

考虑重构的柔性互联配电网多目标优化运行

洪颖允

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

文章提出了一种考虑重构的柔性互联配电网多目标优化运行策略, 以应对可再生分布式电源渗透率提升导致的配电网线路过载、电压越限、弃风弃光等问题, 从而提高配电网的可靠性、经济性。首先, 针对传统重构策略存在的解空间过大、不可行解占比过多的问题, 提出基于改进粒子群算法的配电网重构策略, 提升求解效率; 其次, 兼顾配电网经济性与供电可靠性, 构建基于二阶锥松弛的柔性互联配电网潮流模型; 最后, 将传统配电网调度方案与本文所提出方案结果进行对比, 验证了所提出模型的有效性和优越性。研究表明, 本文所提出的模型能有效降低柔性互联配电网的网损, 提升可再生分布式电源的消纳能力, 降低配电网节点电压偏差程度。研究结论对提升柔性互联配电网的经济性和可靠性具有重要意义, 为应对可再生分布式电源的大规模并网提供了可行的解决方案。

关键词

柔性互联, 配电网重构, 二阶锥松弛, 智能软开关, 可再生能源

Multi-Objective Optimization Operation of Flexible Interconnected Distribution Network Considering Reconstruction

Haoyun Hong

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

This article proposes a multi-objective optimization operation strategy for flexible interconnected distribution networks considering reconstruction, in order to address issues such as line overload, voltage exceeding limits, and wind and solar power curtailment caused by the increasing penetration

rate of renewable distributed power sources and to improve the reliability and economy of the distribution network. Firstly, in response to the problems of large solution space and excessive proportion of infeasible solutions in traditional reconstruction strategies, a distribution network reconstruction strategy based on an improved particle swarm optimization algorithm is proposed to improve the solving efficiency. Secondly, taking into account the economic efficiency and power supply reliability of the distribution network, a flexible interconnected distribution network power flow model based on second-order cone relaxation is constructed. Finally, the traditional distribution network scheduling scheme was compared with the results of the proposed scheme in this paper, verifying the effectiveness and superiority of the proposed model. The research results indicate that the proposed model can effectively reduce the network loss of flexible interconnected distribution networks, enhance the consumption capacity of renewable distributed power sources, and reduce the degree of voltage deviation at distribution network nodes. The research conclusion is of great significance for improving the economy and reliability of flexible interconnected distribution networks and provides feasible solutions for large-scale grid connection of renewable distributed power sources.

Keywords

Flexible Interconnection, Distribution Network Reconfiguration, Second-Order Cone Relaxation, Soft Open Point, Renewable Energy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于人类社会日益增长的能源需求，化石燃料过度使用导致的全球气候变化问题越来越严重，全球各地对风能、太阳能、核能等可再生能源的重视程度达到了前所未有的程度[1][2]。随着分布式发电技术的发展，以风光为主的可再生分布式电源的占比不断提高，给传统配电网带来了诸多挑战。

一方面，由于城市经济的快速发展，电动汽车充电站数量大幅增加，重要负荷对供电可靠性要求不断提升，导致传统配电网存在电压越限、线路损耗大、线路过载等问题[3]。另一方面，由于风光等可再生能源受地理位置和气候变化影响，存在一定的不确定性，并且可再生能源的大规模并网会进一步放大其不确定性，这种不稳定因素会给配电网安全运行带来巨大隐患[4]。因此，为适应高速发展的社会用电需求，传统配电网正逐步向柔性互联配电网转变。

传统配电网多为辐射状结构，具有“闭环设计，开环运行”的特点，随着配电网规模扩大、设备老化等因素，容易出现负载分布不均衡、线路损耗高、供电可靠性不足等问题。当配电网发生故障时，需要人工倒闸操作实现故障隔离与供电恢复，在此基础上诞生了配电网重构技术保证配电网的供电可靠性[5]。配电网重构最早提出于1975年，是通过调整联络开关和分段开关的开闭状态，改变配电网的拓扑结构，从而实现配电网故障隔离的技术手段。随着相关技术的不断成熟，配电网重构逐渐成为降低网络损耗，提升配电网经济性，实现快速故障隔离，提升供电可靠性，抑制电压越限，改善电能质量的重要手段之一[6]。

文献[7]首次将遗传算法应用到配电网重构问题求解中，以总系统网络损耗和电压降落为适应度函数，将大规模非线性整数规划问题转换为混合整数规划问题进行求解，所得结果表明了启发式算法在配电网重构问题上的有效性和优越性，因此将启发式算法进行改进并融入配电网重构问题中成为了众多学者所

研究的问题。文献[8]提出以网损成本和弃风弃光惩罚最小为上层优化模型和以配电网网损最小为下层优化模型的双层模型，并通过采用割集法减小模型复杂程度，改善了模型求解效率。文献[9]将二进制粒子群算法与差分进化算法相结合，提出一种配电网故障重构策略，将重构后可能出现的孤岛作为停电负荷的一部分，以确保最终停电范围最小的配电网重构策略。

目前大量 DG 的接入以及用户负荷特性的多元化，使传统配电网存在的双向潮流、电压越限、馈线负荷不均衡问题越来越突出，也导致配电网的可再生能源消纳能力不足、弃风弃光现象严重，影响配电网的经济运行。传统配电网主要依靠网络重构或者通过有载调压器解决上述问题，但是网络重构受开关动作次数限制，无法实现实时连续调节，有载调压器调节能力有限，且精度不足。

随着可再生分布式电源的不断发展，以 DG 为主体的新型多元电力供应系统将改变传统配电网的运行方式，未来配电网的趋势为多电压等级构成的多层次环网结构，以实现可再生能源的友好消纳与储能装置的大规模接入为目标，适应新时代电动汽车等新型负荷的快速波动，满足重要用户对更高质量与可靠性需求。在此背景下，以 SOP 为代表的电力电子装置被大量应用于电力系统中[10]，由于 SOP 功率连续可控，没有传统联络开关动作次数限制的特性，柔性互联配电网可以允许传统辐射状配电网具备环网结构，具备传统配电网保护策略简单的优势的同时，又能提高配电网的供电可靠性。文献[11]提出一种 SOP 和分布式储能的选址定容方案，该方案在考虑配电网经济性的同时，以社会福利最大化为目标函数，通过节点边际电价反映用户满意度。文献[12]基于 DG 渗透率不断提高，提出多区域柔性互联配电网的分布式规划方法，保证 SOP、DG、储能的协同运行，以配电网运行成本为目标，建立柔性互联配电网规划模型。

