现代电力
MODERN ELECTRIC POWER
■ 中国高校优秀科技期刊 ■ 全国中文核心期刊
■ 中国科技核心期刊 ■ 中国知网收录期刊
■ 万方数据收录期刊 ■ 《CAJ-CD规范》执行优秀期刊

考虑负荷时段特性的双环网动态重组优化

王之凯 赵健 徐斌 徐港军

Dynamic Reorganization and Optimization of Double Loop Network Considering the Characteristics of Load Period

WANG Zhikai, ZHAO Jian, XU Bin, XU Gangjun

引用本文:
王之凯，赵健，徐斌，等．考虑负荷时段特性的双环网动态重组优化[J]．现代电力，2025，42(1)：46-53．DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0466
WANG Zhikai, ZHAO Jian, XU Bin, et al. Dynamic Reorganization and Optimization of Double Loop Network Considering the Characteristics of Load Period[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(1): 46-53. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0466

在线阅读 View online: https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0466

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑源荷双重不确定性的电气互联综合能源系统分布鲁棒优化调度
Robust Optimal Scheduling of Power-Gas Interconnected Integrated Energy System with Double Uncertainty of Source and Load
现代电力. 2019, 36(6): 52-60 http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/52

基于传感器网络与高斯过程回归的楼宇负荷预测
Building Load Forecasting Based on Sensor Network and Gaussian Process Regression
现代电力. 2021, 38(6): 664-673 https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0416

一种基于分层前探回溯搜索算法的合环回路拓扑分析方法
A Closing-Loop Topology Analysis Based on Hierarchical Forward-Probing and Backward-Tracking Search Algorithm
现代电力. 2022, 39(2): 143-150 https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0078

考虑时序特性的配电网分布式电源优化配置
Optimal Allocation of Distributed Generators in Distribution Network Based on Time-sequence Characteristics
现代电力. 2019, 36(2): 8-16 http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I2/8

考虑DG及负荷时序性的多目标配电网重构与DG调控综合优化规划
Comprehensive Optimal Planning of Multi-objective Distribution Network Reconfiguration and DG Regulation Considering DG and Load Sequence
现代电力. 2022, 39(2): 182-192 https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0039

含可再生分布式电源参与调控的配电网动态分区实时无功优化方法
Dynamic Partitioning Real-Time Reactive Power Optimization Method for Distribution Network with Renewable Distributed Generators Participating in Regulation
现代电力. 2020, 37(1): 42-50 https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0072

第 42 卷 第 1 期
2025 年 2 月

现 代 电 力
Modern Electric Power

Vol.42 No.1
Feb. 2025

文章编号：1007-2322(2025)01-0046-08 文献标志码：A 中图分类号：TM73

考虑负荷时段特性的双环网动态重组优化

王之凯，赵健，徐斌，徐港军
（上海电力大学 电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090）

Dynamic Reorganization and Optimization of Double Loop Network Considering the Characteristics of Load Period

WANG Zhikai，ZHAO Jian，XU Bin，XU Gangjun
（College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China）

摘要：针对城市电缆双环网中网损较大、电压偏移量高、负荷分布不均衡等问题，提出一种考虑负荷时段特性的双环网动态重组方法。首先，根据电缆双环网结构构建主干环网层和支线网络层双层拓扑模型。其次，提出基于功率矩的重组次数确定方法，根据功率矩不平衡度变化情况确定双环网重组次数，并提出改进的双截断高斯混合分布模型对日负荷进行时段划分，采用周期距离代替传统模型中的欧氏距离，提高模型时段划分准确率。再次，以网络损失最小、电压偏移量最低、负荷均衡度最高为指标构建负荷重组优化模型，在主干环网层和支线网络层利用二进制粒子群算法分别求解母线负荷重组方案和支线负荷重组方案。最后，在华东某城市电缆双环网中进行算例分析，验证模型的有效性和实用性。

关键词：电缆双环网；功率矩；双截断高斯混合模型；负荷均衡；分层优化

Abstract: Aiming at the problems of large network loss, high voltage offset and unbalanced load distribution in urban cable double loop network, a dynamic recombination method of double loop network considering the characteristics of load period is proposed. Firstly, a double layer topology model of trunk loop network layer and branch network layer is constructed according to the cable double loop network structure. Second, the restructuring of moment is presented based on the power, and a method for determining the number according to the imbalance of power moment degree determine daily load restructuring changes, and puts forward the improved double truncated gaussian mixture distribution model of daily load time, the periodic distance instead of traditional model of Euclidean distance, improved the model of time division accuracy. Thirdly, the load recombination optimization model was constructed with the minimum network loss, the lowest voltage offset and the highest load balance as the indexes, and the bus load recombination scheme and branch load recombination scheme were solved respectively by using binary particle swarm optimization algorithm at the trunk ring network layer and branch network layer. Finally, the effectiveness and practicability of the model are verified by an example in a city cable double loop network in east China.

Keywords: cable double loop network; power moment; doubly truncated gaussian mixture model; load balance; hierarchical optimization

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0466

0 引言

配电网接线方式根据供电区域分为电缆单环网、电缆双环网、架空多分段单联络、架空多分段两联络、架空多分段三联络等方式。在城市供电密集区域，配电网接线方式需采用电缆双环网接线方式[1-2]。双环网接线方式是一种环状多电源结构的接线方式，其最大特点是环网中含有多个开关站设备，每个开关站中包含 2 条母线，分别由不同的线路供电，配变通过支线与母线相连。在双环网规划过程中，由于负荷预测曲线与实际曲线存在较大误差，双环网在实际运行过程中会产生负荷分布不均问题。如何快速响应负荷变化，自动、准确地完成负荷均衡度调整成为配电网亟待解决的问题[3-4]。

