

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230119

# 基于多目标降维和多步重构的两阶段配电网优化运行策略

李京玉, 陈佳佳, 尹文良

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 分布式可再生能源的高度渗透加剧了配电网功率波动性与不确定性。对此,提出了一种基于多目标降维和多步重构的两阶段配电网优化运行策略。日前阶段,在构建电压偏差、功率损耗、运行总成本、净负荷峰谷差和净负荷系数多重运行灵活性指标模型的基础上,提出了基于目标相关性的多重灵活性指标降维方法,旨在权衡各项指标之间的关系并减少目标数量,提高计算效率。日内阶段,通过协同控制分段开关和联络开关,提出了基于多步开关顺序交换的配电网重构方法,充分挖掘系统可用灵活性资源。最后,基于 IEEE-33、IEEE-84、IEEE-119、IEEE-136 节点系统进行算例仿真,结果验证了所提两阶段配电网优化运行策略的有效性。

**关键词:** 分布式可再生能源; 两阶段优化; 配电网重构; 多目标降维

**中图分类号:** TM72      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0212-05

## 1 引言

分布式可再生能源的大规模接入加剧了配电网功率的波动性与不确定性,致使电网灵活性调节资源缺乏问题凸显<sup>[1]</sup>。灵活性虽尚未形成一致定义,但本质上来看,灵活性反映了配电网统筹和利用系统内可控资源,应对运行中的多重不确定性因素扰动,灵活适应各种复杂运行环境的能力<sup>[2]</sup>。实际上,配电网运行涉及多重灵活性指标,如网络损耗、峰谷波动、电压质量等,而当前多目标算法在优化两到三个目标时效果显著,求解高维多目标优化时算法性能呈指数下降<sup>[3]</sup>。MA X 等<sup>[4]</sup>基于权重向量聚合算法将高维多目标转化为多个单目标,但无法处理高度相关性的目标。为保障帕累托解集的质量,WANG H 等<sup>[5]</sup>采用目标缩减法选择冲突最大的目标,但对不含冗余目标的高维多目标优化效果不佳。因此,如何对配电网多重灵活性指标进行降维亟待解决。配电网重构旨在通过改变分段开关和联络开关的断开/闭合状态来改变网络拓扑以降低功率损耗、改善电压质量等<sup>[6]</sup>。ZHAN J 等<sup>[7]</sup>研究了基于分段开关的配电网重构问题,降低了系统网络损耗。然而,

既有研究缺少考虑分段开关和联络开关协同控制提升配电系统多重运行灵活性问题。鉴此,本文提出一种基于多目标降维和多步重构的配电网两阶段优化运行策略,后通过案例分析验证了此方法的可行性。

## 2 多重灵活性目标优化模型

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 运行总成本

运行总成本  $F_{\text{cost}}$  包括微燃机发电成本  $C_{\text{gen}}$ 、电度电费  $C_{\text{load}}$ 、需量电费  $C_{\text{dem}}$ 、功率因数奖惩费用  $C_{\text{PF}}$ 、弃风弃光惩罚费用  $C_{\text{cur}}$  及分布式可再生能源(DRE)上网收益  $C_{\text{grid}}$ ,即:

$$F_{\text{cost}} = C_{\text{gen}} + C_{\text{load}} + C_{\text{dem}} + C_{\text{PF}} + C_{\text{cur}} - C_{\text{grid}} = \sum_t \sum_m^{N_m} [a_m (P_{\text{gen}(m)}^t)^2 + b_m P_{\text{gen}(m)}^t + c_m] + \sum_t \sum_i^{N_n} d^t P_{1,i}^t + \sum_i^{N_k} \frac{C_{\text{dem}} P_{1,i}^{\text{max}}}{30} + \sum_{t=1}^T d^t \sum_{i=1}^{N_k} m_r P_{1,i}^t + \sum_{t=1}^T \lambda P_{\text{cur}}^t - \sum_{t=1}^T \sum_m^{N_m} \rho \int_{P_{\text{DRE}(m)}^t}^{P_{\text{DRE}(m)}^t + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} B^t} (x - P_{\text{DRE}(m)}^t) f(x) dx \quad (1)$$