然而，由于现阶段 SOP 的成本远高于联络开关，SOP 难以完全替代传统配电网中的联络开关。因此，研究 SOP 与联络开关共存，柔性互联与传统配电网重构策略相结合，解决大规模 DG 并网带来的挑战，提升配电网经济性，实现“源网荷储”一体化转型，构建高弹性、高可靠、新能源友好的柔性互联配电网是未来配电系统的发展方向。

因此，本文兼顾联络开关与 SOP 的协调控制，以配电网供电费用、弃风弃光惩罚、SOP 运维成本、最大电压偏差和重构开关动作费用为目标，提出一种考虑重构的柔性互联配电网多目标优化运行策略，针对传统重构策略存在的解空间过大、不可行解占比过多的问题，提出环路编码策略对重构开关进行组合，大幅减小解空间，并采用环路判定矩阵和上层节点矩阵判断剔除环路、孤岛不可行解，进一步提升了求解效率。最后搭建考虑重构的柔性互联配电网多目标优化运行策略，在进行柔性互联改造后的两个 IEEE 33 节点系统进行算例分析，验证了所提出策略的可行性和优越性。

2. 包含分布式电源的柔性互联配电网

2.1. SOP 模型

SOP 是基于对全控型电力电子器件的控制来实现的，相较于联络开关，具有响应速度快、能频繁动作、控制连续、能实现连接不同馈线的电气解耦等特点[13]。目前配电网中的 SOP 典型拓扑结构主要分为背靠背电压源型变换器(Back-to-Back Voltage Source Converter, BTB-VSC)、统一潮流控制器和静止同步串联补偿器[14]。本文主要以 BTB-VSC 为研究对象，其拓扑结构如图 1 所示。

该拓扑结构通过两个背对背的电压源逆变器组成，两个逆变器一侧通过一条直流母线连接，另一侧分别连接到不同的交流母线，从而形成交流 - 直流 - 交流的功率变化结构。该结构不仅可以控制馈线间传输的有功功率，还能提供无功补偿，具有稳定所连接馈线电压的作用。在正常运行时，对于连接在节点 i 与 j 之间的 SOP，一般采用 PQ-VdcQ 控制方式，共有三个可控变量：SOP 一侧输出的有功功率 $P_{SOP,i}$ 、 $P_{SOP,j}$ 和 SOP 两侧分别输出的无功功率 $Q_{SOP,i}$ 、 $Q_{SOP,j}$ ，具体包含以下约束条件：

$$P_{SOP,i}^2 + Q_{SOP,i}^2 \leq S_{fid,ij}^2 \quad (1)$$

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

$$P_{SOP,i} + P_{SOP,j} + P_{SOP,loss,ij} = 0 \quad (3)$$

$$P_{SOP,loss,ij} = c_{loss} \left(\sqrt{P_{SOP,i}^2 + Q_{SOP,i}^2} + \sqrt{P_{SOP,j}^2 + Q_{SOP,j}^2} \right) \quad (4)$$

$$|Q_{SOP,i}| \leq \mu_Q S_{SOP,ij} \quad (5)$$

$$|Q_{SOP,j}| \leq \mu_Q S_{SOP,ij} \quad (6)$$

式(1)和式(2)表示 FID 的容量约束, $P_{SOP,i}$ 、 $Q_{SOP,i}$ 分别表示 SOP 与节点*i*交互的有功、无功功率, 以流入节点为正, $S_{SOP,ij}$ 为 SOP 装置的容量限制; 式(3)为 SOP 有功功率约束, 式(4)为 SOP 的有功功率损耗约束, $P_{SOP,loss,ij}$ 表示 SOP 的损耗功率, c_{loss} 表示 SOP 的损耗系数; 式(5)和式(6)表示 SOP 的无功功率约束, μ_Q 表示 SOP 的无功功率限制系数。

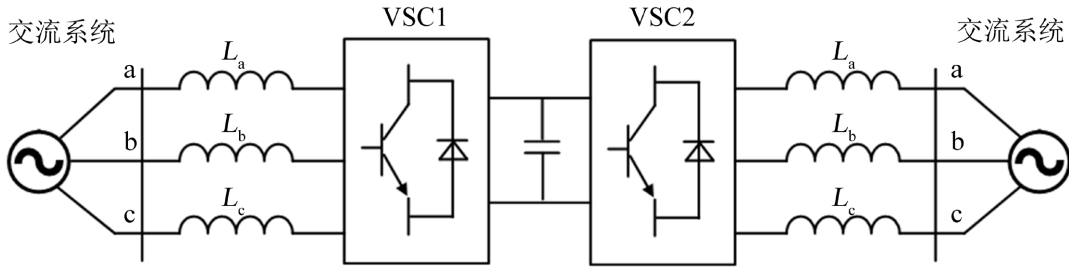


Figure 1. SOP structure based on BTB-VSC
图 1. 基于 BTB-VSC 的 SOP 结构

2.2. 储能模型

在配电网运行中, 储能的主要作用是通过充放电从时间尺度进行调整, 从而改变不同时刻的能源供需关系, 即在用电高峰期放电、低谷期充电, 改善负荷特性, 实现削峰填谷, 提升配电网的经济性。此外, 储能也可在一定程度上平衡分布式电源的不确定性, 或作为主电源故障时的备用电源, 对关键负荷提供紧急电力支持, 提升配电网供电可靠性[15]。目前常见的储能装置包括抽水蓄能、电池储能、压缩空气储能、氢气储能和飞轮储能等[16]。本文以电池储能为例, 主要考虑储能的荷电平衡限制、容量限制、充放电限制, 模型具体约束如下所示:

$$E_{t+1} = E_t + P_{ch,t} \eta_{ch} \Delta t - P_{dis,t} / \eta_{dis} \Delta t \quad (7)$$

$$E_t = E_0 \quad (8)$$

$$E_{min} \leq E_t \leq E_{max} \quad (9)$$

$$B_{ch,t} + B_{dis,t} \leq 1 \quad (10)$$

$$0 \leq P_{ch,t} \leq P_{ch,max} B_{ch,t} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{dis,t} \leq P_{dis,max} B_{dis,t} \quad (12)$$