目前，配电网改善负荷均衡度的主流方法是配网拓扑重构，拓扑重构是指通过改变网架结构中联络开关状态，改变配网拓扑结构，从而将重载线路中的部分负荷转移到轻载线路[5]。文献 [6-7] 提出了一种静态拓扑重构模型，以提高负荷均衡度，但是仅考虑了每个节点整体用电情况，未考虑负荷波动情况。在此基础上，文献 [8-9] 根据

联络开关最大动作次数均分时段，每隔固定时间实现了动态重构，但是并没有进一步对负荷时序特性进行分析，在某些时刻重构并不能取得理想效果；文献 [10-12] 在此基础上，深入分析了配电网的时序特性，在发生较大负荷波动时再进行重构，其余时间不再进行拓扑重构；文献 [13-16] 考虑了节点负荷变化与分布式电源出力时变特性，分时分层对配网进行重构。

上述重构方案均通过改变配网拓扑结构来实现负荷均衡。在电网实际运行过程中，存在无法重构或者重构后负荷分布不平衡依旧明显的情况，负荷重组为改善配网负荷均衡度提供了一种新的可能。与拓扑重构不同，负荷重组在不改变联络开关状态的情况下，可将重载线路部分负荷转移至轻载线路。对于电缆双环网，负荷重组是指通过对调开关站中两段母线位置或者改变配变所属母线，从而达到负荷均衡的效果。负荷重组模型分为以下几类研究内容：一是负荷重组次数确定；二是负荷重组时间确定；三是确定每次负荷重组方案[17-18]。

综上所述，针对电缆双环网负荷均衡问题，本文提出考虑负荷时段特性的双环网负荷动态重组方法。首先，构建电缆双环网主干环网及支线网络双层拓扑模型。其次，考虑负荷时段特性，建立负荷动态重组模型，提出功率矩不平衡度指标最小作为衡量标准，通过“手肘法”确定负荷重组次数，并采用改进的双截断高斯混合模型算法确定负荷重组模型。再次，以负荷均衡度最优、电压偏移量最小、网损最低作为评价指标，分时段对电缆双环网进行负荷重组。最后，以华东某电缆双环网为例，通过 3 种方案分别对时段划分模型及负荷重组模型进行有效性验证。

1　电缆双环网建模

根据配电网规划设计技术导则，在城市密集供电区域场景下，需使用电缆双环网接线方式。电缆双环网在拓扑结构中分为主干环网层和支线网络层。图 1(a) 为电缆双环网主干环网结构图，其由 2 座及以上变电站不同主变的中压侧分别馈出 2 回中压电缆线路，经由若干开关柜后分别形成 2 个并列单环。图 1(b) 为电缆双环网支线网络结构图，配电变压器由开关站母线出线供电，采用辐射式或者单环网形成支线网络。

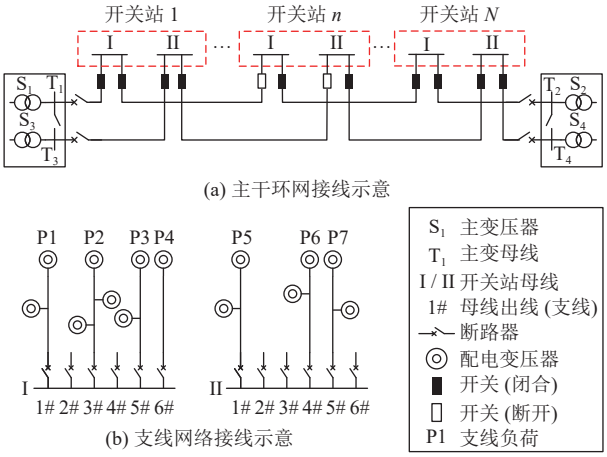

图 1　电缆双环网拓扑结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of cable double loop network topology

针对电缆双环网在实际运行过程中会出现负荷分布不均衡等情况，除了进行拓扑重构使负荷均衡外，还可以利用负荷重组解决上述问题。电缆双环网中负荷重组包含母线重组与支线重组。母线重组是指开关站中 2 条母线互换位置，实现母线上所有负荷的交换。支线负荷重组是指对一条母线上的支线与另一条母线上的支线进行对换位置。在图 1(a) 中，母线重组为选择开关站 1 至 N 中的一个或多个，将选择的开关站两条母线对调位置。I 段母线与 II 段母线上均有多个母线出口，支线挂接在哪一条母线上具有随机性，为进一步优化负荷均衡度，可在母线负荷重组的基础上进行支线重组，在图 1(b) 中，母线 I 段中某一条或多条支线负荷可以转移至 II 段母线中，提高负荷均衡度。在双环网实际运行过程中，负荷重组效果不是一成不变的，而机械地每隔一段时间进行重组运算也是不现实的，因此需要分析电网负荷变化情况，确定电网典型负荷波动时间，在负荷发生较大波动时，对双环网进行重组，以此达到负荷均衡度在整个时间尺度内最优。

2　基于双截断高斯混合模型的时段划分

2.1　基于功率矩的重组次数确定

在动态重组的过程中，首先需要确定重组次数 M。在实际操作过程中，M 值确定一般是利用经验值或者开关动作次数最大值来确定，这些数值往往不是最优的重组次数。功率矩不平衡度可

以直观反映双环网不同节点间负荷差异情况，因此本文提出依据功率矩不平衡度的重组次数确定方法。

首先，计算整个电缆双环网在时段 t 从开环点到电源点的功率矩。

$$J_{n_i,t}=\sum_{n_i=s}^{x_i}Re\left[S_{n_i,t}^{*}Z_{n_i}\right],Z_{n_i}=\sum_{l=s}^{n_i}z_l,i\in\{1,2\} \tag{1}$$

式中：功率矩 $J_{n_i,t}$ 为时段 t 从电源点 s 到开环点 x_i 所经历节点集合中节点 n_i 的视在功率的共轭 $S_{n_i,t}^{*}$ 与节点集合中节点 n_i 到电源点 s 的所有支路阻抗之和 Z_{n_i} 乘积的实部；节点 n_i 表示开关站 n 的第 i 条母线。