**收稿日期:** 2023-02-02, **修回日期:** 2023-03-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52005306)

**作者简介:** 李京玉(1996-),女,硕士研究生,研究方向为配电网优化运行,E-mail:L1712356921@163.com

**通讯作者:** 陈佳佳(1987-),男,副教授、硕导,研究方向为智能配电网韧性与灵活性提升,用户侧能量管理与电力市场,E-mail:jjchen@sdut.edu.cn

式中,  $T$  为优化总小时数;  $N_m$  为微燃机的数量;  $a_m, b_m, c_m$  均为第  $m$  台微燃机发电成本系数;  $P_{\text{gen}(m)}^t$  为  $t$  时刻第  $m$  台微燃机出力, 包含微燃机供电功率  $P_{\text{g}(m)}^t$  和 DRE 不确定性备用  $P_{\text{VLL}(m)}^t$ ;  $N_n$  为负荷节点数;  $d^t$  为电网分时电价;  $P_{1,i}^t$  为  $t$  时刻节点  $i$  的净功率;  $N_k$  为用户的集合;  $c_{\text{dem}}$  为单位功率需量电费;  $P_{1,i}^{\text{max}}$  为第  $i$  个用户的典型日最大需量值;  $m_r$  为功率因数奖惩系数;  $\lambda$  为弃风弃光惩罚系数;  $P_{\text{cur}}^t$  为  $t$  时刻 DRE 弃风弃光功率;  $\rho$  为 DRE 上网电价;  $P_{\text{DRE}(m)}^t$  为  $t$  时刻第  $m$  台 DRE 的实际出力;  $\mu_{\text{DRE}(m)}^t$  为  $t$  时刻第  $m$  台 DRE 的输出功率预测值;  $Z_{1-\alpha/2}$  为概率  $\alpha$  下的置信水平;  $B^t$  为  $t$  时刻 DRE 的协方差矩阵。

基于大数定理, 短期 DRE 出力的预测误差服从正态分布。基于此, 设  $f(x)$  为 DRE 正态分布的联合概率密度函数, 若 DRE 出力低于预测值, 所需备用功率为  $P_{\text{VLL}(m)}^t = \int_0^{P_{\text{DRE}(m)}^t} (P_{\text{DRE}(m)}^t - x)f(x)dx$ ; 若 DRE 出力高于预测值, 剩余功率由式(1)最后一项定量描述。其中, DRE 出力的置信区间为  $\mu_{\text{DRE}(m)}^t - Z_{1-\alpha/2}B^t \leq P_{\text{DRE}(m)}^t \leq \mu_{\text{DRE}(m)}^t + Z_{1-\alpha/2}B^t$ 。

### 2.1.2 功率损耗

随着配电网中负荷量不断增加, 配电网功率损耗不断增加直接影响系统经济运行。为保障配电网运行经济性, 应确保功率损耗  $F_{\text{loss}}$  最小化, 具体公式为:

$$F_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \left( \frac{P_{ij}^t + Q_{ij}^t}{V_{ij}^t} \right)^2 R_{ij} \quad (2)$$

式中,  $P_{ij}^t, Q_{ij}^t$  分别为  $t$  时刻从节点  $i$  流向节点  $j$  的有功功率和无功功率;  $V_{ij}^t$  为  $t$  时刻节点  $i$  和  $j$  之间支路的末端电压;  $R_{ij}$  为连接节点  $i$  和  $j$  之间的支路电阻。

### 2.1.3 电压偏差

电压偏差是衡量电能质量的一个重要指标, 高渗透率的 DRE 导致配电网电压波动偏大, 因此需要优化系统节点的平均电压偏差  $F_{\text{VD}}$ , 表达式为:

$$F_{\text{VD}} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=1}^T |V_{ij}^t - V_{\text{ref}}| \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{ref}}$  为参考值。

### 2.1.4 净负荷峰谷比

通过调整净负荷峰谷比, 平滑净负荷曲线, 提升电网消纳 DRE 的能力, 表达式为:

$$F_{\text{pv}} = (P_{1,\text{max}} - P_{1,\text{min}}) / P_{1,\text{max}} \quad (4)$$