式(7)和式(8)表示储能的荷电平衡约束, E_t 表示储能在 t 时刻的电量; $P_{ch,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别表示储能在 t 时刻的充、放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别表示储能的充、放电效率; 式(9)为储能的容量约束, E_{max} 、 E_{min} 分别表示储能容量的上下限; 式(10)为储能的充放电状态约束, $B_{ch,t}$ 、 $B_{dis,t}$ 均为 0/1 变量, $B_{ch,t}$ 为 1 则表示储

能在 t 时刻处于充电状态, 反之则处于放电状态。式(11)和式(12)为储能的充放电功率约束, $P_{ch,max}$ 、 $P_{dis,max}$ 分别表示储能充、放电的最大功率。

2.3. DG 分类与建模

一、风力发电模型

近年来国内外学者针对风速频率的分布做了大量研究, 目前针对风速分布情况一般以威布尔分布进行拟合。威布尔分布是以形状参数 k 和尺度参数 c 描述的单峰状分布函数, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{c} \right)^k \right] \quad (13)$$

风力发电就是将风能转化为电能, 其发电功率主要受风速和叶片参数的影响, 用公式表达为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (14)$$

式中, ρ 为空气密度, R 为风机叶片半径, v 为垂直流过风机截面的风速。

因此可以将风力发电功率与风速的关系以式(17)表示:

$$P^{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ av^3 + b & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_N^{WT} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (15)$$

式中, v_{ci} 为风机切入风速, v_{co} 为风机切除风速, v_r 为风机额定风速, P_N^{WT} 为风机额定功率。 a, b 是根据功率曲线得出的拟合参数, 其计算公式如下所示:

$$a = \frac{1}{v_r^3 - v_{ci}^3} P_N^{WT} \quad (16)$$

$$b = -\frac{v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} P_N^{WT} \quad (17)$$

二、光伏发电模型

光伏发电主要是利用半导体的光伏特效效应, 将太阳能转化为光能。光照强度通常以贝塔分布进行拟合, 其概率密度函数为:

$$f(I) = \frac{1}{I_{max}} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{I}{I_{max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{I}{I_{max}} \right)^{\beta-1} \quad (18)$$

式中, I_{max} 为光照强度最大值, α, β 为贝塔分布的两个参数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

在理想情况下, 光伏发电的输出功率与光照强度、光照面积和转化效率有关, 表达式为:

$$P^{PV} = IS\eta \quad (19)$$

式中, S 为光照面积, η 为太阳能转化成电能的转化率。

可以看出光伏发电功率 P^{PV} 与光照强度 I 近似呈正比关系, 因此可以得到光伏发电的概率分布模型:

$$f(P^{PV}) = \frac{1}{P_N^{PV}} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P^{PV}}{P_N^{PV}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P^{PV}}{P_N^{PV}} \right)^{\beta-1} \quad (20)$$

式中, P_N^{PV} 为光伏发电的额定发电功率。

3. 基于改进粒子群算法的配电网重构

3.1. 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种基于群体智能的优化算法, 由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出, 灵感来源于鸟群或鱼群的觅食行为[17]。其核心思想是通过模拟鸟群在觅食时群体的聚拢以及个体的分散, 在群体飞行空间觅食。将鸟类个体抽象成粒子, 觅食空间看作问题的解空间, 每一个粒子就代表一个潜在解, 通过跟踪个体历史最优和群体全局最优动态调整自身速度和位置, 逐步逼近问题的最优解。

粒子群算法中更新速度和位置的标准公式为:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \times rand() \times (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times rand() \times (gbest^k - x_i^k) \quad (21)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (22)$$

式中, v_i^k 、 v_i^{k+1} 分别为迭代前后的粒子速度, c_1 、 c_2 为局部/全局学习因子, $rand()$ 为介于(0, 1)之间的随机数, $pbest_i^k$ 、 $gbest^k$ 分别为个体/全局最优解, x_i^k 、 x_i^{k+1} 分别为迭代前后粒子位置。

其中, 速度公式(21)中共分为三个部分, 第一部分 v_i^k 称为记忆项, 表示上次迭代的速度对本次迭代的影响; 第二部分 $c_1 \times rand() \times (pbest_i^k - x_i^k)$ 称为自身认知项, 为粒子当前位置到粒子在迭代过程中的最佳位置的矢量, 代表粒子的运动受自身经验影响的部分; 第三部分 $c_2 \times rand() \times (gbest^k - x_i^k)$ 称为群体认知项, 为粒子当前位置到所有粒子在迭代过程中的最佳位置的矢量, 反映了粒子间的合作与共享, 代表粒子的运动受群体知识影响的部分。

3.2. 环路编码策略

当采用粒子群算法求解配电网重构问题时, 粒子群中的每个粒子就代表一种重构后的拓扑结构。传统粒子群算法的粒子主要是连续变换的, 但是配电网重构属于离散优化问题, 因此需要对粒子群进行离散编码。

