中生成器通过深度神经网络建模高维数据的非线性映射关系, 判别器则基于卷积神经网络构建概率分类决策边界。当对抗训练达到纳什均衡时, 生成器学习的数据分布与真实数据分布一致, 可以准确地模拟历史数据, 此时判别器将无法判断样本是来自生成器还是来自训练数据, 判别器对数据的区分退化为随即猜测, 生成的场景与真实的历史数据无法区分^[44]。用 GAN 的方法对 DG 出力的不确定性进行准确建模, 该方法可以捕捉历史数据的内在特征, 基于历史数据直接构建新的 DG 发电场景, 无需预先定义模型结构或进行概率分布拟合。

在训练阶段, 生成器接收批量数据输入, 并通过不同功能的神经元进行一系列上采样来输出, 输出是与训练集保持相同维度的合成数据样本, 其输入 Z

通常为服从特定概率分布（如高斯分布或均匀分布）的随机噪声 $\mathbf{p}_z$ ，则生成器可以表示为 $G(Z; \theta^{(G)})$ ，得到一个新的随机变量，其分布表示为 P_G 。

判别器与生成器采用同步训练，其输入样本来源于历史数据或生成器输出结果，通过使用另一个深度神经网络进行一系列下采样操作，得到概率函数 p_{real} ，测量样本来自历史数据的概率，判别器可以表示为 $D(x; \theta^{(D)})$ 。

$$p_{real} = D(x; \theta^{(D)}) \quad (2-12)$$

式中： $G(Z; \theta^{(G)})$ 表示生成器函数； $D(x; \theta^{(D)})$ 表示判别器函数； $\theta^{(G)}$ 和 $\theta^{(D)}$ 为两个深度神经网络的权重。

为了训练数据，我们定义了损失函数 L_G 来衡量生成器的性能，同时定义了损失函数 L_D 来衡量判别器的性能，并且利用这些损失函数来更新神经网络的权重。

$$L_G = -E_Z[D(G(Z))] \quad (2-13)$$

$$L_D = -E_X[D(X)] + E_Z[D(G(Z))] \quad (2-14)$$

式中： E 表示对应分布的期望值。

在 GAN 的训练中，生成器的优化目标是通过调整参数使判别器对生成样本的判别输出值最大化，即判定为“真实”；与此同时，判别器致力于实现双重目标：一方面最小化对生成样本的判别输出值，另一方面最大化对真实样本的判别输出值，即准确区分生成样本与真实样本。二者通过动态博弈形成极小极大优化问题。

为了建立 G 和 D 之间的博弈，使它们可以同时训练，我们还需要构造博弈的价值函数 $V(G, D)$ 。

$$\min_{\theta^{(G)}} \max_{\theta^{(D)}} V(G, D) = E_X[D(X)] - E_Z[D(G(Z))] \quad (2-15)$$

在网络训练初期，由于生成样本分布与真实分布差异显著，判别器对二者间 Wasserstein 距离的估计存在较大偏差，导致其损失函数值持续上升。随着训练的继续，生成器参数优化，两分布的数据特征逐渐重叠，Wasserstein 距离的

估计误差减小，判别器损失函数呈现下降趋势并最终收敛至稳定区间，标志 GAN 训练达到动态平衡。最终我们得到最优解，从生成器的输出中得到可以准确表示 DG 出力随机性的场景。

2.3.2 Wasserstein 距离

本章选用 Wasserstein 距离^[45]来定义判别器的损失函数，而不是原始的 Jensen-Shannon 散度^[46]，这是因为 Wasserstein 距离能直接计算和之间的距离。在生成器输出的数据分布与真实数据分布之间缺乏交集的情况下，Jensen-Shannon 散度会恒为常数，这使得该指标难以有效评估两个概率分布之间的差异程度，而 Wasserstein 距离能够有效衡量两个样本分布之间的距离。由于我们希望生成反映可再生能源发电随机性的场景，使用 Wasserstein 距离进行训练可以捕捉来自的所有训练样本数据特征。使用 Jensen-Shannon 散度进行训练往往会导致生成器生成具有最高概率的单一功率曲线模式^[47]。Wasserstein 距离的定义如下：

$$W(X, Y) = \inf_{f_{XY} \in \Gamma} \int |x - y| f_{XY}(x, y) d_x d_y \quad (2-16)$$

式中： X 和 Y 是两个随机变量，其边缘分布为 f_X 和 f_Y ， Γ 表示所有可能的联合分布的集合， $\inf$ 表示找到所有路径中的最小值。

Wasserstein 距离是基于最优传输理论构建的概率分布差异性度量指标，通过量化将源概率分布转移至目标分布所需的最低能量消耗，实现对两者间统计特征差异的有效表征，而这个最小值就是通过在所有可能的转换路径中找到最佳路径来确定的。所以使用 Wasserstein 距离的 GAN 目标函数为：

$$W(D(X), D(G(Z))) = \sup_{\theta^{(D)}} \{E_X[D(X)] - E_Z[D(G(Z))]\} \quad (2-17)$$

Wasserstein 距离通过最优传输理论，为生成对抗网络中的参数优化确立了梯度更新的理论依据，使其能够构建分布间的连续映射关系，区别于传统方法对真实样本局部数据特征匹配。因此， $G(Z)$ 分布与 P_X 分布的距离被最小化，得到了最优的生成器。

2.3.3 GAN 结构设计

本章采用的深度卷积神经网络架构融合了 Wasserstein GAN 和 DCGAN 的设计理念。其中，生成器包含两个具有 2×2 步长的反卷积层，通过空间维度扩展机制对潜在空间向量执行特征维度扩展；而判别器包括 2 个带有 2×2 的步长的卷积层，构建特征空间压缩架构实现非线性判别基准生成。生成器采用多层感知机结构进行初始上采样处理，而判别器则构建了带有 Sigmoid 输出层的反向架构，两者均通过深度神经网络实现其功能。

GAN 的层数增加可能引发参数空间偏移至非线性激活函数的饱和区或死区，从而引发参数优化过程陷入局部收敛困境。相反，只使用两个卷积层已经足够实现良好的训练效果。生成器和判别器模型的详细参数见表 2-2 中。深度学习系统采用 RMSProp 自适应矩估计算法，输入 32 维样本批次梯度更新。神经网络权重符合高斯分布初始化，通过方差约束保障数值稳定性。

为确保训练过程的稳定性，除输入层外，各网络层均采用批量归一化技术，将输入数据标准化为零均值和单位方差。在激活函数选择方面，生成器除输出层外均使用 ReLU 函数，而判别器则采用 Leaky ReLU 函数。实验中 ndiscri 被设置为 4，因此模型在优化判别器的 4 个步骤和生成器的 1 个步骤之间交替训练。通过观察判别器损失函数的收敛情况，当判别器对 $D(G(Z))$ 和 $D(X)$ 两类输出值的判别结果趋于一致时，表明生成器已具备生成逼真风光发电数据的能力。

表 2-2 GAN 模型参数

	生成器	判别器
输入	100	24×24
第一层	MLP, 2048	Conv, 64
第二层	MLP, 1024	Conv, 128
第三层	MLP, 128	MLP, 1024
第四层	Conv_Transpose, 128	MLP, 128
第五层	Conv_Transpose, 64	

MLP 表示多层感知器，其后数字为神经元数量；Conv/Conv_Transpose 表示卷积/反卷积层，后接滤波器数量；Sigmoid 用于将判别器的输出限制在 $[0,1]$ 范围内。

2.4 SOP 规划模型

有源配电网中 SOP 规划问题需要考虑安装位置与容量，以缓解 DG 间歇性出力对配电网造成的影响。

2.4.1 目标函数

本章提出的 SOP 规划模型以实现配电网建设与运行总成本最优为目标，其成本由三个部分组成：SOP 设备年投资成本、SOP 年运行维护费用以及配电网年损耗成本，具体数学表达式如下：

$$\min f = f_I + f_O + f_L \quad (2-18)$$

式中： f_I 为 SOP 年投资成本； f_O 为 SOP 年运行维护成本； f_L 为配电网年损耗成本。

1) SOP 年投资成本

$$f_I = \frac{d(1+d)^y}{(1+d)^y - 1} \sum_{k=1}^{N_{SOP}} c_k^{SOP} S_k^{SOP} \quad (2-19)$$

式中： d 为贴现率； y 为 SOP 的经济使用年限； N_{SOP} 为配电网 SOP 安装个数； S_k^{SOP} 为第 k 个 SOP 的安装容量； c_k^{SOP} 为对应的单位容量投资成本。

2) SOP 年运行维护成本

$$f_O = \eta \sum_{k=1}^{N_{SOP}} c_k^{SOP} S_k^{SOP} \quad (2-20)$$

式中： η 为年运行维护费用系数。

3) 配电网年损耗成本

$$f_L = 365\mu \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{n_t} (P_{i,t} + A_i^{SOP} P_{i,t}^{SOP}) \Delta t \quad (2-21)$$

式中： μ 为配电网年度供电损耗成本系数； n_t 为一天时间的分段数； Δt 为每段的时间； $P_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻流入的有功功率； $A_i^{SOP} P_{i,t}^{SOP}$ 为 SOP 在节点 i 在 t 时刻的有功功率损耗。

2.4.2 约束条件

1) 配电网潮流约束

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_b} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^2) + P_{j,t} = \sum_{(j,k) \in \Omega_b} P_{jk,t} \quad (2-22)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_b} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^2) + Q_{j,t} = \sum_{(j,k) \in \Omega_b} Q_{jk,t} \quad (2-23)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) = 0 \quad (2-24)$$

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (2-25)$$

$$P_{j,t} = P_{j,t}^{DG} + P_{j,t}^{SOP} - P_{j,t}^{LD} \quad (2-26)$$

$$Q_{j,t} = Q_{j,t}^{DG} + Q_{j,t}^{SOP} - Q_{j,t}^{LD} \quad (2-27)$$

式中： r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗； $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻支路 ij 上从 i 流向 j 的有功功率和无功功率； $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别是节点 j 在 t 时刻注入的有功功率和无功功率； $U_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值； $I_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 上的电流幅值； $P_{j,t}^{DG}$ 和 $Q_{j,t}^{DG}$ 分别为节点 j 在 t 时刻 DG 注入的有功功率和无功功率； $P_{j,t}^{SOP}$ 和 $Q_{j,t}^{SOP}$ 分别为节点 j 在 t 时刻 SOP 注入的有功功率和无功功率； $P_{j,t}^{LD}$ 和 $Q_{j,t}^{LD}$ 分别为节点 j 在 t 时刻负载消耗的有功功率和无功功率。

2) 安全运行约束

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (2-28)$$

$$I_{ij,t}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (2-29)$$

式中： $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为节点 i 上电压的最大值和最小值； $I_{\max}$ 为支路 ij 上的最大电流值。

3) SOP 规划约束

$$S_k^{SOP} = m_k S^{SOP} \quad (2-30)$$

式中： S_k^{SOP} 为第 k 个 SOP 的安装容量； $S_{k,\max}^{SOP}$ 为第 k 个 SOP 安装容量的最大值； m_k 为非零整数； S^{SOP} 为 SOP 的单位安装容量，本文以 $100kVA$ 为单位容量。

2.4.3 规划流程

配电网潮流方程与 SOP 约束条件中的非线性项显著增加了规划问题的求解难度，本章采用二阶锥规划方法，通过线性化和凸松弛转化，将原始非凸优化模型转化为符合锥搜索要求的数学模型，有效提高了计算效率。

具体流程为：首先通过 GAN 的方法对 DG 发电数据进行训练，生成能够反映 DG 出力不确定性的场景，同时建立 SOP 和配电网的约束方程。将配电网年综合成本最少设为规划目标，通过线性化和凸松弛转化，将原始非凸优化模型转化为符合锥搜索要求的数学模型，求解目标函数并满足运行约束。具体流程如图 2-4 所示。

二阶锥规划算法是一种基于凸优化理论的数学工具，其核心在于通过二阶锥约束将电力系统中非凸、非线性的规划问题转化为凸优化模型。在 SOP 规划中二阶锥规划算法具有独特的适配优势，可以确保解的唯一性与全局最优性，避免传统启发式算法陷入局部最优的风险，尤其适合多目标协同优化问题。二阶锥规划可兼顾分布式电源出力波动、负荷时序变化等不确定性因素，生成鲁棒性更强的 SOP 规划方案。

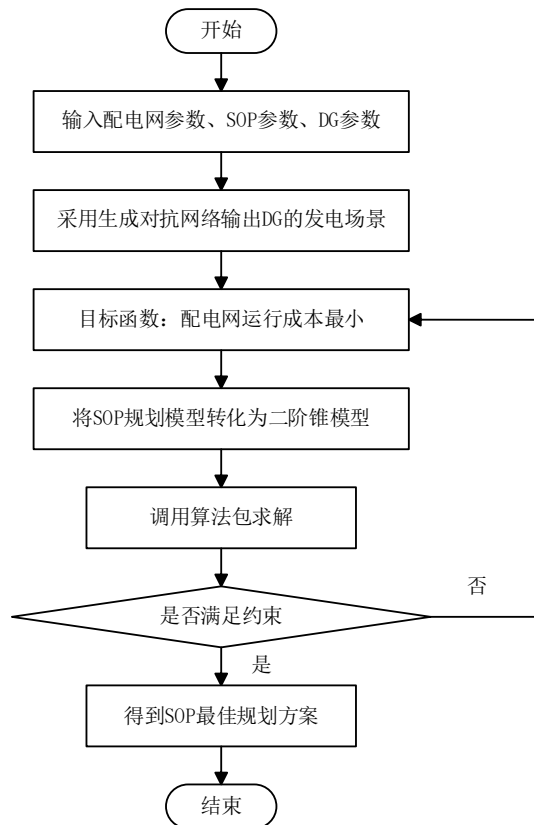


图 2-4 SOP 规划流程图

2.5 算例分析

2.5.1 测试平台与算例系统

为验证所提 SOP 规划模型的有效性，本章选取 IEEE 33 节点标准测试系统开展仿真分析，算例结构如图 2-5 所示。SOP 装置具体技术参数详见表 2-3。根据配电网实际空间布局，将 SOP 候选安装节点限定于原有联络开关位置，并建立位置-容量联合优化模型进行综合求解。