求取双环网在 t 时刻功率矩不平衡度 I_t。

$$I_t=\sum_{m_i,n_i\in L m_i\neq n_i}\left|J_{m_i,t}-J_{n_i,t}\right| \tag{2}$$

式中 L 为所有双环网开环点到电源点路径集合。

由此求得负荷不平衡度标准差为

$$\delta=\sqrt{\frac{T\sum_{t=1}^{T}(I_t)^2-\left(\sum_{t=1}^{T}I_t\right)^2}{T^2}} \tag{3}$$

δ 可以反映电缆双环网在时间尺度上负荷均衡度情况。通过负荷重组，δ 值会降低，δ 数值与负荷重组次数有密切关系，当 M 值小于最优数值时，随着 M 值的增加，δ 会先迅速降低，在 M 达到某一值后，δ 降低变得缓慢，δ 值与 M 值构成曲线形似人的手肘，因此取名“手肘法”。通过观察 δ 值与 M 值的手肘位置，便可得到最佳重组次数 M。

2.2 基于双截断高斯混合模型的重组时间确定

由于负荷数据取自于有限的时间内，而非完整的负荷运行曲线，因此采用双截断高斯混合模型对负荷重组时段进行划分[19-20]。在负荷重组过程中，将一天划分成 96 个时段，每一个时段 15 min，并假设在一个时段中各个节点负荷大小不发生变化。定义 $\boldsymbol{P}_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的有功负荷，本文选用双环网共有 N 个开关站，每个开关站有两段母线，故共有 $2N$ 个节点。模型样本为 $\boldsymbol{P}=[\boldsymbol{P}_1,\cdots,\boldsymbol{P}_t,\cdots,\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}]$，$\boldsymbol{P}_t=[\boldsymbol{P}_{1,t},\boldsymbol{P}_{2,t},\cdots,\boldsymbol{P}_{2N,t}]^{\mathrm{T}}$ 代表 t 时刻 $2N$ 个节点的负荷。传统负荷聚类时段划分方法默认第一组是从时段 0 开始，但在配电网实际运行过程中，每天零时刻负荷波动并不明显，此时作为时段分割点并不合适。为此，本文提出将负荷左端时间区间 $[0,t_1)$ 与右端时间区间 $[t_M,96)$ 划为一组。根据 2.1 节确定的 M 值，找到 M 个分界点，即 $0\leqslant t_1<\cdots<t_M<96$，将 $\boldsymbol{P}$ 划为 M 组，即 $S=\{S_1,\cdots,S_M\}$，每组对应的时间段分别为 $[t_1,t_2),\cdots,[t_{M-1},t_M),[t_M,96)\cup[0,t_1)$。模型具体求解过程如下。

步骤 1：模型建立。

设定模型 $f(X)$ 中参数集为：$\lambda=\{\omega_m,\boldsymbol{\mu}_m,\sigma_m\}_{m=1}^{M}$，其中 ω_m 为第 m 组高斯混合成分的权重，满足 $0<\omega_m<1$ 且 $\sum_{m=1}^{M}\omega_m=1$；$\boldsymbol{\mu}_m$ 为第 m 组高斯混合成分的 $2N$ 维均值向量；$\boldsymbol{\sigma}_m$ 为第 m 组高斯混合成分的 $2N\times2N$ 维协方差矩阵。每份样本 $\boldsymbol{P}_t$ 来自模型的 M 个混合成分，模型密度函数为

$$f(\boldsymbol{P}_t,\lambda)=\sum_{m=1}^{M}\omega_m f_m(\boldsymbol{P}_t,\boldsymbol{\mu}_m,\sigma_m) \tag{4}$$

式中 $f_m(\boldsymbol{P}_t,\boldsymbol{\mu}_m,\sigma_m)$ 为限定在 $[0,96)$ 上的第 m 个高斯混合成分密度函数。

$$f_m(\boldsymbol{P}_t,\boldsymbol{\mu}_m,\sigma_m)=\frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}\|\boldsymbol{P}_t-\boldsymbol{\mu}_m\|^{\mathrm{T}}\sigma_m^{-1}\|\boldsymbol{P}_t-\boldsymbol{\mu}_m\|\right\}}{[F(96)-F(0)](2\pi)^{\frac{N}{2}}|\sigma_m|^{\frac{1}{2}}} \tag{5}$$

其中，

$$\begin{cases}F(96)=\int_{-\infty}^{96}\int_{-\infty}^{96}\cdots\\ \qquad\int_{-\infty}^{96}f_m(\boldsymbol{P}_{1,t},\boldsymbol{P}_{2,t},\cdots,\boldsymbol{P}_{2N,t})\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{1,t}\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2,t}\cdots\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2N,t}\\ F(0)=\int_{-\infty}^{0}\int_{-\infty}^{0}\cdots\\ \qquad\int_{-\infty}^{0}f_m(\boldsymbol{P}_{1,t},\boldsymbol{P}_{2,t},\cdots,\boldsymbol{P}_{2N,t})\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{1,t}\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2,t}\cdots\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2N,t}\end{cases} \tag{6}$$

定义 $\|x-y\|=\min\{|x-y|,96-|x-y|\}$ 为周期距离，取代传统双截断高斯混合模型中的欧氏距离，在进行时段划分过程中，初始时段与尾部时段可能被划分到同一组时段中，提高时段划分精度。