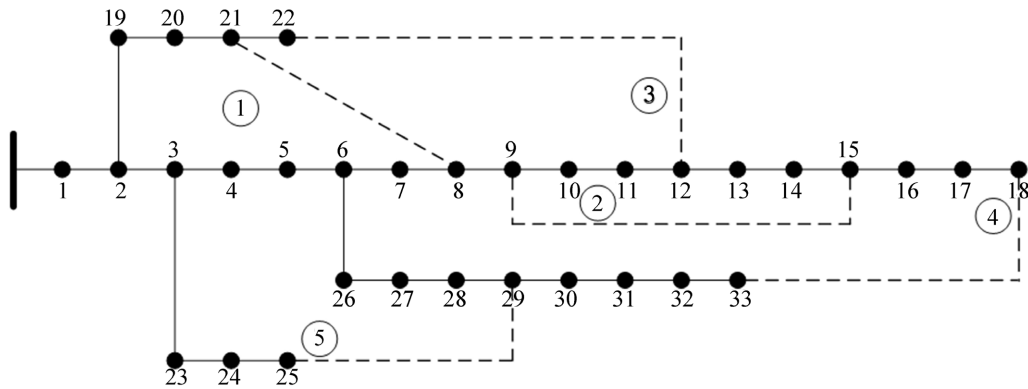


Figure 2. IEEE 33 node topology diagram

图 2. IEEE 33 节点的拓扑图

由于配电网“闭环设计, 开环运行”的策略, 配电网正常运行时拓扑结构均呈辐射状, 当任意闭合配电网中的某一个联络开关时会形成一个环路。同理, 断开环路中的任意一个开关可以使配电网重新回到辐射状结构, 将联络开关闭合后产生的回路称为基本环路。为确保重构方案满足配电网运行约束, 闭合 n 个联络开关将形成 n 个独立环路, 而断开 n 个对应分段开关即可将网络恢复为包含全部节点的最小

连通树状结构；可以看出，每个基本环路内必须选择且仅选择一个分段开关断开，以此维持配电网无环运行的物理本质[18]。图 2 为 IEEE 33 节点的拓扑图，表 1 为 IEEE 33 节点配电网的环路编码。

Table 1. IEEE 33 node corresponding loop encoding

表 1. IEEE 33 节点对应环路编码

环网	环网对应开关	开关编号
①	2~3, 3~4, 4~5, 5~6, 6~7, 7~8, 2~19, 19~20, 20~21, 8~21	1~10
②	9~10, 10~11, 11~12, 12~13, 13~14, 14~15, 9~15	1~7
③	2~3, 3~4, 4~5, 5~6, 6~7, 7~8, 8~9, 9~10, 10~11, 11~12, 2~19, 19~20, 20~21, 21~22, 12~22	1~15
④	6~7, 7~8, 8~9, 9~10, 10~11, 11~12, 12~13, 13~14, 14~15, 15~16, 16~17, 17~18, 6~26, 26~27, 27~28, 28~29, 29~30, 30~31, 31~32, 32~33, 18~33	1~21
⑤	3~4, 4~5, 5~6, 6~26, 26~27, 27~28, 28~29, 3~23, 23~24, 24~25, 25~29	1~11

根据表 1 的编码可以得到对应的配电网重构方案，如某一粒子的位置 $\text{switch} = [10, 7, 15, 21, 11]$ ，代表断开 8~21、9~15、12~22、18~33、25~29，即为 IEEE 33 节点原始拓扑情况。这样粒子群算法的维数就由配电网开关总数降为配电网联络开关数，大大减小了解空间的大小，增加了粒子群算法效率。

3.3. 不可行解判断

通过环路编码策略减小配电网重构所需搜索的解空间后，在重构过程中仍然存在不可行解，目前判断配电网拓扑是否可行主要有以下两方面：1) 配电网是否存在环网；2) 配电网是否存在孤岛。

针对环网问题，主要是由于配电网结构复杂，各基础环网之间存在公共支路，因此当两个不同的基础环网之间断开同一个分段开关或断开两个开关同属一条公共支路时，则会产生环网，导致配电网对应解不可行。因此定义环路判定矩阵 LD (Loop Determination):

$$\text{LD} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

矩阵为 $n \times n$ 方阵， n 为配电网总基础环路数，每一行对应断开的开关，每一列对应基础环路，矩阵元素为 0 代表该行断开开关不在对应列环路中，为 1 则表示在对应环路中。如 $a_{31} = 1$ 表示第三个断开的开关处于第一个环路中。当矩阵中存在两列相同的元素，则说明某公共支路开关被同时断开，即配电网会出现回路，解为不可行解。

针对孤岛问题，即使 LD 矩阵不存在相同元素列，也有可能出现某公共支路同时断开导致的孤岛现象，利用配电网辐射状的特点，建立上层节点矩阵 UN (Upper Node):

$$\text{UN} = [a_1 \quad \cdots \quad a_m] \quad (24)$$

矩阵大小为 $1 \times m$ ， m 为配电网中的总节点数，每一列的数据代表该列节点的上层节点编号，如 $a_{18} = 2$ 代表 18 号节点的上层节点为节点 2。根据粒子位置信息断开配电网中对应开关，并自首端电源节点开始向下搜索与之相连的下端节点，并修改对应 UN 矩阵。假设配电网中不存在孤岛，则除了首端电源节点以外的所有节点均能找到对应上层节点，即 UN 除第一列以外其余元素均不为 0，则可判定该重构拓扑可行。