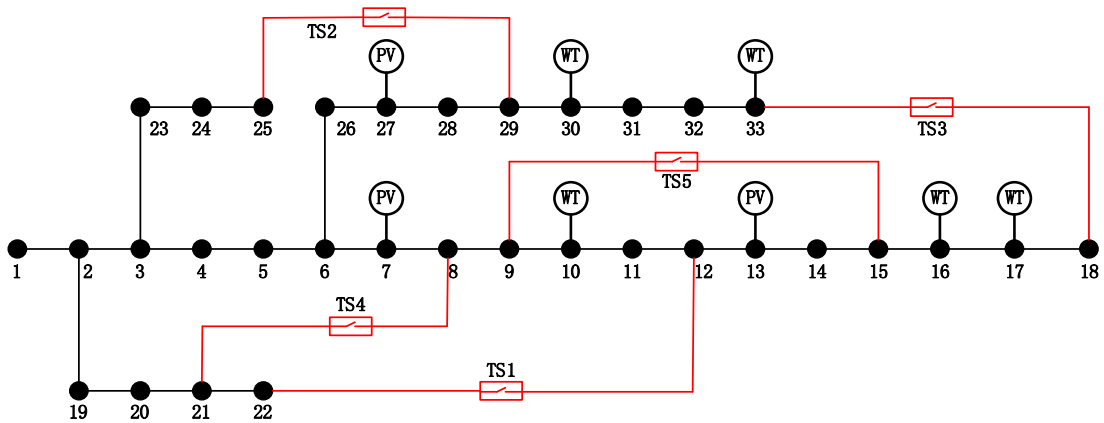


图 2-5 IEEE 33 节点算例结构图

表 2-3 SOP 参数

参数	数值
贴现率	0.08
SOP 经济使用年限/年	20
SOP 单位容量投资成本/（元/KVA）	1000
SOP 单位优化容量/KVA	100
SOP 损耗系数	0.02
SOP 运行维护费用系数	0.01
电价/（KW·h）	0.5

2.5.2 规划结果

本章使用来自 NREL Wind1 和 Solar2 集成数据集^[48]的发电数据构建训练数据集。原始数据的时间间隔为 5 分钟，选择华盛顿州的 24 个风电场和 32 个光

伏电厂作为训练数据集。

本章首先通过模型训练验证了 GAN 在生成具有 DG 出力特征场景方面的有效性，图 2-6 展示了该数据集的训练过程。在前 10000 次迭代中，判别器的输出在生成样本和真实历史样本之间存在较大差异，这表明判别器能够轻松区分样本的来源。经过 15000 次训练迭代后，用 Wasserstein 距离定义的损失函数已经收敛到接近 0，如图 2-6(b)所示。为了证明训练过程的稳定性，我们将迭代次数增加到 35000 次，并且一旦损失函数收敛，就可以通过生成网络获得与历史数据特征相同的 DG 出力场景。

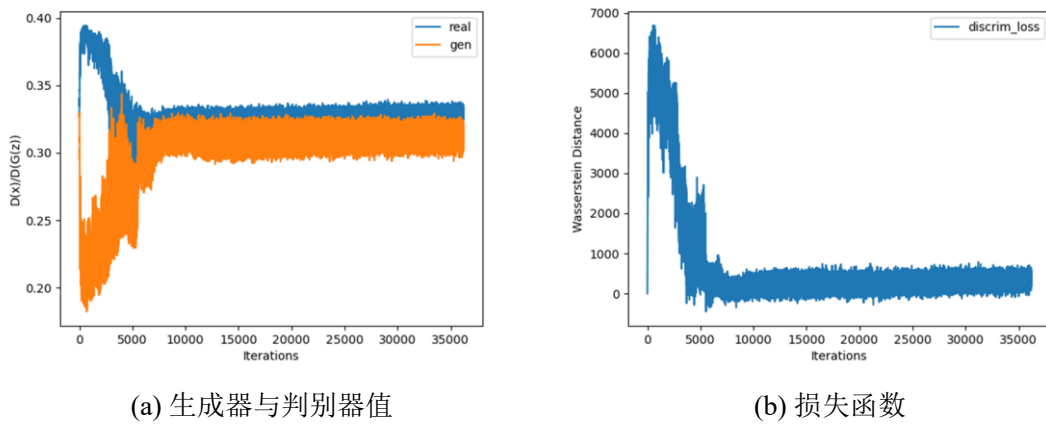


图 2-6 GAN 网络训练过程

生成的场景可以很好地捕捉 DG 出力变化的多样性，图 2-7 是生成的风光发电场景，结果展示了 DG 发电的典型特性，包括显著的功率峰值和快速的功率波动等特征。基于 GAN 生成的风光出力场景在概率分布一致性方面与历史数据高度吻合，相较之下传统参数建模方法难以精确描述新能源出力的随机分布特性，这种数据驱动方法生成的发电场景为配电网内 SOP 的规划配置问题提供了可靠的数据支撑。

通过将风电光伏出力不确定性纳入场景分析，应用所提优化算法对 SOP 位置-容量模型进行求解，得到的规划方案如表 2-4 所示，结果见表 2-5 所示，电压波动情况如图 2-8，所有节点电压均在约束范围内波动，满足系统安全稳定运行的要求。

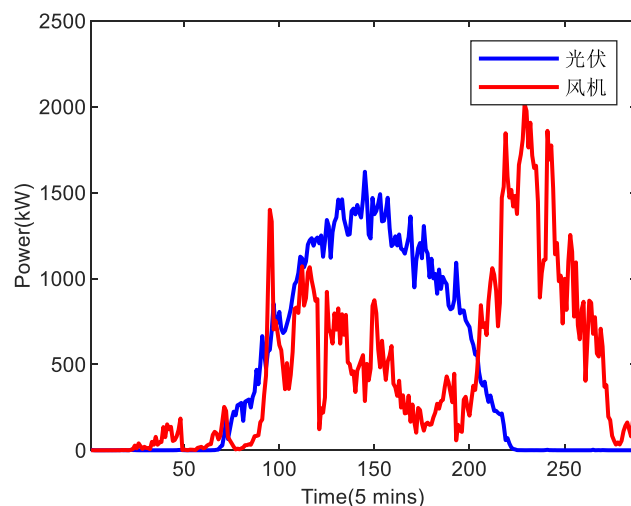


图 2-7 风光发电场景

从表 2-5 中可以看出，规划后比规划前的年综合费用降低了 11.91%，其中，配电系统年损耗费用降低了 30.9%，显著提升了配电系统整体运行的经济效益。随着电力电子技术的进步，SOP 制造成本有望逐步下降，这将进一步凸显 SOP 应用的优势。SOP 具备多模式灵活控制能力，可在系统故障时快速转移功率、在电压超出安全范围时进行无功调节，同时显著提升分布式能源的利用率。从全生命周期角度考量，SOP 不仅在降低电网运营成本方面表现突出，还能有效减少碳排放量。正是这些经济性与环境友好性的特点，使得 SOP 在智能电网建设中的应用前景愈加广阔。

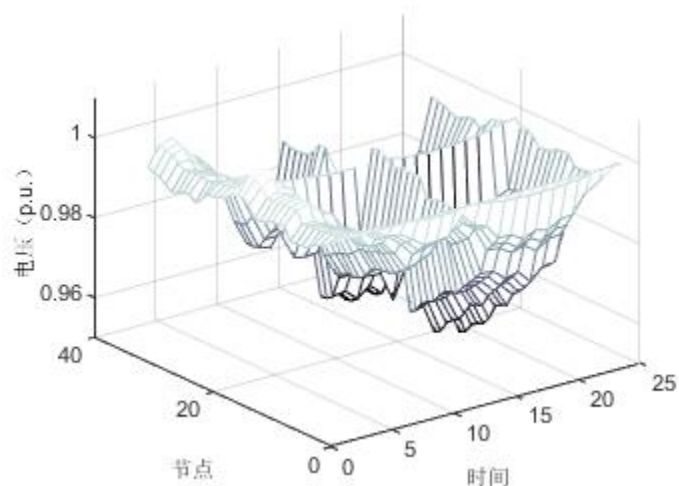


图 2-8 33 个节点 24 小时电压变化情况

表 2-4 SOP 规划方案

开关位置	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
规划方案	0	300kVA	400kVA	100kVA	0

表 2-5 SOP 规划结果

项目/万元	f_I	f_O	f_L	f
规划前	0	0	51.32	51.32
规划后	8.15	1.6	35.46	45.21

2.6 本章小结

本章针对风光发电的间歇特性与功率波动特征，开发了基于 GAN 的分布式能源场景生成技术，构建了考虑 DG 出力特性的 SOP 优化配置模型，以设备投资、运维成本及网损费用构成的年综合成本最小为优化目标。针对模型中的非凸非线性问题，采用凸松弛技术与线性化进行处理，最终将复杂优化问题转化为可高效求解的混合整数二阶锥规划模型。经算例验证，该模型在确保求解精度的同时显著提升了规划方案的经济性和鲁棒性，为高比例新能源接入背景下的配电网升级提供了新的思路。

随着电力电子技术的发展和越来越多的分布式电源接入配电系统，像 SOP 这样的柔性配电设备将广泛应用于配电网中。其主要目的是为了解决大量分布式电源间歇性出力对配电网造成的影响和提高配电网运行的经济性，因此本章提出的基于生成对抗网络配电网智能软开关规划方法优势将变得更加明显。

第3章 考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化

3.1 引言

配电网是电能从发电端到用户端的最后一环，其在电力系统中的重要性不言而喻。DG 的高效消纳、EV 的灵活接入及用户侧需求响应等实际需求，均需通过智能配电网实现。然而，大规模 EV 集群的时空充电特性与 DG 的间歇式出力特征，共同形成了复杂的不确定性源荷场景。这种强随机性易引发配电网双向功率流动、电压幅值越限等运行风险，不仅导致功率损耗显著攀升，还加剧了弃风弃光现象，对供电可靠性构成挑战。因此，亟需优化配电网运行策略以提高其经济性和可靠性。

电力电子技术的快速发展为有源配电网的优化运行创造了新的条件。作为智能柔性配电装备的典型代表，SOP 通过高度可控的 VSC，实现馈线间的潮流控制，逐步替代传统联络开关。SOP 可以实时调节有功、无功潮流并连续控制电压。然而，受限于 SOP 的功率容量和较高的投资成本，传统的无功电压调节装置在短期内难以被完全替代。因此，研究 SOP 与其他调节装置在有源配电网中的协同运行具有重要的现实意义。

针对 EV 和 DG 的日益普及，加剧了有源配电网的源荷功率不均衡和电压波动。SOP 作为一种新型的电力电子装置，可以通过连续的功率调节实现电压控制。考虑到 SOP 可与多个设备协调配合，本章提出一种基于 SOP 的有源配电网运行优化方法。首先基于随机场景生成理论，运用蒙特卡洛法构建考虑源-荷不确定性的日前场景。然后建立 SOP 与传统电压调节设备协同配合的有源配电网运行优化模型，构建以电压波动最小和网络损耗最小为目标函数。针对模型非线性特征，采用凸松弛与线性化对原始模型进行数学重构，转化为混合整数二阶锥规划模型求解。最后，在改进型 IEEE 33 节点测试系统搭建仿真平台，验证优化模型的可行性与高效性。

3.2 电动汽车充电模型

EV 规模化接入电网进行充电，其高渗透率将导致负荷峰值显著提升，引发电网过载及源-荷功率失衡问题，进而威胁系统的安全稳定运行。因此，需在保障经济运行效益的前提下，减少 EV 无序充电对配电网造成的冲击。因此对 EV 充电负荷的准确描述是前提，本章采用蒙特卡洛法生成电动汽车充电负荷，该方法可高效处理不确定性，并对复杂场景适配性强。

1) 日行驶里程概率分布：

鉴于电动汽车数据积累尚处于初期阶段，本研究采用与传统燃油车用户一致的出行行为假设。通过处理家用车辆使用行为数据，证明其日行驶里程符合对数正态分布模型，即 $S \sim \text{Log} - (\mu_s, \delta_s^2)$ ：

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\delta_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\delta_s^2}\right) \quad (3-1)$$

其中：均值 μ_s 为 3.2，方差 δ_s 为 0.88。

假设用户每次出行前电动汽车电池均处于充满状态，结合日行驶里程的概率分布模型，可进一步推导出返程时电池荷电状态(SOC)的概率分布规律。

2) 充电起始时刻概率分布：

EV 充电时间 t_0 服从正态分布，即 $t_0 \sim N(\mu_t, \delta_t^2)$ ：

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\delta_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\delta_t^2}\right) & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\delta_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x + 24 - \mu_t)^2}{2\delta_t^2}\right) & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (3-2)$$