步骤 2：利用期望最大化 (expectation-maximization，EM) 算法进行参数估计。

模型最大似然函数可被描述为式 (7)，利用 EM 算法迭代求解模型最大似然估计。

$$L(\boldsymbol{P}_t,\lambda)=\prod_{i=1}^{T}f(\boldsymbol{P}_t,\lambda) \tag{7}$$

$$\omega_m^{l+1}=\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}f\left(i|\boldsymbol{P}_t,\lambda^l\right) \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\mu}_m^{l+1}=\frac{\sum_{i=1}^{T}f\left(i|\boldsymbol{P}_t,\lambda^l\right)+\sum_{i=1}^{T}\frac{G(96)-G(0)}{F(96)-F(0)}\sigma_k^2 f\left(i|\boldsymbol{P}_t,\lambda^l\right)}{\sum_{i=1}^{T}f\left(i|\boldsymbol{P}_t,\lambda^l\right)} \tag{9}$$

$$\sigma_m^{l+1}=\frac{\sum_{i=1}^{T} f\left(i|\boldsymbol{P_t},\lambda^l\right)\left(\boldsymbol{P}_t-\boldsymbol{\mu}_i^{l+1}\right)\left(\boldsymbol{P}_t-\boldsymbol{\mu}_i^{l+1}\right)^T}{C\sum_{i=1}^{T} f\left(i|\boldsymbol{P}_t,\lambda^l\right)} \tag{10}$$

其中：

$$C=\frac{\left(1+\boldsymbol{\mu}_m^{l+1}\right)[(G(96)-G(0))+96G(0)]}{F(96)-F(0)} \tag{11}$$

$$\begin{cases} G(96)=\int_{-\infty}^{96} f_m(\boldsymbol{P}_{2N,t})\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2N,t} \\ G(0)=\int_{-\infty}^{0} f_m(\boldsymbol{P}_{2N,t})\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{2N,t} \end{cases} \tag{12}$$

$$f\left(i|P_t,\lambda^l\right)=\frac{\omega_i f_i(P_t,\mu_i,\sigma_i)}{\sum_{j=1}^{K}\omega_j f_j\left(P_t,\mu_j,\sigma_j\right)} \tag{13}$$

式中 $f\left(i|P_t,\lambda^l\right)$ 为第 i 个高斯混合成分的后验概率。

步骤 3：样本划分。

根据模型参数估计结果，把样本划分为 M 组，即 $S=\{S_1,\cdots,S_M\}$，每份样本 $\boldsymbol{P}_t$ 的组标记 Ω_t 由式 (14) 确定。

$$\Omega_t=\arg\max_{i\in\{1,2,\ldots,M\}} f\left(i|P_t,\lambda^l\right) \tag{14}$$

3　负荷分层重组模型

根据上文确定的时段划分方案，对每一组时段内负荷分别进行负荷分层重组，可提升负荷重组效果。负荷分层重组模型综合考虑了配电网网损最小、电压偏移量最小、负荷均衡度最优等问题，以负荷均衡评价指标最小为目标，考虑开关站母线功率约束、管沟资源约束等条件，利用二进制粒子群算法进行模型求解。下文对其目标与约束条件展开具体叙述。

3.1　目标函数

负荷分层重组模型的目标函数为

$$W=\min(\alpha f_1+\beta f_2+\gamma f_3) \tag{15}$$

式中：W 为电缆双环网负荷均衡指标；f_1、f_2、f_3 分别为整个双环网的网损指标、电压偏移量指标、负荷均衡度指标；α、β、γ 分别为各指标的权重。

1）网络损失提升指标。

$$f_1=\frac{\sum_{m=1}^{M} P_{\mathrm{loss},m}^b}{\sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{loss},t}^0} \tag{16}$$

$$P_{\mathrm{loss},m}^b=\sum_{t\in G_m}\sum_{n=1}^{N} R_{gn_i}\frac{{P_{gn_i,t}^b}^2+{Q_{gn_i,t}^b}^2}{{U_{n_i,t}^b}^2} \tag{17}$$

$$P_{\mathrm{loss},t}^0=\sum_{n=1}^{N} R_{gn_i}\frac{{P_{gn_i,t}^0}^2+{Q_{gn_i,t}^0}^2}{{U_{n_i,t}^0}^2} \tag{18}$$

$$g\in G \tag{19}$$

$$i\in\{1,2\} \tag{20}$$

式中，$P_{\mathrm{loss},m}^b$ 代表在负荷重组后 m 组时段内环网损失电量；$P_{\mathrm{loss},t}^0$ 代表在重组前 t 时段电缆双环网损失电量；R_{gn_i} 代表以电源点 g 到节点 n_i 为方向，离开节点 n_i 的支路电阻；$P_{gn_i,t}^0,Q_{gn_i,t}^0,P_{gn_i,t}^b,Q_{gn_i,t}^b$ 分别代表 t 时刻负荷重组前后电源点 g 传输到节点 n_i 的有功功率与无功功率；$U_{n_i,t}^0,U_{n_i,t}^b$ 分别代表 t 时刻负荷重组前后节点 n_i 的电压。

2）电压偏移量提升指标。

$$f_2=\frac{\sum_{t=1}^{T} U_{o,m}^b}{\sum_{t=1}^{T} U_{o,t}^0} \tag{21}$$

$$U_{o,m}^b=\sum_{n=1}^{N}\frac{\left|U_{n_i,t}^b-U_{n_i}^{\mathrm{N}}\right|}{U_{n_i}^{\mathrm{N}}},i\in\{1,2\} \tag{22}$$

$$U_{o,t}^0=\sum_{n=1}^{N}\frac{\left|U_{n_i,t}^0-U_{n_i}^{\mathrm{N}}\right|}{U_{n_i}^{\mathrm{N}}},i\in\{1,2\} \tag{23}$$

式中：$U_{o,m}^b$ 为负荷重组后第 m 组时段电缆双环网电压偏移量；$U_{o,t}^0$ 为负荷重组前 t 时段电缆双环网电压偏移量；$U_{n_i}^{\mathrm{N}}$ 为节点 n_i 的额定电压。