3.4. 基于环路编码策略的改进粒子群算法步骤

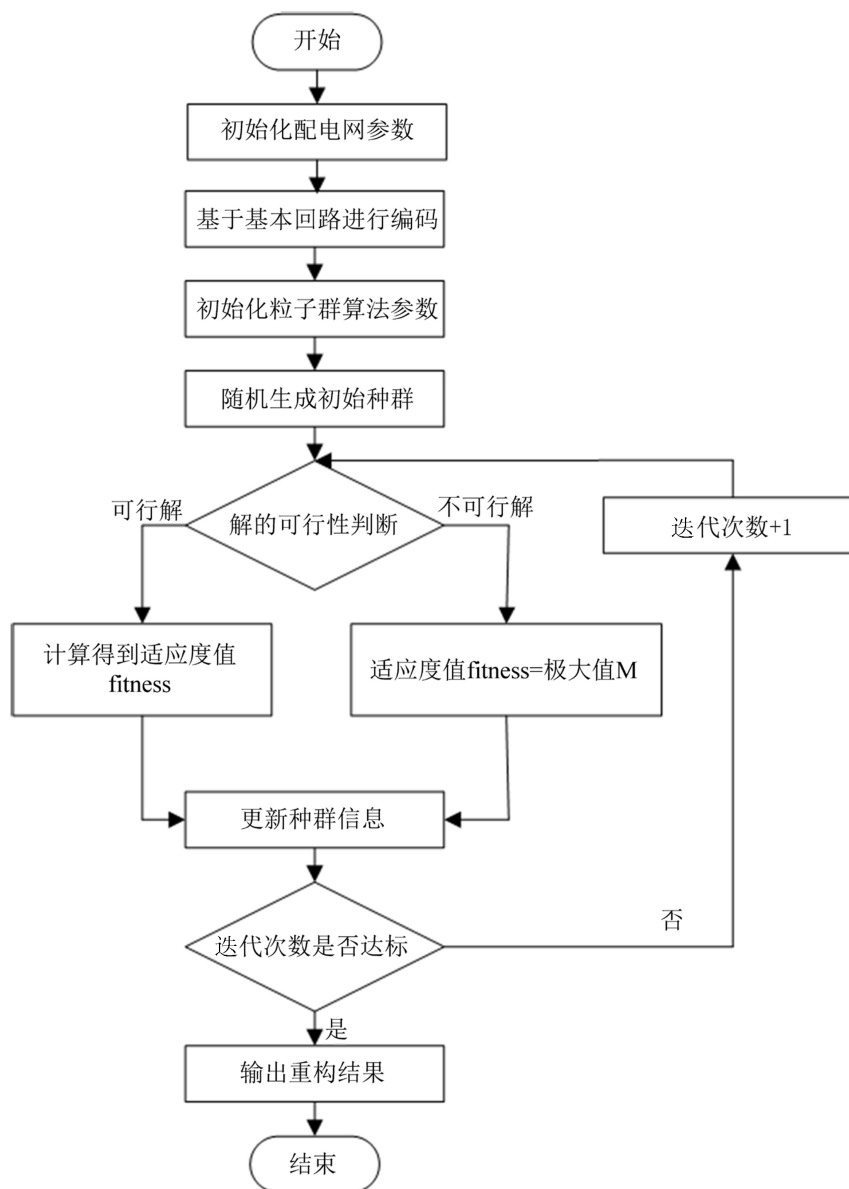


Figure 3. IPSO flowchart based on loop coding strategy

图 3. 基于环路编码策略的 IPSO 流程图

针对传统粒子群算法容易陷入局部最优的问题，为了增强粒子群算法的全局寻优能力，对粒子速度更新公式(21)改进为：

$$v_i^{k+1} = \omega^k v_i^k + c_1 \times rand() \times (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times rand() \times (gbest^k - x_i^k) \quad (25)$$

$$\omega^k = \omega_{\max} - \frac{gen^k}{gen_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (26)$$

式中， ω^k 为惯性权重因子， $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为其最大/最小取值， $gen^k, gen_{\max}$ 为算法当前/最大迭代次数。根据迭代次数动态调整惯性权重因子大小，迭代前期惯性权重因子较大，拥有较好的全局搜索能力，迭

代后期随着权重因子的减小,增强局部搜索能力。

由于配电网重构为离散问题,传统粒子群算法的粒子位置连续变换并不适用,为确保粒子位置信息所代表的开关数据具有实际物理意义,对粒子位置更新公式(22)改进为:

$$x_i^{k+1} = \text{round}(x_i^k + v_i^{k+1}) \quad (27)$$

式中, $\text{round}()$ 函数表示对数据进行取整,确保更新后的粒子位置与环路编码后的开关一一对应。

最终得到的基于环路编码策略的改进粒子群算法(Improved Particle Swarm Optimization, IPSO)步骤如下所示:

- 1) 初始化配电网参数,闭合所有开关,确定基本回路并对基本回路的节点进行编号。
- 2) 初始化粒子群算法参数,随机生成初始种群。
- 3) 判断粒子可行解判断。
- 4) 计算粒子适应度,更新个体最优 pbest 与全局最优 gbest。
- 5) 更新粒子速度与位置信息。
- 6) 判断是否达到预设迭代次数,若达到则输出此时的全局最优解为重构结果,如果未达到则使迭代次数加 1 并重复步骤 3~5;

具体流程图如图 3 所示。

4. 算例分析

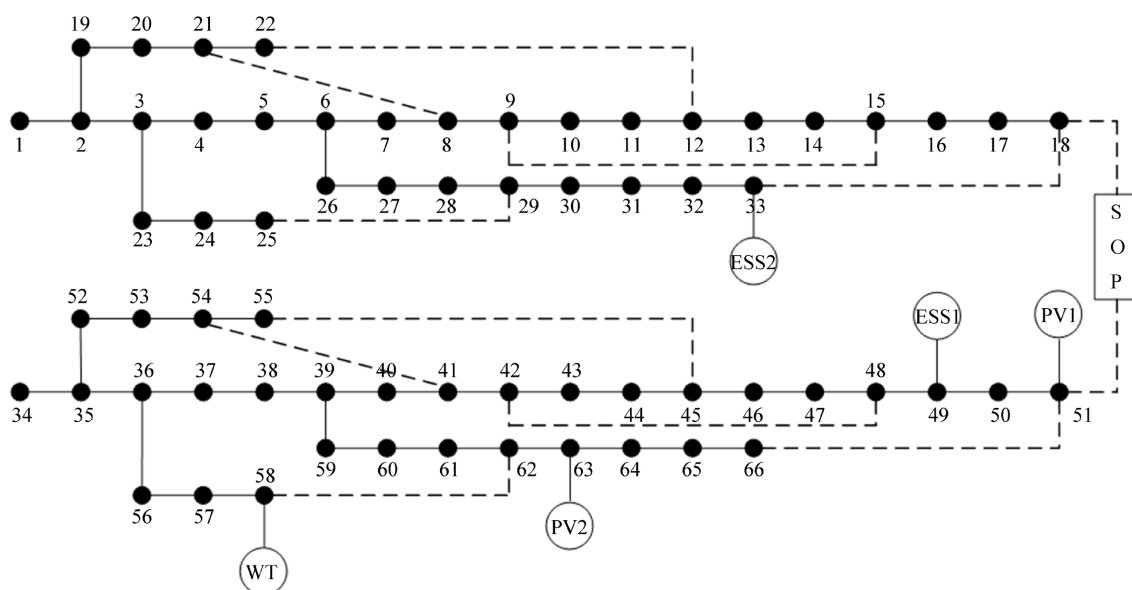


Figure 4. Schematic diagram of the distribution system after flexible interconnection transformation