其中，均值 μ_t 为 17.6，方差 δ_t 为 3.4。

3) 充电功率概率分布：

EV 通常采用恒流恒压两段式充电策略，由于恒流阶段持续时间占比相对有限，建模中常将完整充电周期等效为恒功率过程，通过 EV 日行驶里程和充电功率计算，可得到单辆 EV 的充电时间。

4) 电池容量的概率分布

当前家用 EV 动力电池组额定容量有着一定的差异，行业调研数据显示大多数的 EV 电池容量分布在 $20\text{-}30\text{kW}\cdot\text{h}$ 之间，为了便于后续计算，选取 $20\text{-}30\text{kW}\cdot\text{h}$ 范围中的均匀分布来表示不同的电池容量，其概率密度为式(3-3)：

$$f_c(x) = \begin{cases} \frac{1}{10} & 20 \leq x \leq 30 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-3)$$

5) 基于蒙特卡洛法的 EV 充电负荷计算

EV 充电行为具有典型的随机独立性特征，其关键参数包括电池容量、日间行驶工况参数、充电起始时刻分布等，在统计维度上满足相互独立。因此，本章采用蒙特卡洛随机抽样来抽取每个步骤中的随机数，从而求取单台 EV 的充电负荷特征，累加得出 EV 规模化入网充电时的总充电负荷曲线 $P_{EV}^{[49]}$ 。图 3-1 为基于蒙特卡洛法的 EV 充电负荷计算流程。

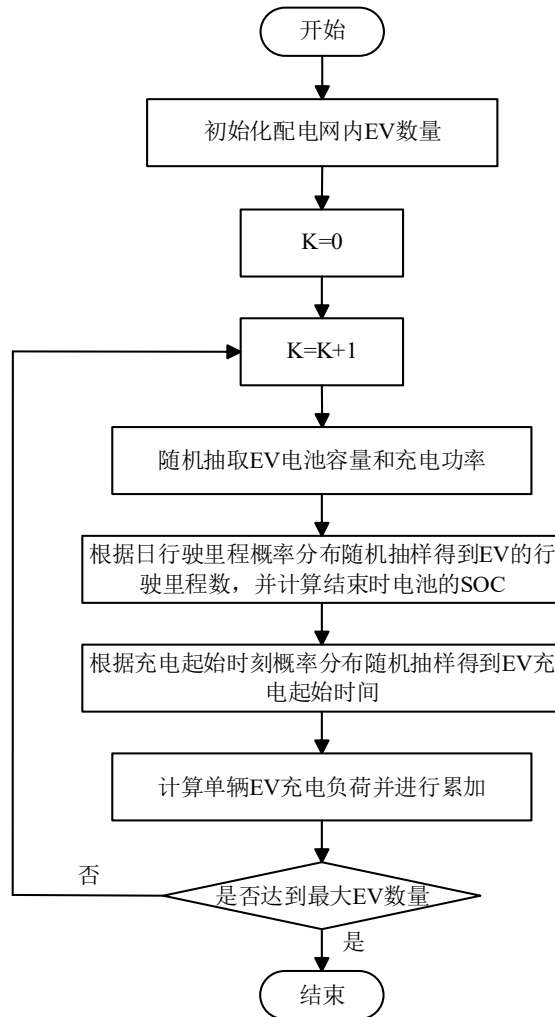


图 3-1 基于蒙特卡洛法的 EV 充电负荷计算流程

具体的 EV 负荷计算流程为先将配电网内 EV 数量的初始化设为 0，每次循环数量值增加 1。在循环中，首先基于概率统计模型对 EV 的电池参数进行随机抽样，获得电池的容量和充电功率，依据日行驶里程的概率分布，随机抽样得到 EV 的行驶里程数，并据此推算出电池在行程结束时的剩余电量。然后，根据充电起始时刻的概率分布，建立单辆 EV 的充电功率时序曲线，通过聚合获得区域内 EV 集群的总体充电负荷分布。当累加的 EV 数量达到预设的最大值时流程结束，得到配电网内 EV 的充电负荷。

蒙特卡洛法是一种基于概率统计理论的数值分析技术，通过大规模随机抽样模拟来解决各类复杂的数学与物理问题，利用大数定律和中心极限定理对复杂系统的随机性进行近似求解。在电动汽车充电负荷预测中具有显著优势，因为它能够很好地应对用户行为的随机性和不确定性，模拟不同情景下的电动汽车充电负荷。EV 充电行为受用户习惯、电池特性等多重随机因素影响，蒙特卡洛法可通过构建多维概率模型（如日行驶里程、充电时长、功率需求的概率分布）生成海量随机场景，全面覆盖充电负荷的可能波动范围，从而更精确地模拟实际充电负荷。通过蒙特卡洛模拟可以获得未来一段时间内的电动汽车充电负荷预测，为电网的调度、规划和运行提供重要的信息。该方法不依赖于复杂的数学建模，而是通过随机数生成器和实验方案进行模拟，从而处理复杂的不确定性问题。

3.3 基于 SOP 的有源配电网运行优化模型

由于 DG 和负荷的波动，电压越限现象时有发生，SOP 可以快速调节无功功率输出，实现有效的电压调节；而由有载调压变压器和电容器组成的无功调节装置受安全风险的限制，只能在较长的时间尺度内调节无功功率，通过上述调节装置相互配合，将电压维持在理想的水平，并降低配电网的运行成本。SOP 可实时调节配电网馈线间潮流，快速响应由 EV 和 DG 引起的电压波动，本节建立了基于 SOP 的运行优化模型。考虑到安全性和经济性的要求，由 OLTC 和 CB 协同配合 SOP 进行功率调节，以避免频繁的动作，同时提高运行效率。当电压越限发生时，通过以上无功调节装置的有效配合，保证了系统的安全运行。

配电网的运行优化问题不仅涉及 SOP 的有功功率和无功功率连续输出，还涉及 OLTC 和 CB 的动作步骤。考虑到多个调节装置在不同时间尺度上的配合，本章建立时间序列优化模型，对配电网的电压调节和功率损耗提供了有效解决方法，在改善电压分布的同时提高了有源配电网的运行效率。优化模型考虑了 SOP 和多个调节装置的协同作用，以消除电压违章，同时最小化运行成本，通过线性化和锥松弛，将混合整数非线性规划模型转化为混合整数二阶锥规划模型来高效求解。

3.3.1 运行优化模型

为了提高配电网运行的经济性和可靠性，本章在高比例新能源接入的情况下提出了基于 SOP 的有源配电网运行优化模型。该模型考虑了 SOP 功率调节、DG 出力、EV 的充电负荷、OLTC 挡位调节、CB 投切等控制变量，以运行损耗和电压波动最小的加权组合为目标函数构建模型。

$$\min f = \beta_1(f_{loss} + f_{switch}) + \beta_2 f_V \quad (3-4)$$

式中： β_1 和 β_2 为权重系数，可由层次分析法得出^[50]； f_{loss} 为配电网运行损耗； f_{switch} 为 OLTC 和 CB 的投切操作成本； f_V 为电压波动幅度。其中 f_{loss} 包括配电网运行损耗和 SOP 的功率传输损耗。

$$f_{loss} = C_{loss} \left(\sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij} r_{ij} I_{ij,t}^2 \Delta t + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij} P_{ij,t}^{SOP,loss} \Delta t \right) \quad (3-5)$$

式中： C_{loss} 为运行损耗成本； r_{ij} 为线路电阻； $I_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 上的电流幅值； Δt 为优化时间。

$$f_{switch} = \sum_{ij} \sum_{t=1}^{N_T} (C_{OLTC} |N_t^{OLTC} - N_{t-1}^{OLTC}|) + \sum_i \sum_{t=1}^{N_T} (C_{CB} |N_{i,t}^{CB} - N_{i,t-1}^{CB}|) \quad (3-6)$$

式中： C_{OLTC} 和 C_{CB} 为 OLTC 和 CB 的运行成本； N_t^{OLTC} 为 t 时刻 OLTC 的挡位； $N_{i,t}^{CB}$ 为 t 时刻 CB 的数量。

$$f_V = \sum_i \sum_{t=1}^{N_T} |U_{i,t}^2 - U_{rated}^2| \quad (3-7)$$

式中： $U_{i,t}$ 和 U_{rated} 分别为 t 时刻节点 i 的电压和额定电压。

$$C^{SOP} = \alpha^{SOP} \sum_k^N c^{SOP} \cdot S_k^{SOP} \quad (3-8)$$

式中： α^{SOP} 为 SOP 维护费用； c^{SOP} 为 SOP 的单位容量建设成本； S_k^{SOP} 为第 k 个 SOP 的容量。

含 SOP 的配电网中相关成本包括 SOP 和配电网的运行成本，其中 SOP 运行成本为式(3-8)，与容量相关；配电网运行成本与式(3-5)和(3-6)相关，乘以 365 天即得到年运行成本。

3.3.2 系统运行约束

为保证配电网安全可靠运行，定义如下约束函数，其中配电网潮流约束包括式(3-9)和(3-10)为有功功率和无功功率平衡，式(3-11)为支路欧姆定律，式(3-12)支路电流约束，式(3-13)和(3-14)为节点注入有功和无功功率的和。

1) 配电网潮流约束

$$\sum_{ij} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^2) + P_{j,t} + P_{ij,t}^{OTLC} = \sum_{ij} P_{jk,t} + P_{jk,t}^{OTLC} \quad (3-9)$$

$$\sum_{ij} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^2) + Q_{j,t} + Q_{ij,t}^{OTLC} = \sum_{ij} Q_{jk,t} + Q_{jk,t}^{OTLC} \quad (3-10)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) = 0 \quad (3-11)$$

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (3-12)$$

$$P_{j,t} = P_{j,t}^{DG} + P_{j,t}^{SOP} - P_{j,t}^{LD} - P_{j,t}^{EV} \quad (3-13)$$

$$Q_{j,t} = Q_{j,t}^{DG} + Q_{j,t}^{SOP} + Q_{j,t}^{CB} - Q_{j,t}^{LD} \quad (3-14)$$

式中： $P_{ij,t}^{OTLC}$ 和 $Q_{ij,t}^{OTLC}$ 为 t 时刻支路 ij 上流过的有功功率和无功功率； $P_{j,t}^{EV}$ 为节点 j 在 t 时刻接入的电动汽车负荷； $Q_{j,t}^{CB}$ 为 CB 注入的无功功率。其余变量在第三章中已详细说明，本章不再赘述。

2) 安全约束

通过安全约束保证支路电压电流维持在额定范围内。

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 < U_{i,t}^2 < U_{i,\max}^2 \\ I_{ij,t}^2 \leq I_{ij,\max}^2 \end{cases} \quad (3-15)$$

式中： $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 电压上下限； $I_{ij,\max}$ 为线路电流容量。

3)DG 约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{DG} \leq P_{i,t}^{DG\max} \\ -Q_{i,t}^{DG\min} \leq Q_{i,t}^{DG} \leq Q_{i,t}^{DG\max} \\ \sqrt{(P_{i,t}^{DG})^2 + (Q_{i,t}^{DG})^2} \leq S_i^{DG} \end{cases} \quad (3-16)$$

式中： $P_{i,t}^{DG\max}$ 为节点 i 在 t 时刻注入有功功率上限； $Q_{i,t}^{DG\min}$ 和 $Q_{i,t}^{DG\max}$ 为无功功率上下限； S_i^{DG} 为节点 i 上 DG 的容量。

4)OLTC 约束

$$\begin{cases} U_{i,t}^2 = U_{j,t}^2 \cdot N_t^{OLTC} \\ N_{\min}^{OLTC} \leq N_t^{OLTC} \leq N_{\max}^{OLTC} \end{cases} \quad (3-17)$$

式中： $N_{\min}^{OLTC}$ 和 $N_{\max}^{OLTC}$ 为 OLTC 挡位上下限。

5)CB 约束

$$\begin{cases} Q_{i,t}^{CB} = N_{i,t}^{CB} \cdot q_i^{CB} \\ 0 \leq N_{i,t}^{CB} \leq N_{\max}^{CB} \end{cases} \quad (3-18)$$

式中： $N_{i,t}^{CB}$ 为节点 i 在 t 时刻投入的 CB 数量； q_i^{CB} 为一组 CB 的无功功率容量； $N_{\max}^{CB}$ 为接入的 CB 总数。

3.4 模型转化

由于目标函数和约束中含有非线性项，现有方法无法有效解决上述基于 SOP 的配电网运行优化问题，本章利用线性化和二次曲线松弛，将原模型转化为混合整数二阶锥规划模型，实现快速准确的计算。混合整数二阶锥规划能够有效地处理具有线性和二次约束条件下的离散决策变量问题，在电网优化方面，混合整数二阶锥规划的优势体现在其能够模型化并解决包含整数变量和二次锥约束的问题。这对于电力系统来说尤其重要，因为它可以处理复杂的电网约束，

如功率平衡方程、支路电流限值、节点电压波动限制、开关操作次数上限等，同时确保所得到的结果既满足物理定律又符合实际运行要求，在配电网的电压稳定性和潮流控制问题中广泛使用。