3）负荷均衡度提升指标。

$$f_3=\frac{\delta^b}{\delta^0} \tag{24}$$

式中 δ^0、δ^b 分别为负荷重组前后双环网负荷不平衡度标准差，其值可由式 (3) 求出。

3.2　约束条件

3.2.1　电缆双环网运行约束

式 (25)、(26) 为功率平衡约束函数，式 (27) 为节点电压约束。

$$P_{gn_i,t}=-P_{n_i,t}-R_{gn_i}I_{gn_i,t}^2+\sum_{f\in\Omega(n_i)} P_{fn_i,t} \tag{25}$$

$$Q_{gn_i,t}=-Q_{n_i,t}-X_{gn_i}I_{gn_i,t}^2+\sum_{f\in\Omega(n_i)} Q_{fn_i,t} \tag{26}$$

$$U_{n_i}^{\min}\leqslant U_{n_i,t}\leqslant U_{n_i}^{\max} \tag{27}$$

式中：$P_{n_i,t}$、$Q_{n_i,t}$ 分别为 t 时段节点 n_i 的有功、无功功率；$I_{gn_i,t}$ 为电源点 g 到节点 n_i 方向，离开节点 n_i 的支路电流；$P_{fn_i,t}$、$Q_{fn_i,t}$ 分别为注入节点 n_i 的有功、无功功率；$\Omega(n_i)$ 为与节点 n_i 相连线路

节点的集合；$U_{n_i}^{\max}$、$U_{n_i}^{min}$为节点 n_i 电压幅值的上下限。

3.2.2 母线重组约束

式 (28)—(31) 为母线负荷重组约束，开关站中两条母线在一组时段内只有重组与不重组 2 种状态。

$$P_{n_1,t}^m = P_{n_1,t}^0\left(1-x_{n,m}\right)+P_{n_2,t}^0 x_{n,m}, t\in S_m \tag{28}$$

$$Q_{n_1,t}^m = Q_{n_1,t}^0\left(1-x_{n,m}\right)+Q_{n_2,t}^0 x_{n,m}, t\in S_m \tag{29}$$

$$P_{n_2,t}^m = P_{n_2,t}^0\left(1-x_{n,m}\right)+P_{n_1,t}^0 x_{n,m}, t\in S_m \tag{30}$$

$$Q_{n_2,t}^m = Q_{n_2,t}^0\left(1-x_{n,m}\right)+Q_{n_1,t}^0 x_{n,m}, t\in S_m \tag{31}$$

式中：$x_{n,m}$代表第 n 个开关站在第 m 组时段是否进行母线重组，$x_{n,m}=1$代表进行母线重组，$x_{n,m}=0$代表母线不进行重组；$P_{n_1,t}^0$、$Q_{n_1,t}^0$分别表示负荷重组前节点 n_1 在 t 时刻有功、无功功率；$P_{n_1,t}^m$、$Q_{n_1,t}^m$分别表示母线重组后节点 n_1 在 t 时刻的有功、无功功率。

3.2.3 支线重组约束

式 (32)—(35) 为支线负荷重组约束，对于没有支线接入的母线出口等效成母线接入一个功率为零的支线，即所有母线出口处均视为接有支线；由此可以得到同一开关站母线 1 支线重组数量与母线 2 支线重组数量相同即式 (36)。

$$P_{n_1,t}^b = \sum_{f=1}^{M_{n_1}} P_{n_1,f,t}^m\left(1-x_{n_1,f,m}\right)+\sum_{l=1}^{M_{n_2}} P_{n_2,l,t}^m x_{n_2,l,m}, t\in S_m \tag{32}$$

$$Q_{n_1,t}^b = \sum_{f=1}^{M_{n_1}} Q_{n_1,f,t}^m\left(1-x_{n_1,f,m}\right)+\sum_{l=1}^{M_{n_2}} Q_{n_2,l,t}^m x_{n_2,l,m}, t\in S_m \tag{33}$$

$$P_{n_2,t}^b = \sum_{l=1}^{M_{n_2}} P_{n_2,l,t}^m\left(1-x_{n_2,l,m}\right)+\sum_{f=1}^{M_{n_2}} P_{n_1,f,t}^m x_{n_1,f,m}, t\in S_m \tag{34}$$

$$Q_{n_2,t}^b = \sum_{l=1}^{M_{n_2}} Q_{n_2,l,t}^m\left(1-x_{n_2,l,m}\right)+\sum_{f=1}^{M_{n_1}} Q_{n_1,f,t}^m x_{n_1,f,m}, t\in S_m \tag{35}$$

$$\sum_{f=1}^{M_{n_1}} x_{n_1,f,m} = \sum_{l=1}^{M_{n_2}} x_{n_2,l,m} \tag{36}$$

式中：$P_{n_1,t}^b$、$Q_{n_1,t}^b$分别表示经过支线重组后节点 n_1 在 t 时刻的有功、无功功率；$P_{n_1,f,t}^m$、$Q_{n_1,f,t}^m$分别表示节点 n_1 上第 f 个负荷在 t 时刻的有功、无功功率；M_{n_1}表示节点 n_1 的母线出口数量；$x_{n_1,f,m}=1$表示 n_1 节点在第 m 组时段进行母线重组，$x_{n_1,f,m}=0$表示 n_1 节点在第 m 组时段不进行母线重组。

4 算例验证及分析

针对城市电缆双环网接线方式，为进一步降低网络损失、降低电压偏移量、提升负荷均衡度，本文提出考虑负荷时段特性的双环网动态重组模型，首先进行双环网负荷重组时段研究，在此基础上分时段对电缆双环网进行母线、支线负荷优化重组。为了验证本文模型的有效性及实用性，在 Python 环境下，采用华东某城市 10 kV 电缆双环网进行算例验证。

4.1 算例说明

本文选取的电缆双环网详细结构见附录图 A1，双环网主干环网层如图 2 所示，4 个电源点均为 10 kV 电压等级，双环网采用闭环设计开环运行的工作方式，线路 1 与线路 3 的开环点位于开关站 3 母线 I 左侧联络开关处，线路 2 与线路 4 的开环点位于开关站 5 母线 II 右侧联络开关处。各母线出口处接线情况如附图 A1 所示。各线路参数情况如表 1 所示，其中仅电源点 2 到开关站 4 母线 I 处使用 YJV22-8.7/15 3×400 型号电缆，其余线路均使用 YJV22-8.7/15 3×300 型号电缆。