图 4. 柔性互联改造后的配电系统示意图

Table 2. DG configuration parameters

表 2. DG 配置参数

DG 类型	接入位置	安装容量(kW)
风机	58	1500
光伏	51	1500
	63	1000

本节对两个 IEEE 33 节点系统进行柔性互联改造后的拓扑如图 4 所示，SOP 两端分别接于 18、51 号节点；配电网中分别在 51、61 节点接入了分布式光伏系统，在 58 节点接入了分布式风机系统，在 33、49 号节点接入储能系统。

DG 的安装容量如表 2 所示，其出力曲线如图 5 所示。

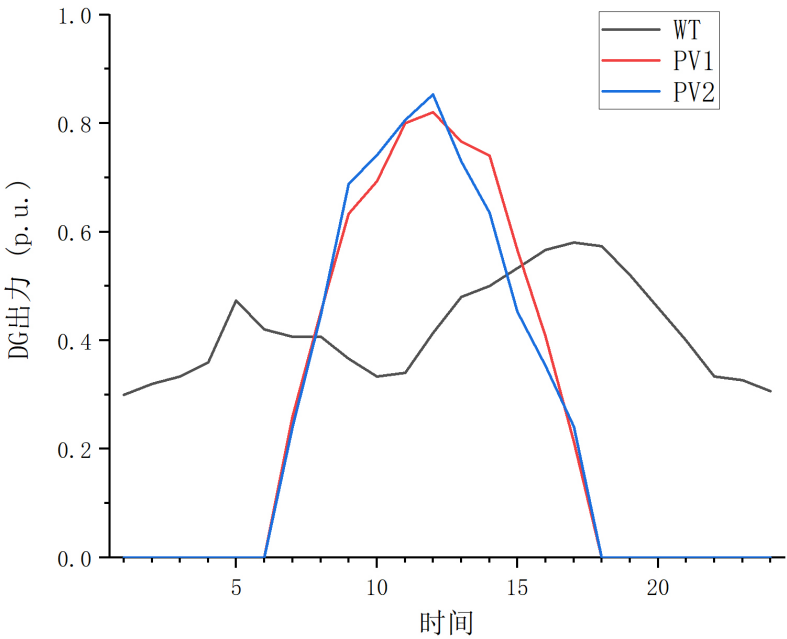


Figure 5. DG output curve
图 5. DG 出力曲线

配电网中各项详细参数如表 3 所示。

Table 3. Operating parameters of flexible interconnected distribution network
表 3. 柔性互联配电网运行参数

装置	安装位置	参数	数值
ESS1	33	$P_{\max}^{ch}/P_{\max}^{dis}/\text{kW}$	500/500
		$E_{\min}/E_{\max}/\text{kWh}$	100/900
ESS2	49	E_0/kWh	450
		η_{ch}/η_{dis}	0.95
		S_{SOP}/kVA	500
SOP	18~51	y_{SOP}/year	20
		$c_{SOP}/(\text{yuan}/\text{kVA})$	1000
		η_{loss}	0.02
		μ_p	0.8
		ξ_{SOP}	10
		c_{loss}	0.5
TS	8~21, 9~15, 12~22, 15~33, 25~29, 41~54, 42~48, 45~55, 51~66, 58~62	c_{TS}	5

配电网与上级电网进行交易电价的曲线如图 6 所示。

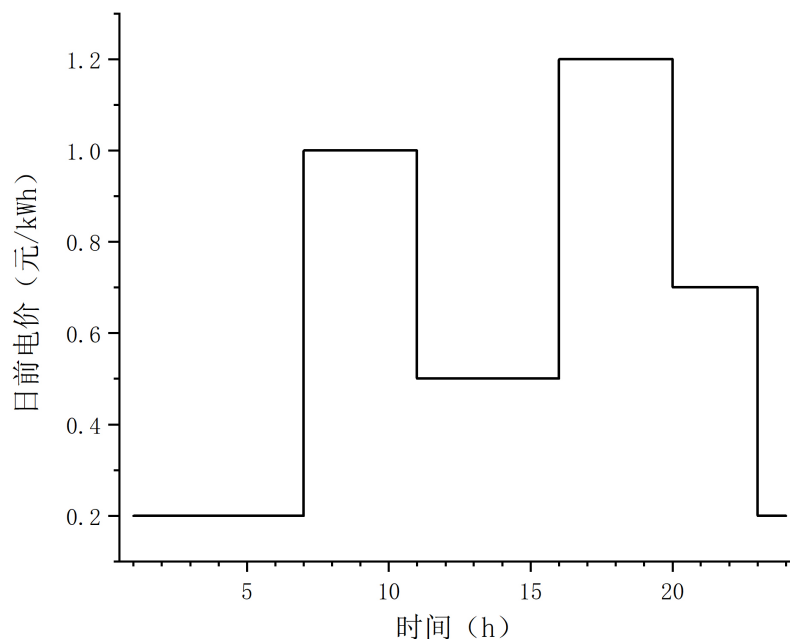


Figure 6. Electricity price curve of distribution system
图 6. 配电系统电价曲线

为验证本章所提出模型的准确性和优越性，提出以下四种方案进行对比，不同方案下的配电网重构断开支路见表 4。

方案 1：配电网不进行柔性互联改造，不采用重构优化。

方案 2：配电网不进行柔性互联改造，采用重构优化。

方案 3：配电网进行柔性互联改造，不采用重构优化。

方案 4：配电网进行柔性互联改造，采用重构优化。

Table 4. Distribution network reconstruction and disconnection of branches under different schemes

表 4. 不同方案下的配电网重构断开支路

方案	断开支路
3	9~10, 14~15, 28~29, 31~32, 8~21, 42~48, 43~44, 41~54, 58~61, 51~66
4	9~10, 16~17, 28~29, 8~21, 9~15, 43~44, 47~48, 63~64, 41~54, 58~62