式中,  $F_{\text{pv}}$  为净负荷峰谷比;  $P_{1,\text{max}}$  为净负荷最大

值;  $P_{1,\text{min}}$  为净负荷最小值。

### 2.1.5 净负荷系数

净负荷系数  $F_{\text{NL}}$  用于评估净负荷曲线的平滑程度, 净负荷系数越接近于 1 说明净负荷曲线越平滑。公式为:

$$F_{\text{NL}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_n} \frac{P_{1,i}^t}{P_{1,\text{max}} T} \quad (5)$$

综合考虑多重灵活性指标, 优化目标函数表示为:

$$\min(F_{\text{cost}}, F_{\text{loss}}, F_{\text{VD}}, F_{\text{P-V}}, -F_{\text{NL}}) \quad (6)$$

## 2.2 约束条件

潮流约束式为:

$$\begin{cases} P_{\text{DRE},i}^t + P_{\text{g},i}^t - P_{1,i}^t = \sum_{i,j \in N_n} V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \delta_{ij}^t + B_{ij} \sin \delta_{ij}^t) \\ Q_{\text{DRE},i}^t + Q_{\text{g},i}^t - Q_{1,i}^t = \sum_{i,j \in N_n} V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \delta_{ij}^t - B_{ij} \cos \delta_{ij}^t) \\ (V_i V_j)^2 [(G_{ij} \cos \delta_{ij}^t + B_{ij} \sin \delta_{ij}^t)^2 + (G_{ij} \sin \delta_{ij}^t - B_{ij} \cos \delta_{ij}^t)^2] \leq \bar{S}_{ij}^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_{\text{g},i}^t, Q_{\text{g},i}^t$  分别为  $t$  时刻发电机注入节点  $i$  的有功和无功出力;  $V_i^t, V_j^t$  分别为  $t$  时刻节点  $i, j$  的电压;  $G_{ij}, B_{ij}$  分别为节点  $i, j$  之间的电导和电纳;  $\delta_{ij}^t$  为  $t$  时刻节点  $i, j$  之间的电压相角差;  $Q_{\text{DRE},i}^t$  为  $t$  时刻节点  $i$  中 DRE 无功出力;  $Q_{1,i}^t$  为  $t$  时刻  $i$  节点无功负荷;  $\bar{S}_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的最大容量。

电压电流约束式为:

$$\begin{cases} V_{i,\text{min}} \leq V_i^t \leq V_{i,\text{max}} \\ 0 \leq I_{ij}^t \leq I_{ij,\text{max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $V_{i,\text{max}}, V_{i,\text{min}}$  分别为节点  $i$  的电压  $V_i^t$  的上、下限;  $I_{ij,\text{max}}$  为节点  $i, j$  之间电流上限。

微燃机出力约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{g}(m)}^t \leq P_{\text{g},\text{max}}^m \\ Q_{\text{g},\text{min}}^m \leq Q_{\text{g}(m)}^t \leq Q_{\text{g},\text{max}}^m \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{\text{DRE},\text{min}}^m \leq P_{\text{DRE}(m)}^t \leq P_{\text{DRE},\text{max}}^m \\ Q_{\text{DRE},\text{min}}^m \leq Q_{\text{DRE}(m)}^t \leq Q_{\text{DRE},\text{max}}^m \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{g},\text{max}}^m, Q_{\text{g},\text{max}}^m, Q_{\text{g},\text{min}}^m$  分别为第  $m$  台微燃机有功出力  $P_{\text{g}(m)}^t$  的上限、无功出力  $Q_{\text{g}(m)}^t$  的上限和下限;  $Q_{\text{DRE}(m)}^t$  为  $t$  时刻第  $m$  台 DRE 无功出力;  $P_{\text{DRE},\text{min}}^m, Q_{\text{DRE},\text{min}}^m$  分别为第  $m$  台 DRE 有功和无功出力最小值;  $P_{\text{DRE},\text{max}}^m, Q_{\text{DRE},\text{max}}^m$  分别为第  $m$  台 DRE 有功和无功出力最大值。