3.4.1 二阶锥规划模型

二阶锥规划作为凸优化理论体系中的关键分支，可以看作是线性规划和非线性规划的推广^[51]，具有优良的全局最优性和计算效率，其标准形式为^[52]：

$$\min \{c^T x | Ax = b, x \in K\} \quad (3-19)$$

式中： x 是决策变量； c 、 b 和 A 为常数向量和矩阵； K 表示非空尖凸锥的笛卡尔积，常用二次锥(3-20)或旋转二次锥(3-21)表示。

$$K_1 = \{x \in R^n : x_1 \geq \sqrt{\sum_{j=2}^n x_j^2}, x_1 \geq 0\} \quad (3-20)$$

$$K_2 = \{x \in R^n : 2x_1x_2 \geq \sqrt{\sum_{j=3}^n x_j^2}, x_1, x_2 \geq 0\} \quad (3-21)$$

二阶锥规划在数学表达上需遵循严格规范，其目标函数需为决策变量的线性组合形式，同时可行域必须满足线性等式与凸二次锥形约束的双重条件，因此需要对配电网运行优化模型进行转化。

3.4.2 模型转化

配电网的潮流约束以及优化模型中含有非线性项，显著增加了求解过程的计算复杂度。本文基于二阶锥规划算法，通过线性化、凸松弛等技术，使原规划模型满足锥搜索空间的要求，以提升求解效率^[27]。

公式(3-5)，(3-7)，(3-9)-(3-12)，(3-15)，(3-17)中含有电流和电压的平方项，使用 $v_{i,t}$ 和 $i_{ij,t}$ 替换 $U_{i,t}^2$ 和 $I_{ij,t}^2$ ，将上述公式线性化，表示如下：

$$f_{loss} = C_{loss} \left(\sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij} r_{ij} i_{ij,t} \Delta t + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij} P_{ij,t}^{SOP.loss} \Delta t \right) \quad (3-22)$$

$$f_V = \sum_i \sum_{t=1}^{N_T} |v_{i,t} - U_{rated}^2| \quad (3-23)$$

$$\sum_{ij} (P_{ij,t} - r_{ij} i_{ij,t}) + P_{j,t} + P_{ij,t}^{OTLC} = \sum_{ij} P_{jk,t} + P_{jk,t}^{OTLC} \quad (3-24)$$

$$\sum_{ij} (Q_{ij,t} - x_{ij} i_{ij,t}) + Q_{j,t} + Q_{ij,t}^{OTLC} = \sum_{ij} Q_{jk,t} + Q_{jk,t}^{OTLC} \quad (3-25)$$

$$v_{i,t} - v_{j,t} + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) i_{ij,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) = 0 \quad (3-26)$$

$$i_{ij,t} v_{i,t} = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (3-27)$$

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 < v_{i,t} < U_{i,\max}^2 \\ i_{ij,t} \leq I_{ij,\max}^2 \end{cases} \quad (3-28)$$

$$\begin{cases} v_{i,t} = v_{j,t} \cdot N_t^{OLTC} \\ N_{\min}^{OLTC} \leq N_t^{OLTC} \leq N_{\max}^{OLTC} \end{cases} \quad (3-29)$$

式(3-27)中仍存在二次项，对其进一步松弛化。

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij,t} & 2Q_{ij,t} & l_{ij,t} - v_{i,t} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq l_{ij,t} + v_{i,t} \quad (3-30)$$

SOP 模型的约束方程中也含有非线性项，处理如下：

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{i,t}^{SOP} & Q_{i,t}^{SOP} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq S_{ij}^{SOP} \quad (3-31)$$

通过如上线性化和松弛化，将考虑 EV 充电负荷的有源配电网运行优化问题转化为混合整数二阶锥优化模型^[53]，该模型在配电网优化中具有显著优势，尤其是在处理非线性、混合整数和多目标优化问题时^[54]。

3.5 算例分析

本章采用改进 IEEE 33 节点对提出的考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化模型进行分析验证。IEEE 33 节点算例结构如图 3-2 所示，额定电压为 12.66kV，更详细的参数如^[55]所示。

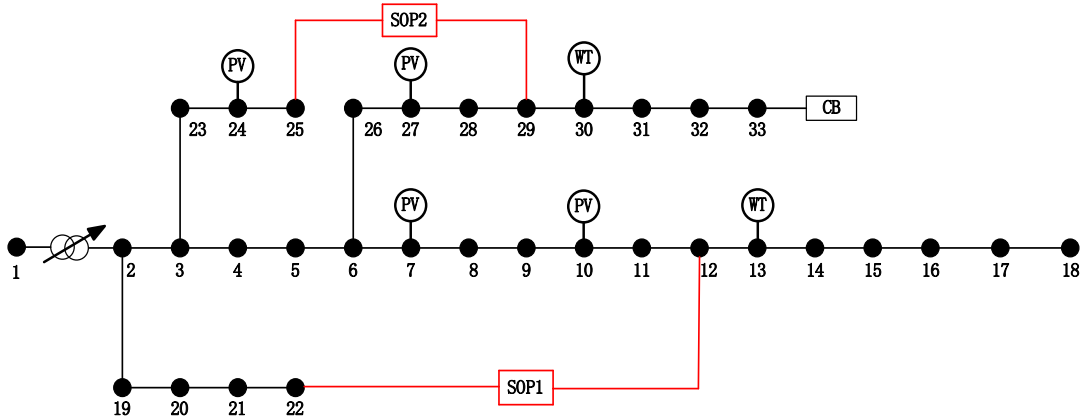


图 3-2 改进 IEEE 33 节点算例结构

3.5.1 源荷场景生成

首先使用蒙特卡洛法抽样得到 EV 的充电开始时刻和日行驶里程，结果如图 3-3 所示。

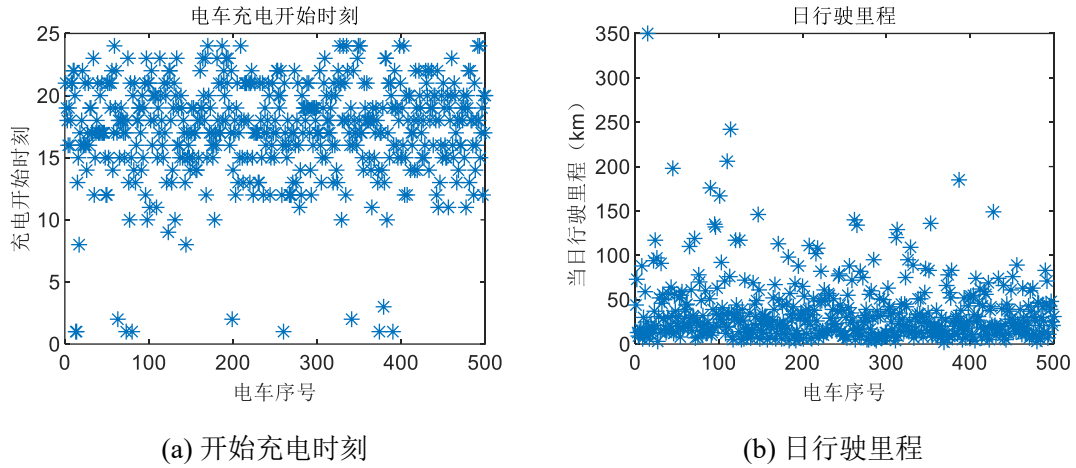


图 3-3 充电起始时刻和行驶里程

由于假设 EV 为恒功率充电，由日行驶里程可计算出所充电量和充电时长，结果如图 3-4 所示，结果累加可得到一定规模下 EV 的充电负荷。

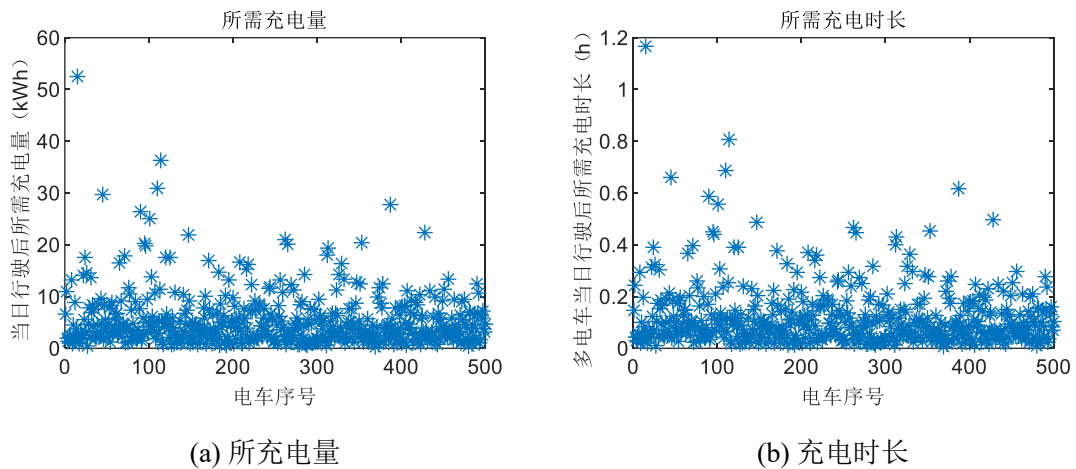


图 3-4 充电电量和时长

本章选取 100、300、500 辆 EV 充电行为进行随机抽样建模，得出不同规模 EV 群体无序充电场景下的负荷随时间变化特性，得出一个调度周期内的日负荷曲线如图 3-5 所示。

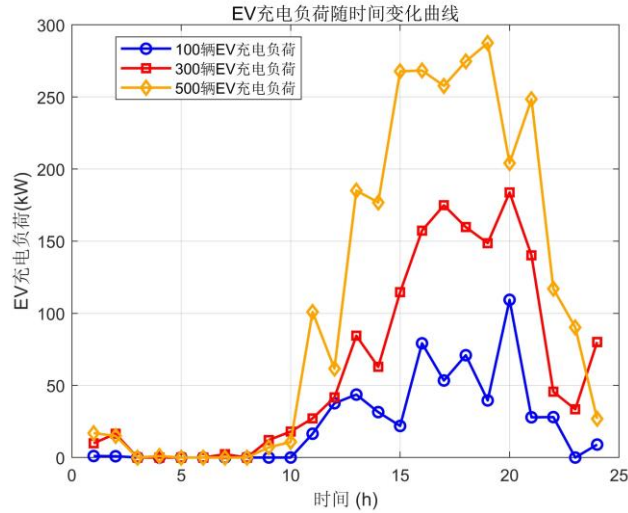


图 3-5 EV 充电负荷

图 3-5 描述了不同数量的 EV 在一天 24 小时的充电负荷，由图可知在 14:00-23:00 时大量 EV 进行充电，在 16:00-19:00 时充电负荷达到峰值，在 2:00-10:00 时之间 EV 充电负荷最低。结果表明 EV 的充电负荷在一天中的分布是不均匀的，随着 EV 数量的增加，充电负荷会显著增加，结合 DG 出力的随机性，源荷功率分布不均衡会进一步加剧，这对电网的负荷管理和电力调度提出了挑战。图 3-6 为源荷功率曲线。

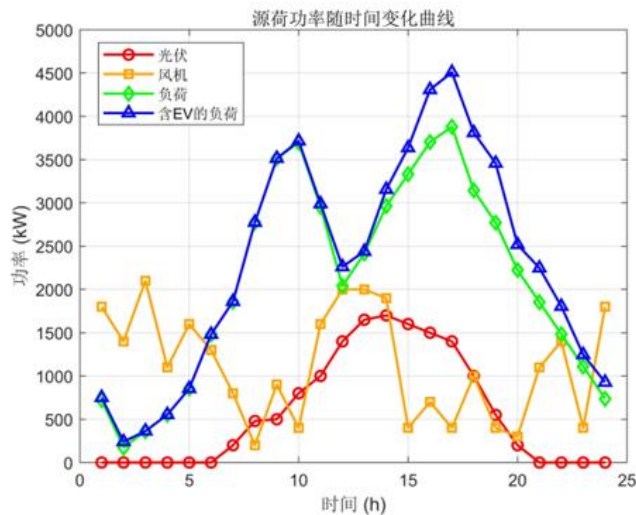


图 3-6 源荷功率曲线

本章选取 500 辆 EV 作为充电负荷与居民负荷累加得到源荷功率随时间变化曲线，并接入 2 台风机与 4 套光伏发电系统在 17:00 时含 EV 的负荷到达峰值，源荷功率不平衡性最大，对电网的潮流和电压波动带来严重影响。

3.5.2 优化结果分析

本章采用 SOP 对有源配电网的潮流进行调节，由于设备的高昂投资成本，为减小 SOP 的安装数量和容量，以及提高传统电压调节设备的使用率，将 SOP 与 OLTC 和 CB 协同配合，实现电压无功控制。

在 IEEE33 节点配电网中节点 12~22 之间安装 SOP1，在节点 25~29 之间安装 SOP2，两个 SOP 容量均为 $500kVA$ ，无功上限为 $300kVar$ ，损耗为 0.02。在节点 1~2 之间安装一个 10 挡位，每个挡位调节范围为 1% 的 OLTC。在节点 33 安装 5 组容量为 $60kVar$ 的 CB。由 AHP 法计算得目标函数中权重为 0.833，为 0.167。