不同方案下各时段配电网网络损耗对比如图 7 所示，可以看出在原始方案中，配电网整体的网络损耗最高；作为传统的配电网优化方法，重构后优化了配电网的拓扑结构，改善了负荷在空间上的不均衡问题，有效降低了配电网整体损耗；当配电网进行柔性互联改造后，配电网在 6~18 时的网损有所改善，这是因为 SOP 将 51 号节点的光伏发电向重载地区输送，减轻重载地区的线路损耗；而在配电网进行柔性改造的基础上再进行重构，能进一步降低系统的网损。由此可见，SOP 与重构相结合的优化方法能够更好地提升配电网的经济性。

在改善电压水平方面，以光伏出力峰值时刻 $t = 12$ 和用电高峰期 $t = 20$ 为例，各方案下节点电压如图 8 和图 9 所示。在正午时分，由于分布式光伏出力达到峰值，导致 51 号节点电压反向越限，弃光现象严

重。采用重构的方案 2 优化了配电网拓扑, 虽然能在一定程度上减轻弃光现象, 但是其效果有限, 节点电压仍然反向达到最高值, 无法完全消纳光伏出力。而方案 3 与方案 4 则通过 SOP 将多余的光伏出力传输到另一馈线中, 有效解决了 DG 大量接入节点电压升高导致的弃风弃光现象。在傍晚用电高峰期, 多条馈线出现重载现象, 电压偏低, 尤其是位于长馈线末端的 51 号节点, 由于此时其光伏电站无法发电, 导致其电压低至 0.955。方案 3 中虽然能够利用 SOP 有一定的无功补偿能力, 但对其电压质量提升效果有限。而方案 2 与方案 4 则利用配电网重构改变配电网拓扑结构, 重新分配负荷使馈线负载均衡, 有效提升了各节点末端电压。对比上述两种不同时间段可见, 采用本章所提出方案能抑制电压反向越限, 提升风光消纳能力, 均衡馈线负荷, 提升电压质量, 具有较强的经济性。

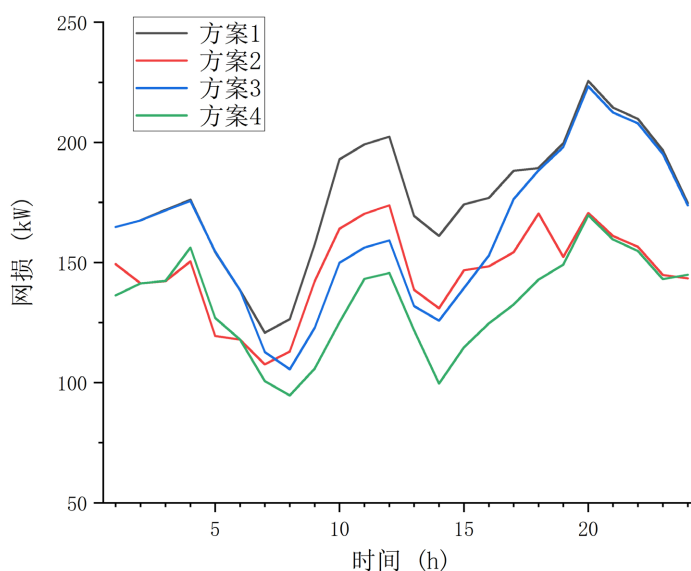


Figure 7. Comparison of network losses in different time periods under different schemes
图 7. 不同方案下各时段的网损对比

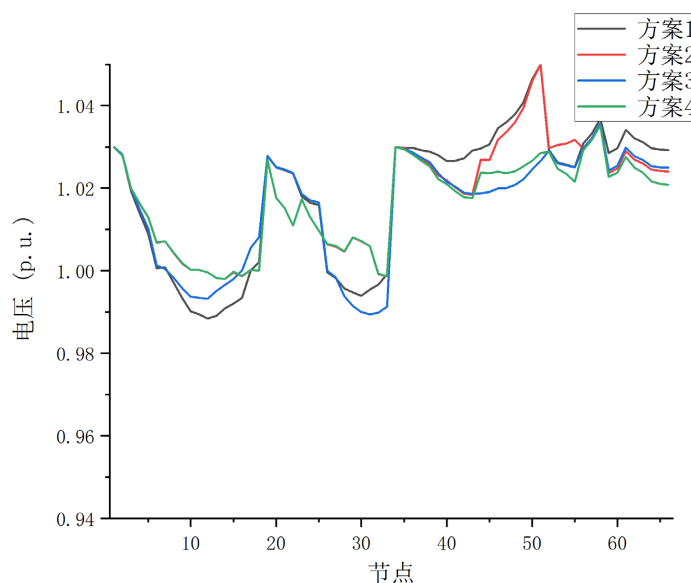


Figure 8. Comparison of node voltage under different schemes at $t = 12$
图 8. $t = 12$ 时不同方案下的节点电压对比