4.2 时段聚类结果分析

图 3 给出重组前功率矩不平衡度随时间变化曲线，可以明显看出在 0:00、12:00、18:00 附近有 3 个峰值，3:00 至 8:00 附近功率矩不平衡度保

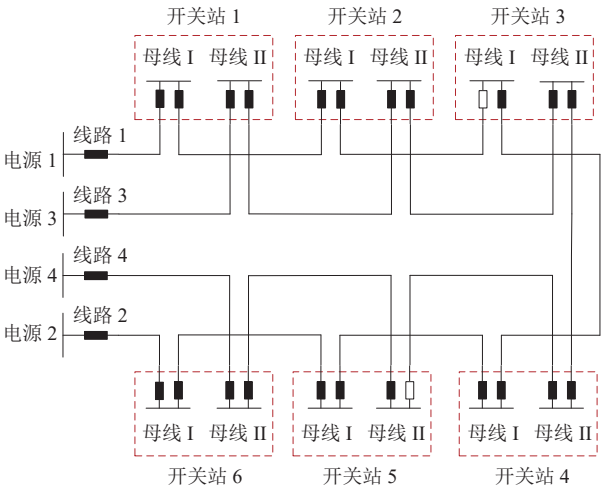

图 2 华东某城市 10 kV 电缆双环网主干环网结构图

Fig. 2 Structure drawing of main trunk ring network of 10 kV cable double ring network in a city in East China

表 1　线路参数表

Table 1　Line parameters

电缆型号	电压等级/ kV	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)	限额电流/ A
YJV22-8.7/15 3×300	10	0.060 1	0.088	495
YJV22-8.7/15 3×400	10	0.047 5	0.062 8	600

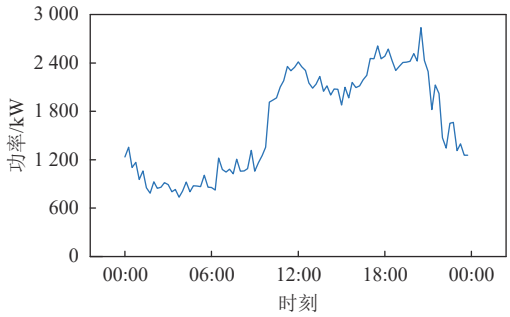

图 3　功率矩不平衡度变化

Fig. 3　Power moment unbalance degree change diagram

持平稳状态。表 2 为不同重组次数时功率矩不平衡度标准差数值。由表 2 可知，M<4 时，δ 值降落明显；M>4 时，随着 M 值的升高，δ 值下降并不明显，因此最佳负荷重组数选定为 4。

表 2　不同 M 值下的 δ 值的变化

Table 2　δ changes with different M values

重组次数M值	2	3	4	5	6
δ/(kW·Ω)	6 263	3 465	2 678	2 456	2 384

根据双截断高斯混合模型进一步进行时段划分，结果如图 4 所示。

4.3　负荷重组优化结果分析

为验证本文所提方法的有效性，设置以下 3 种方案进行对比：方案 1 不进行任何重组；方案 2 进行一次静态重组，即 M 值选取为 1；方案 3 按照本方法进行重组。

对以上 3 种方案各运用二进制粒子群算法求解 20 次，取结果最好的一次运行结果作为最终结果，图 5 为 3 种负荷重组方案各线路负荷情况对比图。图 5(a)、(b)、(c)、(d) 分别表示电缆双环网中的 4 条线路，图中 3 条线分别表示 3 种方案线路的功率矩变化情况。表 3 为 3 种负荷重组方