为验证 EV 和 SOP 对配电网的影响，检验本章优化策略的优势，采用以下方案进行对比分析：

方案 1：不含 EV，不含 SOP，验证 DG 接入对配电网运行的影响；

方案 2：考虑 EV，不含 SOP，验证 DG 和 EV 大规模接入对配电网运行的影响；

方案 3：考虑 EV，考虑 SOP，验证 SOP 对配电网的运行优化。

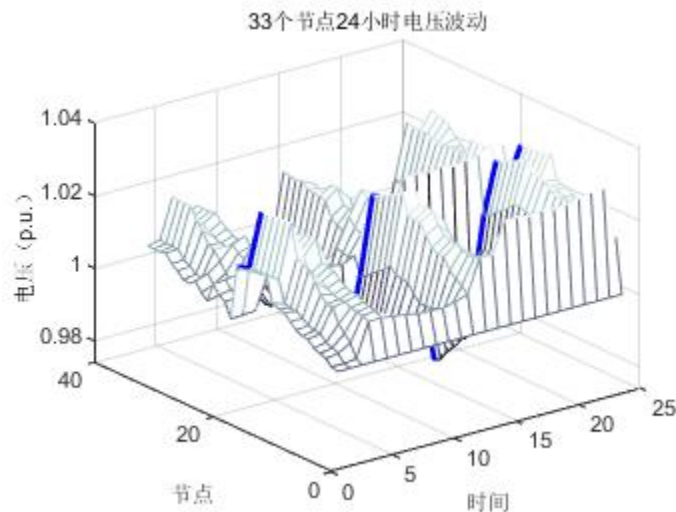


图 3-7 33 个节点 24 小时电压变化情况

大规模 EV 和 DG 的接入造成源荷功率不平衡，电压波动较大，33 个节点一天 24 小时电压变化情况见图 3-7，其中 18 号节点位于配电网最末端，受潮流影响电压波动最为剧烈，存在电压越限的风险。图 3-8 为 18 号节点电压变化曲线，方案 1 中只考虑 DG 出力对电压的影响，随着中午光伏出力增多和夜间风机出力增加，造成电网内潮流增多，电压快速上升，导致发生电压越限。方案 2 中进一步考虑了 EV 作为充电负荷的影响，将 EV 充电负荷和居民负荷叠加，

在 10:00 和 18:00 负荷达到尖峰，造成电压快速下降，尤其是将 EV 考虑在内后导致电压低于额定电压，对电网安全可靠运行带来挑战。方案 3 是本文提出的运行优化策略，通过 SOP 的有功功率和无功功率调节，OLTC 和 CB 的无功电压调节，合理的优化潮流，大幅降低电压波动，把电压控制在 0.97~1.03 内波动，保证了配电网运行的安全性和稳定性，并增强了抗风险的能力。

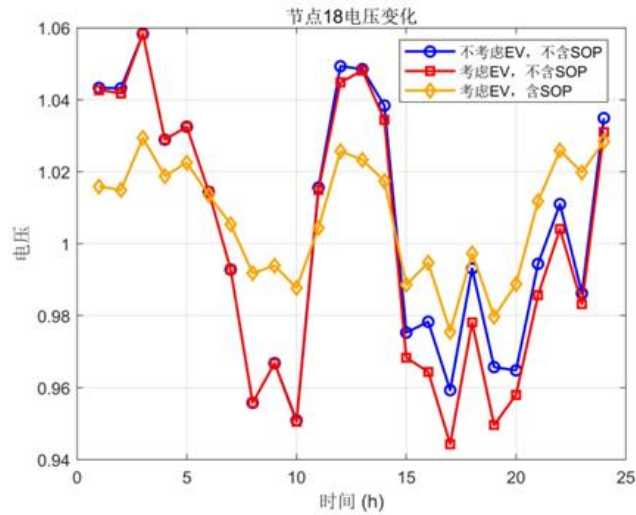


图 3-8 节点 18 电压随时间变化曲线

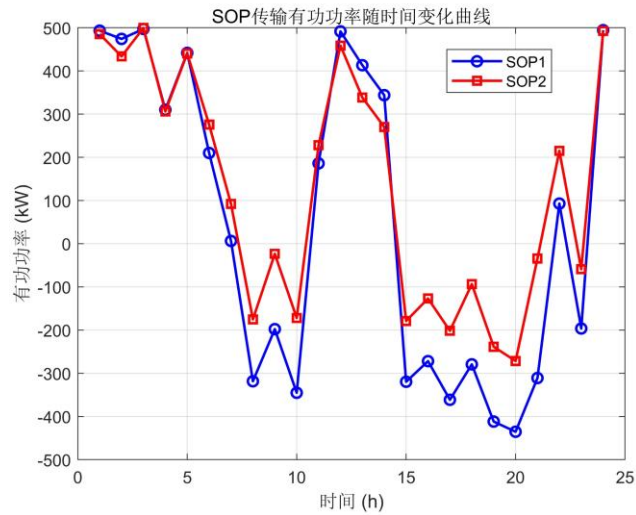


图 3-9 SOP 传输有功功率随时间变化曲线

图 3-9 是 SOP 传输有功功率随时间变化曲线，在 0:00~7:00 和 21:00~24:00 时，风机出力较大，SOP1 向节点 22，SOP2 向节点 25 传输功率，通过主动的功率传输促进可再生能源消纳和减小线路传输损耗。在 8:00~10:00 和 15:00~20:00 时，含 EV 的负荷增加，且大与 DG 的出力，SOP1 向节点 12，SOP2 向节点 29 传输功率，SOP 通过功率的反向传输，缓解了系统的电力需求，

平滑功率波动。在 11:00~14:00 时，DG 出力大与含 EV 的负荷功率，SOP 继续正向传输功率，消纳可再生能源。

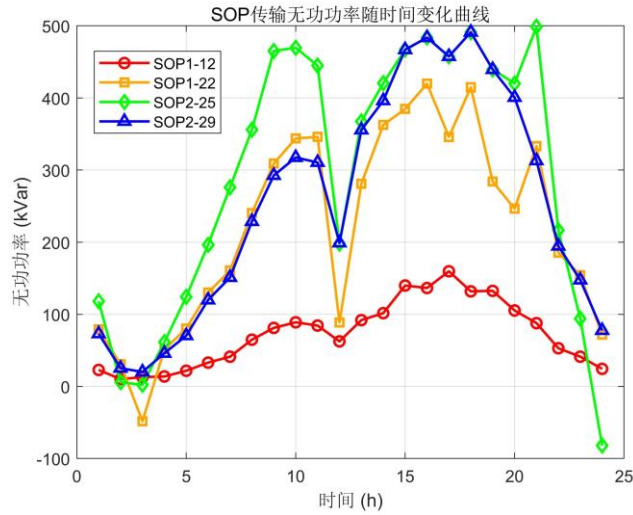


图 3-10 SOP 传输无功功率随时间变化曲线

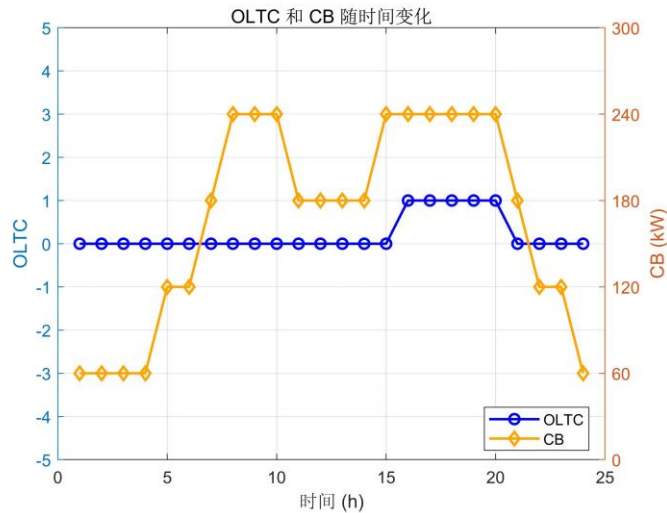


图 3-11 OLTC 和 CB 变化

图 3-10 为 SOP 传输无功功率随时间变化曲线，SOP 各端口在进行有功输出的同时还提供一定的无功支撑，改善了端口附近节点的电压。图 3-11 为 OLTC 和 CB 动作情况，在负荷处于高峰时通过调高 OLTC 的挡位，增加 CB 的投入容量来满足配电网的无功需求，提高电压水平。在负荷处于低谷时，减小 OLTC 的挡位和 CB 的容量来降低电压。通过 SOP、OLTC 和 CB 的协同配合，调节无功功率，使系统电压维持在额定电压附近，提高了电网运行的安全性和经济性。

由表 3-1 分析可得，方案一中由于 DG 出力的随机性造成电压波动和网络损耗增大，配电网运行成本相应较高；方案二中通过增加 EV 的充电负荷，使

得源荷功率不平衡性增大，配电网运行成本进一步上升。方案三通过引入 SOP 进行功率调节，显著降低了电压波动和运行成本。

表 3-1 配电网运行成本

项目/万元	方案 1	方案 2	方案 3
SOP 年运行费用	0	0	2.21
OLTC 和 CB 动作费用	8.45	9.51	0.62
网络损耗费用	23.01	26.87	13.16
总计	31.46	36.38	15.99

由于 EV 作为充电负荷的加入造成了源荷功率不平衡，加剧了配电网的运行损耗，为了缓解电压波动 OLTC 和 CB 动作频率增加，相应的费用也出现了上涨，方案 3 通过引入 SOP 调节功率，对大幅降低配电网的运行成本，有显著成效。

3.6 本章小结

高比例的 EV 和 DG 接入，增加了配电网的源荷功率不平衡，导致电压越限，网络损耗增加等问题^[56]，本文提出了一种考虑电动汽车充电负荷的有源配电网运行优化方法，通过 SOP 与 OLTC 和 CB 协同配合传输有功功率和无功功率，改善配电网潮流，降低电压波动，降低运行损耗。结果表明本方法可将电压稳定在额定电压附近，显著提高了运行效率。

SOP 的应用显著增强了配电网潮流分布的可控能力，可有效解决 DG 高比例接入引发的电压越限、网损增加等问题，提高配电网运行的经济性、可控性和稳定性，拥有广阔的应用前景^[20]。受限于 SOP 的建设成本，考虑多种无功调压设备与 SOP 协同配合优化配电网的运行仍有很多工作要做。

第4章 基于 SOP 的有源配电网故障恢复研究

4.1 引言

随着新型电力系统建设推进，配电网面临多元化负荷需求对高可靠性、优质电能质量及定制化供电的更高诉求^[57]。据运行统计表明，当前电力系统超过八成的供电中断事件源于配电侧设备异常，究其成因主要涉及设备老化、拓扑结构复杂化与分布式资源渗透率提升等多重因素^[58]。因此，有源配电网应具有较强的自愈能力，以适应复杂的故障条件。其自愈能力侧重于对系统运行状态的预见能力，为故障发生做好准备、并从中快速恢复^[59]。在极端严重故障发生时，配电网能够有效的利用各种资源，可以灵活调整以适应环境的改变，并具备从极端故障中迅速恢复的能力。供电恢复是有源配电网的核心功能，对于服务用户的高质量电力需求，提高网络自愈能力具有重要意义。

传统的供电恢复策略可以通过网络重构来实现，由于联络开关不能提供电压支持，网络重构后部分节点电压迅速下降到电压下限，阻碍了恢复水平的进一步提高^[60]。随着 DG 的大规模普及，可控 DG 被认为是在故障情况下提供关键负荷的有效措施。然而，受功率波动的限制，有源配电网中的大多数 DG 不能提供稳定的电压支持。电力电子技术的发展进一步提高了配电网的故障恢复能力，通过使用 SOP 替代传统联络开关，当电力系统遭遇故障时，直流隔离能够发挥关键作用，防止故障电流扩散至其他区域；而在进行供电恢复阶段，还能为受影响的区域提供电压支持，进而增加恢复供电的覆盖面积。利用 SOP 的电压支撑和功率传输在配电网的供电恢复中具有重要意义。

本章首先分析了基于 SOP 的配电网故障处理和供电恢复策略，建立了相应的故障恢复优化模型，由于模型实质上是一个大规模的非线性规划问题，本章采用二阶锥规划进行模型转换和求解。最后，在 IEEE 33 节点系统开展案例分析，以确认所提出模型的准确性和实用性，为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

4.2 基于 SOP 的有源配电网故障恢复策略

在配电网发生故障时，SOP 可精确快速地调整馈线间的功率传输，为故障区域提供有效的电压支持，实现停电区域的快速供电恢复。

4.2.1 SOP 故障恢复原理

SOP 的功能实现主要基于完全可控的电力电子设备，灵活的控制模式和操作策略能够满足 SOP 的多功能需求，例如减少运行损耗、调节电压和恢复供电^[61]。双端 SOP 由两台 VSC 背靠背组成，两个 VSC 的控制模式根据配电系统的运行状态来确定， $U_{dc}Q-PQ$ 控制指一侧 VSC 采用有功和无功功率的调节控制，另一侧采用直流电压的稳定控制； $U_{dc}Q-U_{ac}f$ 控制是指一侧 VSC 实现停电区域的电压支持，另一个实现直流电压的稳定控制。正常情况下，SOP 的控制方式为 $PQ-U_{dc}Q$ 控制，即一个 VSC 控制所接馈线的有功和无功潮流，另一个 VSC 负责直流电压的控制。