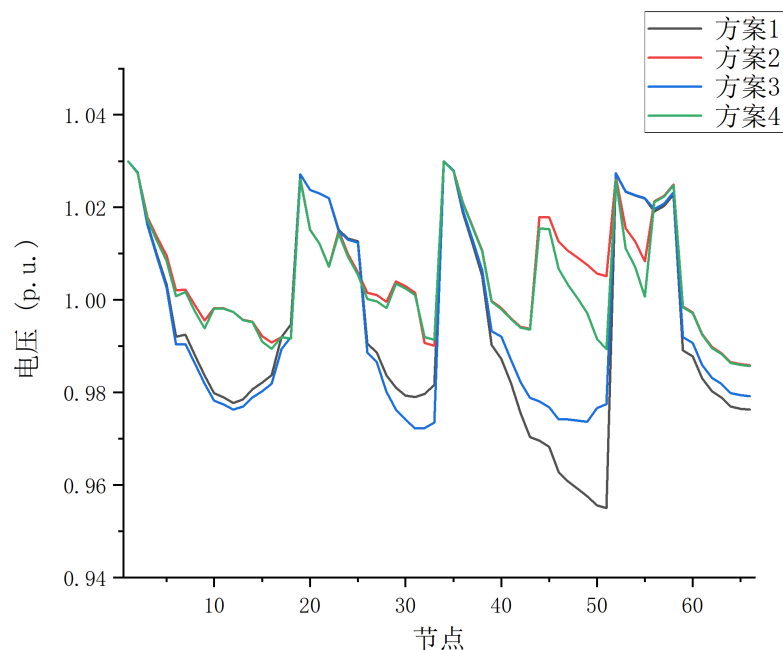


Figure 9. Comparison of node voltage under different schemes at $t = 20$

图 9. $t = 20$ 时不同方案下的节点电压对比

综合图 7~9, 可以得到三种方案的结果对比, 如表 5 所示。

根据表 5 结果所示, 原始配电网总费用最高为 74,468.14 元, 方案 2、3、4 分别节省了 773.31 元、1069.87 元、1612.38 元; 其中费用差距主要体现在弃风弃光惩罚和购电费用上: 方案 2 通过重构调整网络拓扑, 减少弃风弃光惩罚与网络损耗, 从而降低购电费用; 方案 3 通过接入 SOP 设备将多余风光出力转移到重负载区域, 完全消除弃风弃光惩罚的同时也减少了购电费用。而方案 4 采用 SOP 与重构技术的协同优化, 提升配电网 DG 消纳能力的同时减少了配电网运行的网络损耗, 最大程度地减少了配电网的购电费用。虽然后三种方案需要承担 SOP 运维和开关动作成本, 但其在提升配电网经济性上的能力掩盖了额外费用, 尤其是方案 4 通过柔性互联与重构的协同, 使额外成本实现最小化叠加, 验证了本章所提出方案的全局最优性。

Table 5. Economic comparison of different schemes

表 5. 不同方案的经济性对比

	C_{DGloss} /元	ΔU_{max} /%	C_{SOP} /元	C_{TS} /元	C_{buy} /元	C_{DN} /元
方案 1	449.48	4.48	/	/	73,973.86	74,468.14
方案 2	224.64	2.88	/	70	73,421.39	73,694.83
方案 3	0	4.16	246.14	/	73,110.53	73,398.27
方案 4	0	2.77	236.88	60	72,491.18	72,855.76

5. 结论

本文针对高比例可再生能源接入下传统配电网所面临的挑战, 提出采用配电网重构与柔性互联协同优化的配电网多目标优化策略。首先针对柔性互联配电网进行建模, 详细分析了柔性互联配电网中 SOP、

储能系统、DG 相关约束条件；提出了一种基于改进粒子群算法的多目标优化运行策略：针对传统配电网重构中解空间指数爆炸与不可行解占比过高的瓶颈，采用环路编码策略将配电网基本环路与联络开关的动态关系编码为离散粒子，结合环路判定矩阵和上层节点矩阵双重校验机制，可快速识别并剔除环路与孤岛等非辐射状拓扑解，通过引入动态权重调整机制，在保留传统 PSO 个体认知与群体协作优势的同时，解决了离散优化中收敛速度与全局搜索的平衡问题。在优化模型构建方面，从多个角度构建了配电网经济性评估指标体系：包括购电成本、弃风弃光惩罚、SOP 运维成本、最大电压偏差及开关动作费用。通过构建双端柔性互联的改进 IEEE 33 节点系统进行验证，结果表明：

1) 所提出模型采用 SOP 与传统联络开关的协同调控，改善了配电网负荷在空间尺度上的不均衡现象，减轻重载地区的供电损耗，提升轻载地区的馈线利用率，相较于传统配电网优化方法在降低配电系统网损方面效果显著。

2) 所提出模型能采用 SOP 实现不同配电台区的功率互济，减少了配电网的购电成本和可再生分布式电源损失，在 DG 出力高峰期抑制电压反向越限，提升风光消纳能力，也能在用电高峰期均衡馈线负荷，提升末端节点电压，增加了配电网供电可靠性。

3) 所提出模型通过 SOP 与重构方案的协同优化，降低了配电网网损，提升了风光消纳能力，相较于传统配电网运行策略，购电费用从 73,973.86 元降低到 72,491.18 元，提升了配电网的整体经济性。

参考文献

- [1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
- [3] 顾怡, 邢洁, 马洪艳, 等. 计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 893-902.
- [4] Wang, H., Liu, Z., Liang, Z., Huo, X., Yu, R. and Bian, J. (2024) Multi-Timescale Risk Scheduling for Transmission and Distribution Networks for Highly Proportional Distributed Energy Access. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, Article ID: 109598. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109598>
- [5] 谭文勇, 刘敏, 罗永平, 等. 配电网动态重构算法及时段划分研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 63-67, 73.
- [6] 丁涛, 杨岳洋, 汪顺其, 等. 配电网拓扑重构下辐射状约束建模综述[J/OL]. 电网技术: 1-20. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2167>, 2025-04-03.
- [7] Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M. and Ishihara, T. (1992) Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-configuration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7, 1044-1051. <https://doi.org/10.1109/59.207317>
- [8] 傅长熠, 杨镜非, 顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 30-36, 52.
- [9] 周凜, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.
- [10] 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(5): 1453-1465.
- [11] Liu, G., Sun, W., Hong, H. and Shi, G. (2024) Coordinated Configuration of Sops and DESSs in an Active Distribution Network Considering Social Welfare Maximization. *Sustainability*, 16, Article 2247. <https://doi.org/10.3390/su16062247>
- [12] 凌锋, 朱吉然, 盛万兴, 等. 基于分布式优化的多区域柔性互联配电系统源网储协同规划[J/OL]. 电力自动化设备: 1-12. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202503016>, 2025-04-03.
- [13] 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.
- [14] 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(4): 1-14.
- [15] 侯美倩, 牛启帆, 邢洁, 等. 计及可靠性的含源配电网储能系统的优化配置[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 504-514.

-
- [16] 王威, 李润秋, 张鹭, 等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究 [J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 110-116, 123.
 - [17] 李娟. 基于量子粒子群算法的配电网重构[D]: [硕士学位论文]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
 - [18] 关万琳. 分布式电源优化配置与配电网重构[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.