## 2.3 基于目标相关性的多重指标降维方法

模型中目标过多会给优化和决策过程带来沉重的负担。因此, 有必要分析目标函数之间的关

系,减少优化目标的数量。目标  $x$ 、 $y$  之间的关系用相关性系数  $\rho_{xy}$  表示为:

$$\rho_{xy} = \text{cov}(R_{ix}, R_{iy}) / (\sigma_{ix}\sigma_{iy}) \quad (11)$$

式中,  $R_{ix}$ 、 $R_{iy}$  为解集  $i$  中目标  $x$ 、 $y$  的排序值;  $\sigma_{ix}$ 、 $\sigma_{iy}$  为解集  $i$  中目标  $x$ 、 $y$  的标准差。

基于目标相关性的多重指标降维方法步骤如下。

**步骤 1** 利用多目标进化捕食算法 (MPEPPS) 优化初始目标集合。计算出相关系数矩阵并通过 K-means 聚类将和谐目标自动求和形成一个新的复合目标。获得的新目标集合中的目标由相互冲突的目标组成,且目标维度随之降低。

**步骤 2** 考虑到一些目标值只在小范围内变化,计算负担增加,浪费算法的计算资源。变异系数  $C_{cv}$  作为衡量各目标变异程度的标准,定义为标准差  $\sigma_{cv}$  与均值绝对值  $\mu_{cv}$  的比值:

$$C_{cv} = (\sigma_{cv} / |\mu_{cv}|) \times 100\% \quad (12)$$

将新目标集合中小于 0.1% 的变异系数转换为约束。并用 MPEPPS 算法优化出新帕累托解集,计算新的相关系数矩阵,移除与其他目标冲突最大的目标获得一个目标集合。通过比较有无最大冲突目标的集合所获得的帕累托解集,决定是否移除这个最大冲突目标。重复此步骤,直到不再移除目标为止。

**步骤 3** 计算剩余目标的相关系数矩阵,将目标聚类为两组相互冲突的目标集合,最终得到降维的多目标优化模型,利用多目标优化算法求出最终的帕累托最优解集。

### 3 基于多步开关顺序交换的随机配电网重构模型

#### 3.1 目标函数

在第二阶段,  $t$  时刻注入每个节点的 DRE 有功和无功是由第一阶段优化得到的最优值。配电网重构 (DNR) 的目标函数是最小化功率损失:

$$\min \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \left( \frac{P_{ij}^t + Q_{ij}^t}{V_{ij}^t} \right)^2 R_{ij} \quad (13)$$

式中,  $\beta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间支路的开关状态,其中 0 表示断开,1 表示闭合。

#### 3.2 约束条件

DNR 除了满足式 (7)~(10) 的运行约束外,系统还应遵循以下约束。

$$N_n - N_b = 1 \quad (14)$$

$$\text{dis}(i, i_{\text{sub}}) < \infty \quad i \neq i_{\text{sub}} \quad (15)$$

式中,  $N_b$  为支路数;  $\text{dis}(i, i_{\text{sub}})$  为从节点  $i$  到变电站节点  $i_{\text{sub}}$  的距离。

### 3.3 多步开关顺序交换法

在第一步中,首先将第一阶段配电网初始拓扑中的所有开关闭合形成环路。然后每次迭代中依次打开并计算环型拓扑中每个开关的功率损耗,将功率损耗最小的开关选为联络开关。迭代结束时将所有的联络开关打开,此时拓扑结构为辐射型网络。

在第二步中,将新拓扑中分段开关改为并联开关,继续执行第一步,以寻找更优拓扑结构。通过第一阶段优化的 DRE 和微燃机有功无功功率输出,在第二步分析了不同拓扑结构的功率损失,以获得更好的解决方案。为减少计算负担,第二步不改变以下三种类型开关的开关状态:①类型 I。初始拓扑中到变电站节点的最短路径由  $n_1$  或更少的分段开关组成;②类型 II。初始拓扑中到末端节点的最短路径由  $n_2$  或更少的分段开关组成;③类型 III。任何不在开关闭合回路的分段开关。由于变电站节点附近的开关相对容易确定,因此在初始拓扑中,类型 I 开关的状态通常不需要改变。类型 III 开关不能打开,否则将会隔离一些节点。而在第三步中,提出了一种更快的方法来改变类型 II 的开关状态,因此第二步的类型 II 开关不改变。