如果 VSC1 所连接的馈线发生故障，VSC1 应在故障隔离后切换到 $U_{ac}f$ 控制，SOP 的控制方式为 $U_{dc}Q-U_{ac}f$ 控制。具体而言，VSC1 换流器负责提供电压和频率支撑以实现负荷恢复，而另一换流器 VSC2 则维持直流电压恒定，如图 4-1 所示。

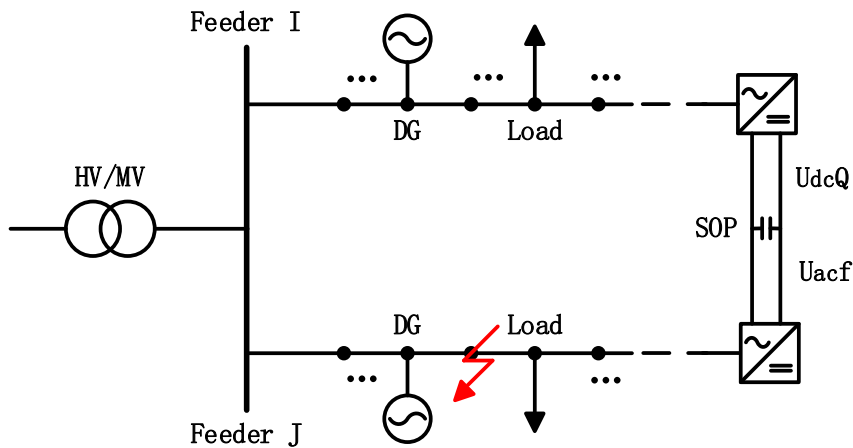


图 4-1 故障状态下 SOP 控制方式示意图

4.2.2 基于 SOP 的配电网故障处理流程

传统的配电网通常采用闭环设计和开环运行。在故障发生时，首先确定

故障位置。随后，通过配电网的保护装置和隔离开关的配合，实现故障的隔离。然后，采用网络重构等方式，为实现恢复供电，将非故障区域的停电负荷转移到其他供电线路上。然而，SOP 的引入改变了系统的运行方式，为故障后配电网的恢复问题带来新的思路。

SOP 采用全控型器件，可在系统故障发生时实现毫秒级快速保护动作。相较于传统配电网保护装置，其故障切除速度具有显著优势，通过瞬时电气隔离有效阻断故障在互联馈线间的传播路径，并维持配电网原有短路容量不变，图 4-2 展示了 SOP 故障处理的流程，具体步骤概括如下：

1)在常规运行状态下，SOP 采用 $U_{dc}Q-PQ$ 控制策略，以确保馈线间功率的精确快速调节；

2)在电网故障情况下，SOP 能够快速响应过电流，并在传统保护继电器动作前自动断开，从而有效降低互联馈线的故障电流水平；

3)断路器动作以隔离故障区域，形成明确的停电范围；

4)在故障后恢复供电阶段，SOP 切换至 $U_{dc}Q-U_{ac}f$ 控制模式，为停电负荷提供电力供应。

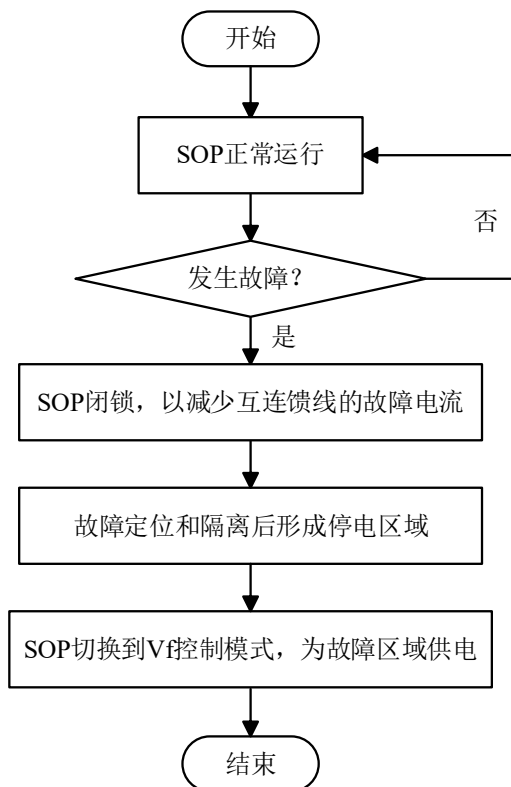


图 4-2 SOP 故障处理流程

本章节以 $10KV$ 中压配电系统为研究对象，假设系统采用小电阻接地方式，考虑 SOP 的配电网故障恢复流程如下图所示，详细动作过程结合配电网将做进一步阐述：

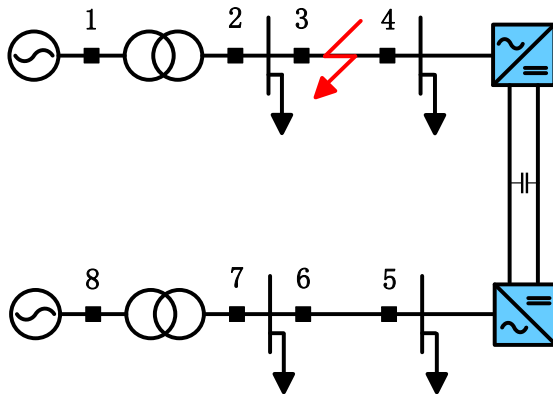


图 4-3 保护装置 3-4 间发生故障

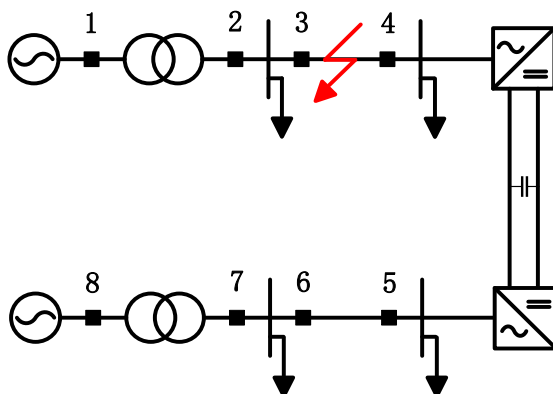


图 4-4 SOP 闭锁

如图 4-3 中 SOP 正常运行时，当配电网中保护 3-4 发生故障；SOP 能迅速闭锁，其响应速度远快于传统保护装置，如图 4-4 所示。

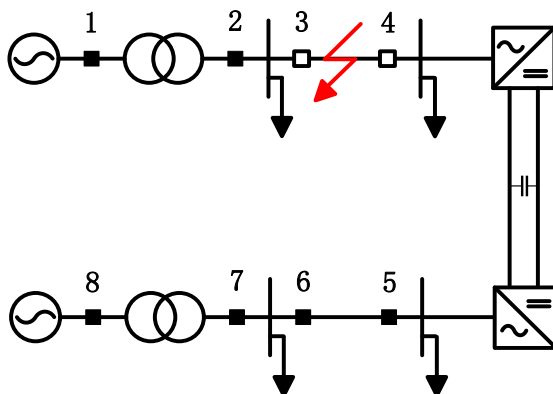


图 4-5 保护装置 3-4 动作，切除并隔离故障故障

配电网保护装置 3-4 动作，精确定位故障点后执行切除与隔离操作，从而

在配电网中形成明确的停电区域。

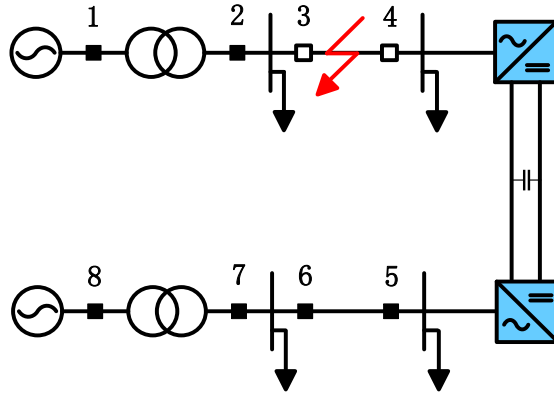


图 4-6 使用 SOP 进行供电恢复

SOP 故障侧的 VSC 切换至 $V_{ac}f$ 控制模式，为停电区域提供必要的电压支撑，进行恢复供电。

4.2.3 影响 SOP 供电恢复因素分析

SOP 的故障恢复效果主要受其空间布局和功率容量制约，如果 SOP 有且只有一个 VSC 端口在停电区域内，则可以通过传输功率恢复停电区域，此外，恢复供电的范围还受到 SOP 容量的限制。

当配电网发生故障时，系统通过精确定位故障点并进行隔离操作，迅速确定停电范围。SOP 作为一种替代联络开关的电力电子设备，用于恢复供电，但不能对所有停电区域进行供电恢复^[70]。根据 SOP 在供电恢复中的有效作用范围，依据 SOP 的安装位置将其划分为以下三种典型场景：

- 1) SOP 的两端均位于非停电区域；
- 2) SOP 的一端处于停电范围内，而另一端位于正常供电区域；
- 3) SOP 的两端均位于停电范围内。

SOP 本身不具备产生有功功率的能力，依据其控制模式和作用原理，它需要一端与非停电区域相连以获得有功功率支持，另一端则要与停电区域相连，为其提供电压支撑^[71]。

由于 SOP 传输的有功和无功功率均受其容量限制，供电恢复的范围也因此受到 SOP 额定容量的制约。

$$\sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \leq S_{ij}^{SOP} \quad (4-1)$$

为了量化 SOP 的影响区域，供电恢复问题中包含了 SOP 的容量限制。SOP 的影响区域也受到恢复负载电压等级的限制。

4.3 基于 SOP 的有源配电网故障恢复模型

本章考虑到 SOP 可以传输有功功率进行故障恢复，还可以提供无功功率改善电压波动、降低运行网损。因此，提出了一种提高有源配电网自愈能力的供电恢复模型，该模型充分利用 SOP 在功率传输方面的优势，进一步提高了故障条件下的负荷恢复水平。

4.3.1 数学模型

在研究配电网供电恢复策略时，应着重分析故障隔离后系统的运行特性。为此，本章构建了单个潮流断面模型进行研究。考虑到 SOP 在故障处理过程中不仅能实现供电恢复，还可通过提供无功功率来优化电压分布并降低系统损耗，以此建立了以恢复供电的有功负荷最大和运行网损最小为目标的数学模型，其数学表达式如下：

$$\min f = -\beta f_{Load} + \theta f_{Loss} \quad (4-2)$$

$$f_{Load} = \sum_{i \in n} \delta_i P_i^{Load} \quad (4-3)$$

$$f_{Loss} = \sum_{ij \in b} r_{ij} I_{ij}^2 + \sum_{i \in n} P_i^{SOP, Loss} \quad (4-4)$$

式中： f_{Load} 为恢复供电的有功负荷； f_{Loss} 为运行网损； β 、 θ 为其目标对应的权重系数，且 $\beta \gg \theta$ ； P_i^{Load} 为节点 i 负载的有功功率； δ_i 为可恢复节点上的系数，取值范围为 0 至 1； n 和 b 为配电网中全部节点和支路集合； r_{ij} 为支路 ij 的电阻； I_{ij} 为支路电流幅值； $P_i^{SOP, Loss}$ 为节点 i 上 SOP 消耗的功率。

为了迅速恢复非故障区域的电力供应，同时兼顾可靠性、经济性与安全性，必须综合考量负荷恢复水平、系统功率平衡、线路损耗、电压波动以及 SOP 运行约束条件等诸多因素^[72]。因此，供电恢复实质上是一个兼具多目标和约束条件的优化问题。相关约束如下：

1) 配电网潮流约束

$$\sum_{ij \in b} (P_{ij} - r_{ij} I_{ij}^2) + P_j = \sum_{ij \in b} P_{jk} \quad (4-5)$$

$$\sum_{ij \in b} (Q_{ij} - x_{ij} I_{ij}^2) + Q_j = \sum_{ij \in b} Q_{jk} \quad (4-6)$$

$$U_i^2 - U_j^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad (4-7)$$

$$I_{ij}^2 U_i^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (4-8)$$

$$P_j = P_j^{DG} + P_j^{SOP} - \delta_j P_j^{Load} \quad (4-9)$$

$$Q_j = Q_j^{DG} + Q_j^{SOP} - \delta_j Q_j^{Load} \quad (4-10)$$

式中： P_{ij} 和 Q_{ij} 分别支路 ij 上从 i 流向 j 的有功功率和无功功率； P_j 和 Q_j 分别是节点 j 注入的有功功率和无功功率； P_j^{DG} 和 Q_j^{DG} 分别为节点 j 上 DG 注入的有功功率和无功功率； P_j^{SOP} 和 Q_j^{SOP} 分别为节点 j 上 SOP 注入的有功功率和无功功率； P_j^{Load} 和 Q_j^{Load} 分别为节点 j 负载消耗的有功功率和无功功率。

2)安全约束

$$U_{\min}^2 \leq U_i^2 \leq U_{\max}^2 \quad (4-11)$$

$$I_{ij}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (4-12)$$

式中： $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 分别为节点允许的电压上下限； $I_{\max}$ 为支路电流的最大值。