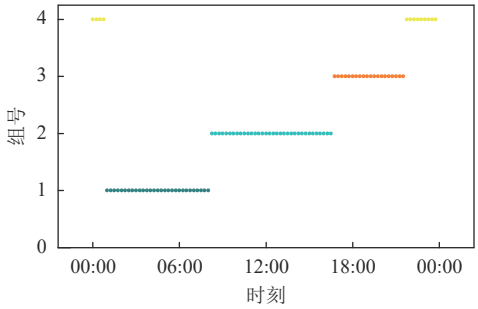

图 4　聚类结果

Fig. 4　Clustering results

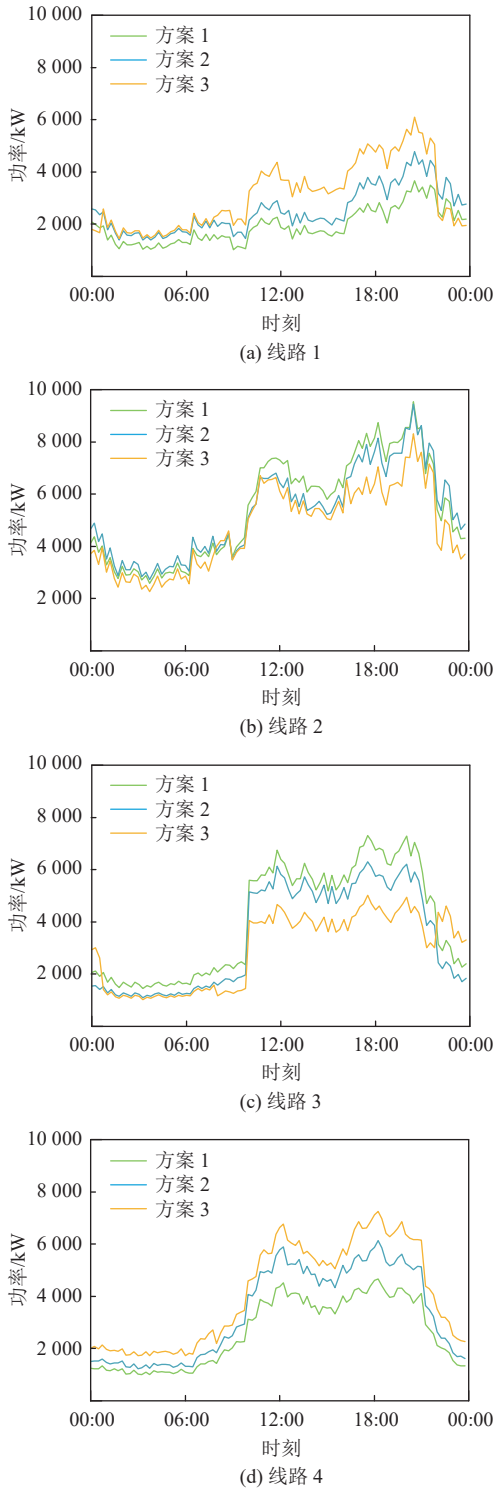

图 5　负荷优化重组结果前后对比

Fig. 5　Comparison before and after optimization of load reorganization

案负荷均衡度指标、电压偏移量、网络损失量变化情况。

表 3 各指标变化

Table 3 Change of each indicator

方案	负荷均衡度指标	电压偏移量/kV	网络损失量/(kW·h)
方案1	1	0.027 5	3 229.45
方案2	0.835 9	0.026 6	3 038.43
方案3	0.602 7	0.026 0	2 920.20

在方案 1 中，电缆双环网网络损失为 3 229.45 kW·h，电压偏移量为 0.027 5 kV，负荷均衡度指标设置为 1。

在方案 2 中，对比方案 1，虽然线路 1、4 功率矩变高，但是线路 2 与线路 3 功率矩降低，对于整个电缆双环网来说电压偏移量降低，有功网损降低，负荷均衡度指标优化至 0.835 9。在某些时刻，对比 4 条线路，功率矩仍存在较大的差异。

在方案 3 中，根据时段划分结果，进一步考虑了不同时段不同线路负荷特性，分时段对母线进行负荷重组，从而使负荷重组指标进一步优化。电缆双环网网络损失为 2 920.20 kW·h，电压偏移量为 0.026 0 kV，负荷均衡度指标优化为 0.602 7，与方案 2 相比，负荷均衡度指标优化 27.9%。表 4 为方案 3 中 4 个时段负荷重组的结果。母线重组指的是开关站中两条母线及母线出口处所接的负荷进行交换重组；支线重组是指母线出口处支线负荷更改所接母线，P_{xyz}代表第 x 个开关站的第 y 条母线中第 z 条支线的负荷。

表 4 方案 3 负荷重组结果

Table 4 Case 3 result of load reorganization

时段	[4, 33)	[33, 67)	[67, 89)	[89, 95]∪[0, 4)
母线重组	5站	1站、6站	1站、5站	2站
支线重组	P_{223}, P_{125}	P_{123}, P_{222}, P_{325}, P_{512}	P_{124}, P_{125}, P_{224}, P_{413}, P_{612}	P_{115}, P_{512}

5 结论

针对城市中电缆双环网接线方式部分线路出现负荷不均衡、网损较高、电压偏移量较高等问题，本文提出对开关站负荷进行母线及支线重组的方法；为提高负荷重组精度，提出基于双截断高斯混合分布模型的时段划分方法，分时段对负荷进行重组。根据在华东某城市电缆双环网中测试结果，在满足电缆双环网运行条件约束下，得出如下结论：

1）提出时段划分方法，针对电缆双环网负荷在日周期内负荷波动情况，考虑到负荷周期性变化，分时段对环网进行重组，精益化提升负荷均衡情况。

2）提出的负荷重组方法，根据时段划分结果，在每一组时段内按照母线支线重组方法可以最大限度调整负荷不均衡度，改善网络损失、电压偏移量等指标。

3）所提模型在负荷集中且很难进行升级改造的华东某城市配电网中进行实例验证，本文所提方法对改善城市配电网现状，调整配电网运行方式具有一定参考价值。

（本刊附录请见网络版，印刷版略）

参考文献

[1] 邓淇中, 肖可欣.《配电网规划设计技术导则》解读 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(9): 163−164.
DENG Qizhong, XIAO Kexin. Analysis on the guide for planning and design of distribution network[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(9): 163−164(in Chinese).

[2] 赵明欣, 刘伟, 陈海, 等.《配电网规划设计技术导则》解读 [J]. 供用电, 2016, 33(2): 2−7.
ZHAO Mingxin, LIU Wei, CHEN Hai, *et al*. Analysis on the guide for planning and design of distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(2): 2−7(in Chinese).

[3] 段翔兮, 邹琬, 李熠, 等. 基于数据驱动代理模型的城市输电网运行品质调节控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 65−73.
DUAN Xiangxi, ZOU Wan, LI Yi, *et al*. Data driven surrogate model-based operation quality control strategy of an urban transmission network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 65−73(in Chinese).

[4] ZHAO Jian, WANG Jianhui, XU Zhao, *et al*. Distribution network electric vehicle hosting capacity maximization: a chargeable region optimization model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4119−4130.

[5] 林清源, 薛毓强, 曾乙宸. 配电网重构研究综述 [J]. 电气开关, 2021, 59(1): 3−8.
LIN Qingyuan, XUE Yuqiang, ZENG Yichen. Overview of research on distribution network reconfiguration[J]. Electric Switchgear, 2021, 59(1): 3−8(in Chinese).

[6] 赵航宇, 赵洪山. 以配电网运行效益最优为目标的网络重构 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 50−55.
ZHAO Hangyu, ZHAO Hongshan. Distribution network reconfiguration for the optimal operating efficiency[J]. Elec-

trical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(15): 50−55(in Chinese).