在第三步中,通过改变第二步得到的拓扑结构类型 II 的开关状态,得到新的拓扑结构。执行 on-off 动作,即打开一个类型 II 开关同时闭合一个联络开关以确保网络连通性。考虑第一阶段优化出的 DRE 和微燃机有功和无功出力,对改变后的拓扑结构进行潮流计算,以确定具有最小功率损耗的网络拓扑。

两阶段优化方法流程见图 1。第一阶段为日前调度阶段,利用基于目标相关性的多目标降维方法对多目标模型进行降维处理,然后通过 MPEPPS 算法求解降维后多目标优化模型以获得最优解。第二阶段为日内运行阶段,输入第一阶段优化出的最优 DRE 和微燃机出力,执行基于多步开关顺序交换法 (MSSE) 的 DNR 获得最小功率损耗及最优拓扑结构。

## 4 案例分析

为验证所提模型有效性,主要在 IEEE-33 节点系统进行数值研究,在 IEEE-84、IEEE-119、IEEE-136 节点系统中验证。本文 DRE 以光伏为例进行分析,在节点 8、22、23 分别装设装机容量为 350、350、150 kW 的光伏逆变器和微燃机。考

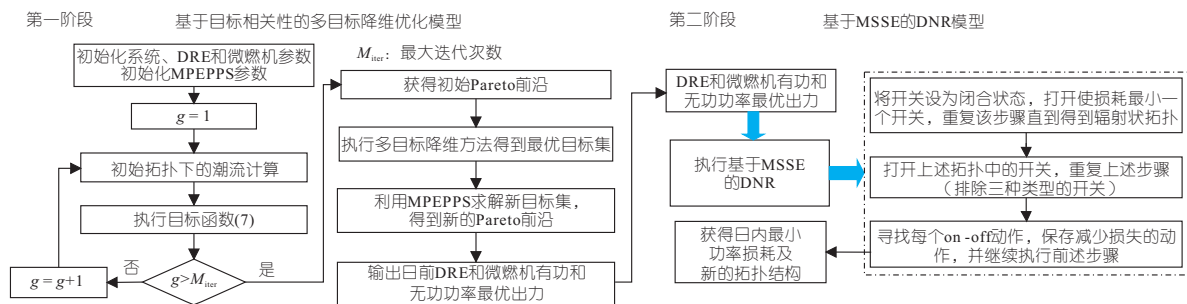


图 1 两阶段优化方法流程

Fig. 1 Flow chart of two-stage optimization model

考虑到光伏出力的特性,分析 7~18 h 时段内光伏出力,不失一般性,优化总时数  $T=12$  h。

### 4.1 多目标降维仿真分析

本文提出的基于目标相关性的降维方法不需要目标间具有可比性,该方法不会改变目标原始关系且能清晰描述目标间关系,有效克服了相互和谐指标量纲归一化和权重系数归一化的问题<sup>[8]</sup>。利用 MPEPPS 算法求出五个目标时的初始帕累托解集,得到相关系数矩阵,目标间对应关系见图 2。由图 2 看出,目标关系相对明确,运行

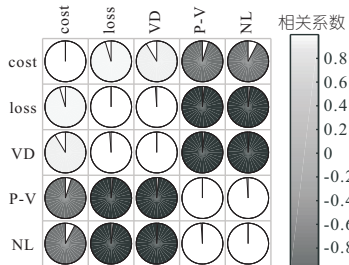


图 2 目标间相关关系图

Fig. 2 Correlation chart between objectives

总成本与功率损耗、电压偏差相互和谐,相关系数均大于 0.9,呈高度正相关。前三个目标与净负荷峰谷比和净负荷系数相互冲突,相关系数均小于 -0.9,呈高度负相关。通过 K-means 聚类将五个目标分为两个冲突组  $F_1, F_2$ , 即:

$$\min(F_1, F_2) \quad (16)$$

根据文献[8]将相互和谐的目标进行累加,即  $F_1 = F_{cost} + F_{loss} + F_{VD}$ ;  $F_2 = F_{P-V} - F_{NL}$ ,  $F_1$  和  $F_2$  的变异系数均大于 0.1%。