3)SOP 运行约束

将 SOP 应用于配电网供电恢复过程时，其运行控制策略与常规工况存在显著差异。具体而言，在系统正常运行期间，SOP 的双端均具备独立调节有功功率和无功功率的能力，可实现基于既定控制目标的灵活调控^[69]；而在供电恢复场景下，系统控制变量发生转变：SOP 故障端电压幅值与非故障端无功功率成为决策变量，其余相关参数则转化为状态变量，这些状态变量与故障端电压水平、受停电影响区域的负荷规模等运行参数有密切关系。

$$U_j^{SOP} \geq U_o \quad (4-13)$$

$$P_i^{SOP} + P_j^{SOP} + P_i^{SOP, Loss} + P_j^{SOP, Loss} = 0 \quad (4-14)$$

$$P_i^{SOP, Loss} = A_i^{SOP} \sqrt{(P_i^{SOP})^2 + (Q_i^{SOP})^2} \quad (4-15)$$

$$P_j^{SOP, Loss} = A_j^{SOP} \sqrt{(P_j^{SOP})^2 + (Q_j^{SOP})^2} \quad (4-16)$$

$$\sqrt{(P_i^{SOP})^2 + (Q_i^{SOP})^2} \leq S_i^{SOP} \quad (4-17)$$

$$\sqrt{(P_j^{SOP})^2 + (Q_j^{SOP})^2} \leq S_j^{SOP} \quad (4-18)$$

式中： U_j^{SOP} 为 SOP 故障侧 VSC 的电压； U_o 为电压标么值； A_i^{SOP} 为 SOP 节点 i 侧 VSC 的损耗系数。

4.3.2 转化为二阶锥模型

二阶锥规划模型因其搜索空间具备光滑性、封闭性和对称性等数学特性，在求解效率上显著优于传统非线性规划方法。在基于 SOP 的有源配电网故障恢复研究中，使用二阶锥规划模型进行求解同样具有良好的适用性考虑到配电网潮流优化模型中普遍存在的二次项和乘积项等非线性特征，为满足 SOCP 模型对线性目标函数和锥形搜索空间的要求，通常需要采用线性化处理 and 凸松弛等技术手段对原始故障恢复模型进行重构^[62]。具体来说，首先对节点电压幅值的平方和支路电流幅值的平方进行变量替换，得到如下形式：

$$(P_i^{SOP})^2 + (Q_i^{SOP})^2 \leq 2 \frac{S_i^{SOP}}{\sqrt{2}} \frac{S_i^{SOP}}{\sqrt{2}} \quad (4-19)$$

$$(P_j^{SOP})^2 + (Q_j^{SOP})^2 \leq 2 \frac{S_j^{SOP}}{\sqrt{2}} \frac{S_j^{SOP}}{\sqrt{2}} \quad (4-20)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} & 2Q_{ij} & l_{ij} - v_i \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq l_{ij} + v_i \quad (4-21)$$

采用变量替换能够有效实现非线性问题向线性问题的转化，显著提升计算效率。此外，二阶锥规划在处理具有非线性目标函数和复杂约束条件的优化问题时具有多种优势。首先，通过数学变换简化了问题的复杂度，增强了模型的线性特征；其次，在计算性能方面，二阶锥规划显著缩短了求解时间，提高了计算效率；而且，能够保证获得全局最优解，避免了传统方法可能陷入局部最优的缺陷^[68]。

4.4 算例分析

本章分析了基于 SOP 的有源配电网故障恢复方法，并在改进 IEEE 33 节点配电网进行了验证^[63]。配电网由 32 条线路和 5 个联络开关组成。电压等级为 12.66 kV，总有功负荷为 3715kW，总无功负荷为 2300kVar。SOP 的位置与原始联络开关的位置相同，在节点 12-22 之间安装 SOP，SOP 的概率传输效率通常可以达到 98%，因此假设 SOP 的每个 VSC 的损耗系数为 0.02^[64]。

设恢复供电的节点电压允许在 [0.95,1.05] 内波动。由于故障恢复模型中以恢复最大负荷为主要目标，所以恢复总负荷的权重系数 β 远大于 θ ， β 设为 100， θ 设为 1^[67]。假设 2-3 线路发生永久性三相故障，在隔离故障后，节点 3 至节点 18、节点 23 至节点 25、节点 26 至节点 33，三条馈线负荷全部停运，总停电有功功率为 3255kW。

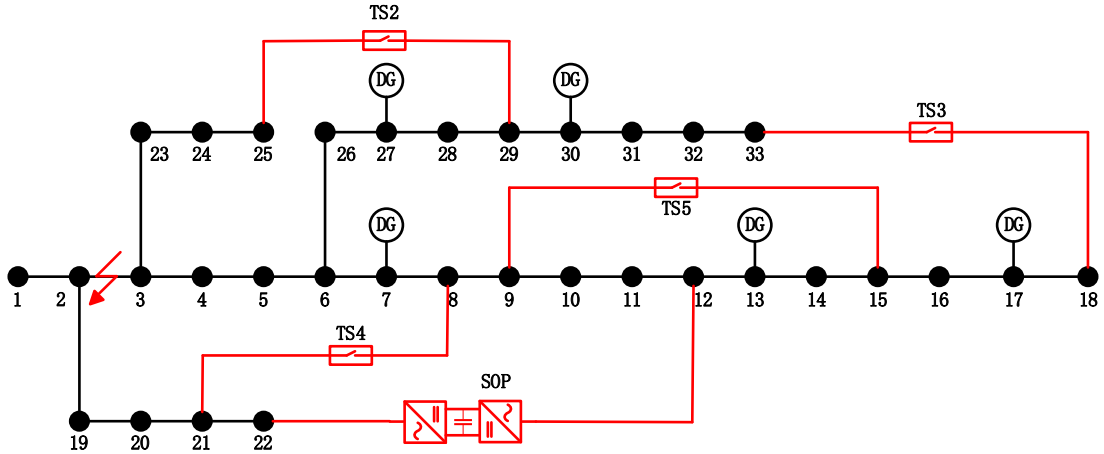


图 4-7 配电网结构图

本章首先验证不同容量 SOP 对故障恢复的影响，将 SOP 的容量分别设置为 1、2、3、4 和 5MVA。负荷恢复情况见表 4-1，各节点恢复比例见表 4-2，节点电压见图 4-8。

表 4-1 负荷恢复情况

SOP 容量 (MVA)	1	2	3	4	5
恢复有功负荷 (kW)	937.4	1786.3	2573.2	3036.7	3036.7
恢复比例	28.8%	54.88%	79.05%	93.3%	93.3%

表 4-2 各节点恢复负荷比例

节点编号	SOP 容量			
	1MVA	2 MVA	3 MVA	4 MVA
3	1	1	1	1
4	0	0	0	1
5	0	0.58	1	1
6	1	1	1	1
7	0	1	1	1
8	0.79	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	0	1	1	1
12	0	1	1	1
13	0	1	1	1
14	0	0.68	1	1
15	1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	1	1	1	1
18	1	1	1	1
23	0	0	0	1
24	0	0.5	1	1
25	0	0	0.81	0.92
26	1	1	1	1
27	1	1	1	1
28	1	1	1	1
29	0	0	0	1
30	0	0	0	0
31	0.3	1	1	1
32	0	0.08	1	1
33	0	0	0	1

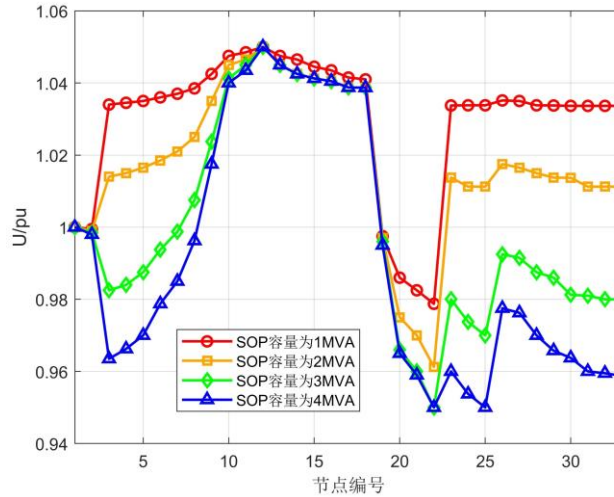


图 4-8 不同 SOP 容量下对电压的影响

随着 SOP 容量的增加，其灵活调节电压和功率的能力使得供电恢复效果得到显著提升。当 SOP 容量较小时，可以通过有功功率传输恢复供电，通过无功功率传输提供电压支持，但较小的容量限制了恢复负荷的比例。当 SOP 容量提高时，传输的功率大幅增加，为失电负荷提供功率，但同时也引发了节点电压急剧下降的技术瓶颈。以 22 号节点和 25 号节点为例，其电压标么值已降至 0.95 的临界阈值，这种电压稳定性问题成为制约 SOP 供电恢复效能提升的主要因素。

由于 SOP 只能传输功率，并不产生功率，为考虑 DG 出力对供电恢复的影响，配电网内共接入 5 台 DG，其中功率因数为 1，DG 安装容量见表 4-3。

表 4-3 DG 安装参数

位置	7	13	17	27	30
容量 (kVA)	300	200	300	400	200

在恢复手段上，传统恢复供电一般采用联络开关^[65]。与联络开关相比，SOP 的协调可以提供电压支持，有效地扩大供电恢复范围，提高负荷恢复水平^[66]。假设 5-6 支路发生永久性三相故障，在隔离故障后，节点 6 至节点 18、节点 26 至节点 33，两条条馈线负荷全部停运，总停电有功功率为 2055kW，SOP 容量为 2MVA。本章将采用联络开关和采用 SOP 的供电恢复方法进行对比，设置两组对比试验，分析如下。

方案 1：节点 12-22 间采用联络开关对有源配电网进行故障恢复；

方案 2：节点 12-22 间采用 SOP 对有源配电网进行故障恢复。

两种方案故障恢复结果见表 4-4，方案 2 中 SOP 控制方式见表 4-5，各节点电压变化情况见图 4-9 各节点电压变化。

表 4-4 故障恢复结果

方案	恢复总负荷	百分比	失电节点
1	1763.7	84.51%	30、32、33
2	2055	100%	无

表 4-5 SOP 控制方式

VSC 变流器	控制模式	参数
VSC1-22	P / kW	-762.7
	$Q / kVar$	130.8
VSC2-12	U	1.05
	f / Hz	60

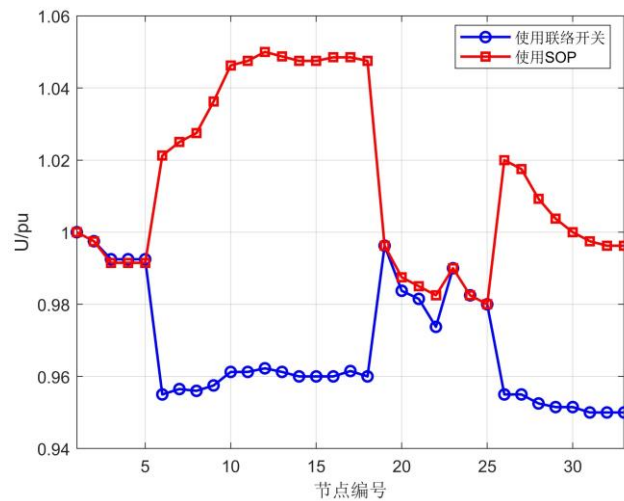


图 4-9 各节点电压变化

DG 的并网运行虽然为失电区域提供了必要的功率支撑，但由于大多数 DG 采用 PQ 控制模式，在系统故障时通常会与电网断开连接，不仅导致功率供应不足，还影响了可再生能源的有效利用。在方案 1 中，依赖联络开关提升负荷恢复率会引发节点电压骤降问题，以节点 32 和 33 为例，其电压标幺值已降至 0.95 的临界值，严重制约了供电恢复效果。而在方案 2 中，SOP 充分发挥了其双向功率调节和动态电压支撑能力，不仅充分弥补了 DG 离网导致的功率缺失，还完成了停电区域的负荷恢复，大幅提高了配电网的供电稳定性。

4.5 本章小结

本章首先研究了基于 SOP 的配电网故障处理与供电恢复方案，探讨了 SOP 的安装位置和容量配置对恢复性能的影响。为提升配电网的自愈能力，建立了有源配电网故障恢复优化模型，采用二阶锥规划方法进行模型重构与求解。最后通过 IEEE 33 节点测试模型并进行了案例分析，以确认所提出模型的准确性和实用性，为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

在全球能源结构加速转型的背景下，清洁能源在电力系统中的渗透率持续攀升，配电网的智能化和柔性化需求日益迫切。SOP 作为一种关键的柔性调控装置，在增强配电网供电可靠性、改善潮流分布特性以及提高可再生能源消纳能力等方面具有重要的工程应用价值。受制于设备投资成本高昂，以及 SOP 接入规模与配电网性能提升呈现非线性关系，存在明显的边际效益递减规律，大规模 DG 接入会影响 SOP 规划问题的准确性；配电网中 EV 和 DG 的大规模接入，造成源荷功率不平衡，系统功率损耗显著上升，节点电压剧烈波动，这些现象严重威胁着配电网的安全稳定运行；故障条件下，通过使用联络开关和可控 DG 的方法不能提供稳定的电压支撑，造成部分节点电压迅速下降到电压下限，阻碍了恢复水平的提高。结合上述问题，论文的主要工作与总结如下：