[7] GUO Zhaomiao, ZHOU Zhi, ZHOU Yan. Impacts of integrating topology reconfiguration and vehicle-to-grid technologies on distribution system operation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(2): 1023−1032.

[8] 马倩, 苟亮, 张海峰, 等. 考虑开关动作次数的多时段配电网动态重构 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 9−14.
MA Qian, GOU Liang, ZHANG Haifeng, *et al*. Multi-period dynamic reconfiguration of distribution network considering the number of switching actions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 9−14(in Chinese).

[9] 谢冬清, 李兵, 丁炀, 等. 含低风速分散式风电的配电网动态鲁棒重构 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 226−233.
XIE Dongqing, LI Bing, DING Yang, *et al*. Dynamic robust reconfiguration of distribution network involving low-wind-speed dispersed wind power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(11): 226−233(in Chinese).

[10] 江东林, 刘天琪, 李樊. 采用时段动态划分和分层优化策略的配电网重构 [J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153−157.
JIANG Donglin, LIU Tianqi, LI Fan. Dynamic distribution network reconfiguration based on dynamic partition of time intervals and hierarchical optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 153−157(in Chinese).

[11] 董志辉, 林凌雪. 基于改进模糊 C 均值聚类时段划分的配电网动态重构 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2299−2305.
DONG Zhihui, LIN Lingxue. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved fuzzy C-means clustering of time division[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2299−2305(in Chinese).

[12] 陈新岗, 余兵, 陈小青, 等. 基于 PAM 时段划分的配电网动态重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 99−105.
CHEN Xingang, YU Bing, CHEN Xiaoqing, *et al*. Dynamic reconfiguration of distribution network based on PAM time division[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 99−105(in Chinese).

[13] 田书欣, 刘浪, 魏书荣, 等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 1−11.
TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, *et al*. Dynamic reconfiguration of a distribution network based on an improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 1−11(in Chinese).

[14] PAN J S, WANG Hongjiang, NGUYEN T T, *et al*. Dynamic reconfiguration of distribution network based on dynamic optimal period division and multi-group flight slime mould algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 208: 107925.

[15] HUANG Keke, XIANG Zili, DENG Wenfeng, *et al*. Reweighted compressed sensing-based smart grids topology reconstruction with application to identification of power line outage[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(3): 4329−4339.

[16] JI Xingquan, ZHANG Xuan, ZHANG Yumin, *et al*. Three-phase symmetric distribution network fast dynamic reconfiguration based on timing-constrained hierarchical clustering algorithm[J]. Symmetry, 2021, 13(8): 1479.

[17] 曹俊杰, 赵健, 单聚良, 等. 考虑合环约束的单双环配电网负荷重组均衡优化 [J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3604−3619.
CAO Junjie, ZHAO Jian, SHAN Juliang, *et al*. Load balanced optimization of load reorganization in single and double loop distribution network considering closing constraint[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3604−3619(in Chinese).

[18] 姜建, 楼健, 吴舜裕, 等. 基于负荷重组的城市配电网供电能力提升研究 [J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 9−15.
JIANG Jian, LOU Jian, WU Shunyu, *et al*. Study on power supply capacity of urban distribution network based on load restructuring[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 9−15(in Chinese).

[19] HARITHA D, RAO K S, SATYANARAYANA C. Face recognition system using doubly truncated multivariate gaussian mixture model and DCT coefficients under logarithm domain[J]. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 2012, 4(10): 8−17.

[20] 官国宇, 王运豪, 别一鸣. 周期数据时段划分的双截断高斯混合模型及其 EM 算法 [J]. 数理统计与管理, 2022, 41(1): 108−123.
GUAN Guoyu, WANG Yunhao, BIE Yiming. Double truncated gaussian mixture model and its EM algorithm for time segmentation of periodic data[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2022, 41(1): 108−123(in Chinese).

收稿日期：2022−12−05

作者简介：

王之凯 (1997)，男，硕士研究生，研究方向为城市配电网负荷重组优化研究，E-mail：wangzhikaii@163.com；

赵健 (1990)，男，通信作者，博士，副教授，研究方向为配电网运行与规划、电动汽车接入影响等研究，E-mail：zhaojianee@foxmail.com；

徐斌 (1996)，男，博士研究生，研究方向为配电网状态感知与优化运行，E-mail：2521720807@qq.com；

徐港军 (1997)，男，硕士研究生，研究方向为配电网运行优化，E-mail：763434451@qq.com。

附录 A

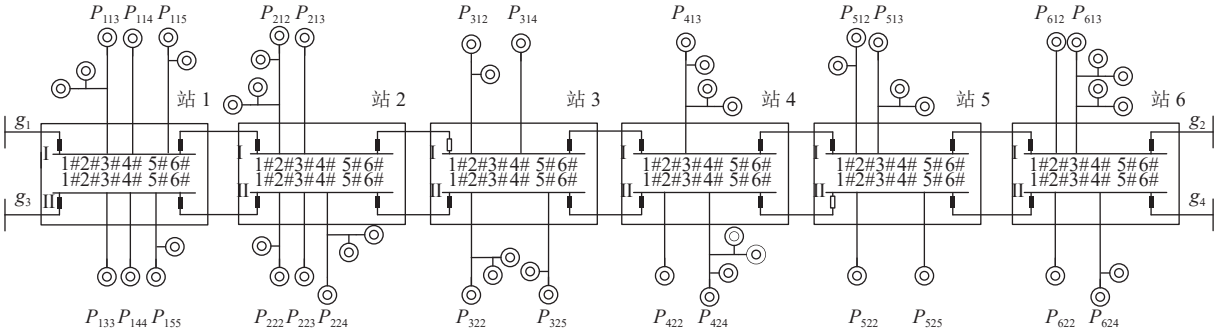

图 A1 华东某城市 10 kV 电缆双环网结构图

Fig. A1 10 kV cable double ring network structure drawing of a city in East China