### 4.2 两阶段配电网随机优化模型仿真分析

第一阶段通过目标降维得到两个目标的优化模型,通过 MPEPPS 算法得到帕累托最优解集。第二阶段利用日前调度获得的 DRE 和微燃机出力的最优解集通过 MSSE 求解 DNR 模型。为验证两阶段随机优化模型的有效性,分两个场景进行分析:①S1。只考虑日前调度阶段,即不考虑日内 DNR。②S2。所提出的两阶段优化模型。最优目标值见表 1。由表 1 可知,净负荷峰谷差

表 1 不同场景下的最优目标值

Tab. 1 Optimal target values for different scenarios

场景	总成本	功率损耗	电压偏差	净负荷	净负荷
	/元	/kW		峰谷差	系数
S1	50 597.48	1 962.068	15.548	0.352	0.812
S2	50 520.16	1 680.404	13.613	0.352	0.812

和净负荷系数 S1 中已达到最优,总成本降低 77.32 元。且 S2 中功率损耗和电压偏差有明显改善,分别降低了 14.36%、12.45%。总体来看, S2 的优化结果优于 S1,这说明 DNR 可有效降低功率损耗,提高电压质量。

此外, S1、S2 不同时刻各节点电压分布见图 3。由图 3 可知, S1、S2 中各节点电压无电压越限情况。相较于图 4(a),图 4(b)各时刻各节点的电压波动较小。具体地, S1 中电压最小值在 16:00 第 33 节点处为 0.913 p.u.,而 16:00 第 18 节点处 S2 中的最小电压值为 0.923 p.u.,提高了 0.01 p.u.。由此可见,利用两阶段优化模型,可有效改善电压质量。为进一步说明所提优化模型对电压的作用,图 4 为两个场景的电压偏差箱线图。由图 4 可知, S2 中各时刻的电压偏差均低于 S1,其中 16:00 两个场景的电压偏差值最大。综上可知,本文所提模型在有效降低功率损耗的基础上,进一步提升了电能质量。

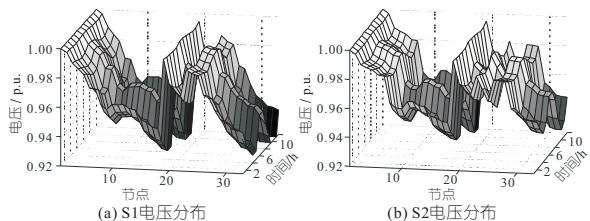


图 3 S1、S2 的电压分布

Fig. 3 Voltage distribution of S1 and S2

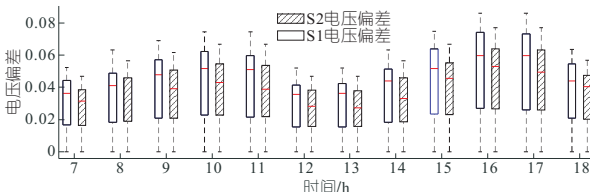


图 4 S1 和 S2 的电压偏差

Fig. 4 Voltage deviation of S1 and S2

### 4.3 基于 MSSE 的 DNR 模型

为验证 MSSE 方法的有效性,将其与文献[6]中顺序开关打开方法(SOM)与文献[7]中开关打开和交换方法(SOE)进行对比。不同 DNR 方法下各系统功率损耗见表 2,在 IEEE-33 节点系统中,MSSE 的功率损耗分别比 SOM、SOE 减

表 2 不同 DNR 方法下各测试系统功率损耗

Tab. 2 Power loss of each system in different scenarios

DNR 方法	kW			
	IEEE-33 节点	IEEE-84 节点	IEEE-119 节点	IEEE-136 节点
MSSE	112.028	406.682	570.141	244.329
SOM	113.985	542.245	644.983	294.956
SOE	113.354	523.721	640.322	287.288

少了 1.957、0.329 kW,在 IEEE-84、IEEE-119、IEEE-136 节点系统中,MSSE 的功率损耗分别比 SOM 降低了 25.00%、11.60%、17.16%,比 SOE 降低了 22.35%、10.96%、14.95%。总体而言,不同测试系统下,MSSE 降损效果均具有优越性。