(1)针对配电网内 DG 渗透率的不断提高，造成潮流双向等问题，为解决 DG 间歇性出力的影响，提出了一种基于生成对抗网络的有源配电网 SOP 规划方法。通过分析生成对抗网络和 Wasserstein 距离的理论，设计了用于训练风光发电数据的生成对抗网络模型。为准确模拟 DG 的运行特性，采用生成对抗网络进行场景生成。然后建立含 SOP 的配电网运行约束模型，并将年综合费用最小作为目标函数。采用凸松弛和线性化对原始非凸非线性模型进行数学重构，将其转化为可求解的二阶锥规划模型，进而在满足约束的前提下实现目标函数的优化求解。从实验结果中可以看出 SOP 的安装应用有效解决了 DG 出力不确定性的影响，大幅降低配电网的运行成本。

(2)针对 EV 和 DG 的日益普及，加剧了有源配电网的源荷功率不均衡和电压波动。SOP 作为一种新型的电力电子装置，可以通过连续的功率调节实现电压控制。考虑到 SOP 可与多个设备协调配合，设计了一种基于 SOP 的有源配电网运行优化方法。采用蒙特卡洛法构建日前场景，有效表征源-荷双侧功率的不确定性特征。然后，将 SOP 与传统无功调压装置进行协同配合，建立运行损耗最小和电压波动最小的运行优化模型，采用线性化技术和二次凸松弛，将原始

优化模型重构为混合整数二阶锥规划模型，显著提升了模型的可求解性。为验证所提方法的有效性，基于改进型 IEEE 33 节点配电系统测试平台开展仿真实验，实验结果表明优化模型有效解决了源荷功率不平衡的影响，将电压稳定在额定电压附近，降低运行损耗，显著提高了运行效率。

(3)针对传统供电恢复策略不能提供稳定的电压支持，恢复供电后部分节点电压迅速下降到电压下限，阻碍了恢复水平的进一步提高。通过系统分析 SOP 在配电网故障处理与恢复中的应用策略，构建了一个基于 SOP 的有源配电网故障恢复模型，并在 IEEE 33 节点测试模型并进行了案例分析，结果表明 SOP 的应用可以高效解决运行故障，不仅为故障区域提供了持续的电能供应，还通过动态电压支撑有效改善了失电区域的电能质量，从而显著提升了配电网整体供电可靠性，为配电网在故障条件下的快速恢复提供了经济、安全、高效的方法。

5.2 展望

本文主要研究了 SOP 在有源配电网的选址定容、运行优化和故障恢复问题。虽然对于 SOP 的规划和应用取得了一些研究成果，但由于个人研究能力的限制，本文的研究工作仍有进一步改进和提升的空间。主要内容如下：

(1)目前的 SOP 选址定容研究中，场景生成问题多采用传统数学模型，也有采用深度学习的方法，但其对风光出力和负荷用电不确定性的建模仍有不足。可以通过使用条件生成对抗网络的方法，将历史数据进行分类作为条件进行训练，模拟源荷出现的多种可能性；在规划模型方面，可以将运行优化和故障恢复问题进行综合考虑，提升有源配电网的运行水平。

(2)有源配电网内 SOP 的运行优化方面，可以拓展多时间尺度的优化控制，考虑日、小时、分钟级别的优化策略，精准调控配电网的运行状态，以更好地应对 DG 和负荷的不确定性。

(3)在故障恢复方面，可以考虑更多不确定性因素和风险因素，建立更加鲁棒和可靠的故障恢复模型，引入风险评估和管理方法，提高系统的抗风险能力。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] 魏旭, 刘东, 高飞, 等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术, 2023, 47(09): 3648-3661.
- [3] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [4] Ji H, Wang C, Li P, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic integration[J]. IEEE Trans Sustain Energy, 2019, 10(1): 280–289.
- [5] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [6] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(05): 13-23.
- [7] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电软开关运行与规划方法[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [8] 刘东. 智能配电网的特征及实施基础分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 26(1): 82-85.
- [9] Cao W, Wu J, Jenkins N. Feeder load balancing in MV distribution networks using soft normally-open points[C]. Proceedings of 2014 Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2014, Istanbul, Turkey: 1-6.
- [10] Bloemink J M, Green T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points[C]. Proceedings of 2011 IEEE PES General Meeting, 2011, San Diego, USA: 1-8.
- [11] Cao W, Wu J, Jenkins N, et al. Operating principle of Soft Open Points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2021, 164: 245-257.
- [12] Wang J, Zhou N, Chung C Y, et al. Coordinated planning of converter-based DG units and soft open points incorporating active management in unbalanced distrib

- ution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(3): 2015-2027.
- [13] Xiao H, Pei W, Li K, Optimal sizing and siting of soft open point for improving the three phase unbalance of the distribution network[C]. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, Jeju, Korea (South), 2080-2084.
- [14] 王群, 董文略, 杨莉. 基于Wasserstein距离和改进K-medoids聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
- [15] Chen Y, Wang Y, Kirschen D, et al. Model-free renewable scenario generation using generative adversarial networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3265-3275.
- [16] 董骁翀, 孙英云, 蒲天骄. 基于条件生成对抗网络的可再生能源日前场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5527-5536.
- [17] Wang C, Song G, Li P, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.
- [18] 王志强, 方正, 徐艺铭, 等. 计及重要用户失负荷风险的多端智能软开关优化配置方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(04): 1142-1153.
- [19] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(02): 1-11.
- [20] 熊正勇, 陈天华, 杜磊, 等. 基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(08): 129-137.
- [21] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(04): 1-14.
- [22] Liu M B, Canizares C A, Huang W. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations[J]. IEEE Transactions on Power System, 2019, 24(2): 889-899.
- [23] 丛鹏伟, 唐巍, 娄铨伟, 等. 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(06): 1263-1272.

- [24] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(09): 82-87.
- [25] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(09): 2315-2321.
- [26] Li P, Ji H, Yu H, et al. Combined decentralized and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2019, 241: 613-624.
- [27] Li P, Ji H, Wang C, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(04): 1430-1442.
- [28] 张博, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于SOP和VSC的交直流混合配电网多时间尺度优化控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(09): 11-19.
- [29] Sun F, Ma J, Yu M, et al. Optimized two-time scale robust dispatching method for the multi-terminal soft open point in unbalanced active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(01): 587-598.
- [30] 王志强, 方正, 刘文霞, 等. 基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(07): 37-44.
- [31] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
- [32] Li Z, Ye Y, Ma X, et al. Single-phase-to-ground fault section location in flexible resonant grounding distribution networks using soft open points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 12(02): 106-122.
- [33] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于SOP的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(05): 1453-1465.
- [34] 刘文霞, 刘鑫, 王荣杰, 等. 含柔性多状态开关的多端互联配电系统可靠性评估与量化分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1114-1124.
- [35] 祝旭焕, 童宁, 林湘宁, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网负荷在线紧急转供策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 87-95.

- [36] 胡玉, 顾洁, 马睿, 等. 面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 85-91.
- [37] Li P, Ji J, Ji H, et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. Energy, 2020, 19(05): 116-132.
- [38] Aithal A, Li G, Wu J, et al. Performance of an electrical distribution network with soft open point during a grid side AC fault[J]. Applied Energy, 2018, 227: 262-272.
- [39] Li Z, Tang Z, Chao W, et al. Multi-objective supply restoration in active distribution networks with soft open points[C]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018, Beijing, China, 1-5.
- [40] Ji H, Wang C, Li P, et al. SOP-based islanding partition method of active distribution networks considering the characteristics of DG, energy storage system and load[J]. Energy, 2018, 155: 312-325.
- [41] Wang J, Zhou N, Wang Q. Data-driven stochastic service restoration in unbalanced active distribution networks with multi-terminal soft open points[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 12(04): 106-121.
- [42] 石甜静. 基于智能软开关的配电网运行优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [43] Holttinen H, Lemstrom B, Meibom P, et al. Design and operation of power systems with large amounts of wind power[J]. State of The Art Report, 2022, 2493: 1-23.
- [44] 黄越辉, 孙亚南, 李驰, 等. 基于条件生成对抗网络的多区域风电短期出力场景生成方法[J]. 电网技术, 2023, 47(01): 63-77.
- [45] Mi J, Ma C, Zheng L, et al. WGAN-CL: A Wasserstein GAN with confidence loss for small-sample augmentation[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 23(03): 176-189.
- [46] Goodfellow IJ, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 27(04): 2672-2680.

- [47] Radford A, Metz L, Chintala S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks[C]. ICLR 2016 - Conference Track Proceedings 2016, 1511: 06434.
- [48] Draxl C, Clifton A, Hodge B M, et al. The wind integration national dataset (wind) toolkit[J]. Applied Energy, 2015, 115: 355–366.
- [49] 乔珊. 主动配电网多源协同运行优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [50] Nick M, Cherkaoui R, Paolone M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 29(05): 2300–2310.
- [51] Andersen E D, Roos C, Terlaky T. On implementing a primal-dual interior-point method for conic quadratic optimization[J]. Mathematical Programming, 2023, 95(02): 249–277.
- [52] Huang C, Li F, Ding T, et al. Second-order cone programming-based optimal control strategy for wind energy conversion systems over complete operating regions [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 6(01): 263–271.
- [53] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 37-42.
- [54] Low S H. Convex relaxation of optimal power flow, I: Formulations and relaxations[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 1(01): 15–27.
- [55] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 4(2): 1401–1407.
- [56] 米阳, 申杰, 卢长坤, 等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(03): 104-118.
- [57] Zidan A, El-Saadany E. Incorporating load variation and variable wind generation in service restoration plans for distribution systems[J]. Energy, 2023, 57: 682-691.
- [58] Liang Y, Niu D, Hong W. Short term load forecasting based on feature extraction and improved general regression neural network model[J]. Energy, 2019, 166: 653-663.

- [59] Chen C, Wang J, Qiu F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [60] Li P, Ji J, Ji H. et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. Energy, 2020, 195: 5436-5442.
- [61] Long C, Wu J, Thomas L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation[J]. Applied Energy, 2016, 184: 427-437.
- [62] Andersen E D, Roos C, Terlaky T. On implementing a primal-dual interior-point method for conic quadratic optimization[J]. Mathematical Programming, 2023, 95(2): 249-277.
- [63] Lee C, Liu C, Mehrotra S, et al. Robust distribution network reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015, 6(02); 836-842.
- [64] Ji H, Wang C, Li P, et al. Quantified analysis method for operational flexibility of active distribution networks with high penetration of distributed generators[J]. Applied Energy 2019, 239: 706-714.
- [65] Bloemink J M, Green T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]. IEEE PES General Meeting, 2010, Minneapolis, MN, USA, 1-8.
- [66] Mostafa N, Rachid C, Mario P. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 29(5): 2300-2310.
- [67] Malakar T, Goswami S. Active and reactive dispatch with minimum control movements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 44(44): 78-87.
- [68] Dzafic I, Jabr R, Huseinagic I, et al. Multi-phase state estimation featuring industrial-grade distribution network models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 609-618.

- [69] Paterakis N, Mazza A, Santos S, et al. Multi-objective reconfiguration of radial distribution systems using reliability indices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 31(2): 1048-1062.
- [70] Cavalcante P, Lopez J, Franco J, et al. Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 7(1): 145-155.
- [71] Chen X, Wu W, Zhang B. Robust restoration method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 31(5): 4005-4015.
- [72] Ding T, Lin Y, Bie Z, et al. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration[J]. Applied Energy, 2021, 199: 205-216.

攻读学位期间发表的学术论文

一、 读研期间发表的学术论文

- [1]. 《Soft Open Point Planning Method for Active Distribution Network Based on Generative Adversarial Network》 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2 2023, Pages 610-615,2023 第一作者)

致谢

站在研究生生涯的终点回望，此刻的笔尖竟比任何时刻都更显沉重。

首先要感谢我的导师葛愿教授。三年前初次进入课题组时，我尚是面对论文和实验不知所措的科研新人，是您不辞辛劳的用一次次组会让我领悟学习的方法和研究的方向，组会上被反复推翻的假设最终锻造出严谨的论证逻辑，是您的言传身教让我真正理解了学术传承不仅是知识的传递，更是治学态度的延续。

其次要感谢我的父母，他们是我人生路上最重要的引路人，用自己的方式默默支持着我，给予我无微不至的关怀和源源不断的精神支持。父母虽不懂学术研究的复杂内容，却总是用温暖的言语安慰我，让我远在异地也能感受到家的温暖。他们的理解与宽容，是我坚持到底的强大力量。在遇到困难时，他们的鼓励让我重新振作；在取得进步时，他们的骄傲让我更加自信。父母的爱是最坚实的后盾，让我在追求梦想的道路上无畏前行。

我还要感谢那些在学习和生活中给予帮助和陪伴的朋友们（黄诚、林小鑫、程嘉豪、崔道理、吴新龙、庞文远、郭端娇、赵吉强、陈昊苏、林棋涛），是他们用欢乐和温暖为我的校园生活增添了无数美好回忆，在那些疲惫和迷茫的日子里，他们的陪伴让我感受到生活的美好与希望。

最后感谢安徽工程大学，这篇论文的完成离不开学校提供的良好学习环境和科研平台。研途虽有艰辛，但回忆皆是美好。总有师友的关怀与帮助，伴我一路前行，师门的温暖、同窗的情谊，都是我最为珍贵的收获。

春深似海，纸短情长。愿这份致谢能化作蒲公英，将收获的温暖播撒在更辽阔的原野。

尚德敏学 唯实惟新