表 3 为在不同测试系统中,不同场景下的配电网重构的功率损耗。由表 3 中第 2、3 列可以看出,与 MSSE0 相比,MSSE1 在所有测试系统中得到的功率损耗最小,分别降低了 10.15%、34.78%、21.66%、32.32%,这说明了 DNR 可有效降低功率损耗。

表 3 不同场景下各系统功率损耗

Tab. 3 Power loss of each system in different scenarios

系统	MSSE0	MSSE1	MSSE2	MSSE3
	/kW	/kW	/kW	/kW
IEEE-33 节点	124.684	112.028	112.028	112.028
IEEE-84 节点	628.175	409.703	408.752	406.682
IEEE-119 节点	734.354	575.283	574.660	570.141
IEEE-136 节点	364.154	246.455	245.665	244.329

根据表 3 第二行可以看出 IEEE-33 节点系统中 MSSE1 达到最小功率损耗,这说明小节点系统仅需要执行一步即可获得最优拓扑,IEEE-33 节点的最优拓扑见图 5(a)。通过表 3 第 3、4、5 列可以看出,在 IEEE-84、IEEE-119、IEEE-136 节点系统中,MSSE 每执行一步都能获得更小的功率损耗。其中,三个节点系统中 MSSE3 优化的功率损耗分别比 MSSE1 降低了 3.021、5.142、2.126 kW。MSSE 各步的最优拓扑结构见图 5(b)。由此可见,模型第二阶段中提出的基于 MSSE 的 DNR 方法可有效降低功率损耗。

## 5 结论

a. 配电网多重灵活性呈现较强的相关性,基于目标相关性的降维方法可有效降低优化目标的

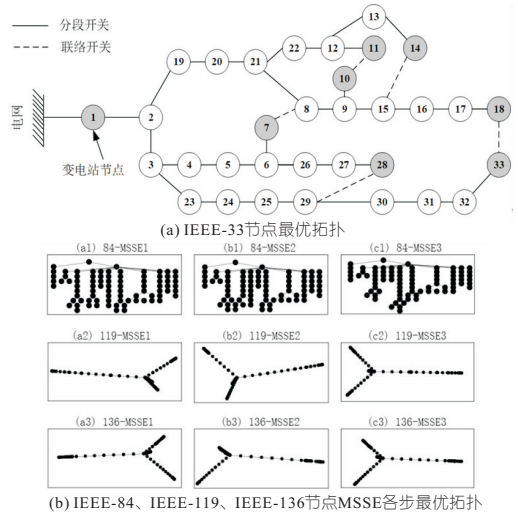


图 5 各节点系统最优拓扑结构

Fig. 5 Optimal topology of each node system

维度,减轻算法的计算负担,提高目标解的质量。

b. 通过对 4 个 IEEE 标准系统进行仿真测试,基于 SSEM 的 DNR 可有降低系统功率损耗。

c. 下一步工作将考虑不确定 DRE 有功和无功耦合策略,为 DRE 接入的随机不确定性提供更优质的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 曾博,徐富强,刘裕,等. 考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(21):7212-7225.
- [2] 王成山,李鹏,于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):13-21.
- [3] 孙靖,巩敦卫. 进化高维多目标优化研究进展[J]. 控制理论与应用,2018,35(7):928-938.
- [4] MA X, QI Y, LI L, et al. MOEA/D with uniform decomposition measurement for many-objective problems[J]. Soft computing, 2014, 18(12): 2541-2564.
- [5] WANG H, YAO X. Objective reduction based on nonlinear correlation information entropy[J]. Soft computing-a fusion of foundations, methodologies & applications, 2016, 20(6): 2393-2407.
- [6] 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.
- [7] ZHAN J, LIU W, CHUNG C, et al. Switch opening and exchange method for stochastic distribution network reconfiguration[J]. IEEE transactions on smart grid, 2020,11(4):2995-3007.
- [8] KOU Y N, ZHENG J H, LI Z, et al. Many-objective optimization for coordinated operation of integrated electricity and gas network[J]. Journal of modern power systems and clean energy, 2017, 5(3):350-363.



(a) 拼装后 (b) 拆除后

图 6 防洪墙拼装和拆卸效果对比

Fig. 6 Comparison of assembly and disassembly effects of flood wall

与滨水环境缺乏互动。通过将武青堤桩号 36+228~35+370 段钢筋混凝土实体防洪墙改造为“拼装式防洪墙+生态缓坡堤防”形式,非汛期可打开观江视线,形成开敞的观江空间,营造生态缓坡城市景观,延续月亮湾城市阳台观景轴线,使堤防与阳台景观实现有机交换,城市空间和滨水环境有机融合。

## 6 结论

本文将铝合金防洪墙引入到月亮湾防洪改造过程中,并提出拼装式防洪墙与生态缓坡相结合的改造方案,是解决城市滨水区域景观界面连续

性的有效手段,不仅消除了堤防对城市空间的压迫感,更是将城市景观空间不间断的延续到水边,形成完整统一的景观界面,方便市民能更好领略沿岸水体的景观,既能确保防洪安全,又能营造具有地域特色的滨水景观效果,是值得推广的城市滨水区域景观界面解决方案。

## 参考文献:

- [1] 丁泽霖,朱轩毅,张宏洋,等. 基于响应面法的移动式防洪墙优化分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 69-75.
- [2] 姚明星,范力阳,彭庭,等. 移动式防洪墙构件承载力的计算方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4577-4582.
- [3] 李建习,宋丹,杨冰清. 等. 移动式防洪墙铝合金板材耐腐蚀性能试验研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 49-52.
- [4] 吴军君,倪立建,陈海云. 等. 移动式防洪墙挡水试验研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 85-88.
- [5] 刘佳佳,张倩. 浅谈拼装式铝合金防水墙试验[J]. 城市道桥与防洪, 2015(11): 111-113.

## Application of Assembled Flood Control Wall and Gentle Slope in Yueliangwan Section

HU Jin-hui<sup>1</sup>, GUO Xiao-long<sup>2</sup>, SUN Ying-na<sup>1</sup>, PANG Ao-xuan<sup>3</sup>

(1. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. Wuhan Urban Flood Control Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430014;

3. Yantai Research Institute of Harbin Engineering University, Yantai 264006, China)

**Abstract:** In response to the inadequacies of traditional earthen and reinforced concrete flood walls that create barriers between urban areas and waterfront regions, which no longer meet the public's demands, the introduction of aluminum alloy flood walls in the Moon Bay flood control renovation project has been proposed. A transformation plan that combines modular flood walls with ecological embankments has been implemented. The post-renovation project has demonstrated excellent operational effectiveness, eliminating the oppressive feel of conventional flood defenses within the urban space. Furthermore, it seamlessly extends the urban landscape space to the water's edge, creating a unified and continuous landscape interface. This approach ensures flood safety while fostering a waterfront landscape with distinctive regional characteristics.

**Key words:** Yangtze River; urban embankment; assembled flood control wall; ecological gentle slope

\*\*\*\*\*  
(上接第 216 页)

## Multi-objective Dimensionality Reduction and Multi-step Reconfiguration Based Two-stage Distribution Network Optimal Operation Strategy

LI Jing-yu, CHEN Jia-jia, YIN Wen-liang

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The high penetration of distributed renewable energy aggravates the power fluctuation and uncertainty of distribution network. In this paper, a two-stage optimal operation strategy of distribution network based on multi-objective reduction and multi-step reconfiguration was proposed. In the day-ahead stage, multiple operational flexibility index models of voltage deviation, power loss, total operating cost, net load peak-valley difference and net load coefficient were constructed. On the basis of the model, a multi-flexibility index dimension reduction method based on target correlation was proposed, which aims to balance the relationship between various indicators, reduce the number of targets and improve computational efficiency. In the intraday phase, a distribution network reconfiguration method based on multi-step switch sequence exchange was proposed by cooperatively controlling the sectionalizing switches and tie switches, which fully exploits the available flexibility resources of the system. Finally, the simulation of arithmetic cases based on the IEEE-33 node system, the IEEE-84 node system, the IEEE-119 node system and the IEEE-136 node system were carried out, and the results show the effectiveness of the proposed two-stage distribution network flexibility enhancement strategy.

**Key words:** distributed renewable energy; two-stage optimization; distribution network reconfiguration; multi-objective downscaling