**引用格式**:安海云,刘玉方,周前,等.主动配电网多主体多措施组合线损管控[J].电力科学与技术学报,2026,41(4):88-97.
**Citation**: An Haiyun, Liu Yufang, Zhou Qian, et al. Multi-entity multi-measure combined line-loss control for active distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2026,41(4):88-97.

# 主动配电网多主体多措施组合线损管控

安海云[1],刘玉方[2],周 前[1],李佳讯[3]
(1.江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211100;2.国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 211100;
3.清华大学清华深圳国际研究生院,广东 深圳 518055)

**摘 要**:风电、光伏、储能等不同主体的大量接入,导致配电网由传统无源网络转变为有源双向网络,这在缓解能源环境危机的同时,也给主动配电网的线损管控带来了极大的挑战。针对主动配电网线损管控新问题,提出一种考虑多主体参与的线损多措施组合管控方法。首先,综合考虑配电线路改造、变压器更换及无功补偿等不同降损措施,以主动配电网运行经济性最优为目标,以多主体参与的配电网安全运行为约束条件,建立计及降损效果和经济性的多目标优化模型。其次,提出基于效益系数的多措施组合线损管控策略,基于降损效益与成本的比值量化,得到最优的综合降损措施组合。再次,提出基于效益系数的求解方法,对建立的优化模型进行求解,得到能达到预定配电网降损目标的最优综合降损策略。最后,在实例中对所提方法进行了仿真分析与对比。仿真结果表明,所提方法能显著降低多主体配电网线损率,实现降损效益最大化。该研究可为主动配电网降损提供改造科学、高效的决策依据。

**关 键 词**:主动配电网;线损管控;分布式新能源;无功补偿;运行优化
**DOI**:10.19781/j.issn.1673-9140.2026.04.008 **中图分类号**:TM73 **文章编号**:1673-9140(2026)04-0088-10

## Multi-entity multi-measure combined line-loss control for active distribution networks

An Haiyun[1], Liu Yufang[2], Zhou Qian[1], Li Jiaxun[3]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract**: The large-scale integration of diverse entities, including wind power, photovoltaic generation, and energy storage, has transformed distribution networks from traditional passive networks into active bidirectional networks. While helping alleviate energy and environmental crises, this transformation also poses significant challenges to line-loss control in active distribution networks (ADNs). To address this issue, this paper proposes a multi-measure combined line-loss control method considering the participation of multiple entities. First, various loss-reduction measures, including distribution line upgrading, transformer replacement, and reactive power compensation, are considered comprehensively. A multi-objective optimization model accounting for both loss-reduction effectiveness and economic performance is established, with optimal economic operation of the ADN as the objective and secure operation of the distribution network with multi-entity participation as the constraint. Second, a multi-measure combined line-loss control strategy based on the benefit coefficient is proposed. By quantifying the ratio of loss-reduction benefits to costs, the optimal combination of integrated loss-reduction measures is determined. Third, a benefit-coefficient-based solution method is proposed to solve the established optimization model and obtain the optimal integrated loss-reduction strategy that meets the predefined loss-reduction target of the distribution network. Finally, simulation and comparative analyses were conducted through a case study. The simulation results show that the proposed method significantly reduces the line-loss rate of the multi-entity distribution network and maximizes the loss-reduction benefits. This study provides a scientific and efficient basis for decision-making on loss-reduction retrofits in ADNs.

**收稿日期**:2025-09-28;**修回日期**:2025-11-03
**基金项目**:国家电网有限公司科技项目(5400-202318203A-1-1-ZN)
**通信作者**:李佳讯(2000—),女,博士研究生,主要从事电力市场方面的研究;E-mail:lijiaxun23@mails.tsinghua.edu.cn

**Key words**: active distribution network; line-loss control; distributed renewable energy; reactive power compensation; operation optimization

随着风电、光伏、储能等多类型设备的大规模并网，配电网的电源结构发生了显著变化[1-2]。分布式电源在负荷端的广泛接入，使传统无源配电网逐步演变为具有双向潮流特征的有源网络[3-5]。相较于传统配网，主动配电网的功率分布变得更复杂，配电网线损计算与管控工作也更困难[6-8]。文献[9-10]融合了数据驱动模型与机理驱动模型的计算优势，提出了数据物理融合驱动的配电网线损分析计算方法，提高了配电网线损计算的准确性以及可解释性。在此基础上，如何对多主体接入后的配电网线损进行有效管控，已成为当前亟待解决的关键问题之一。

目前，国内外众多学者已从技术和管理两个方面提出了诸多配电网线损管控措施[11]。在管理降损方面，降损措施的核心在于建设并形成完善且科学的线损管理方法，有效应对管理线损问题[12-14]。为便于进行线损管理，文献[15]基于计量自动化系统，对中国广东省东莞市的某 10 kV 实际配电网进行了线损特征及影响因素分析。文献[16]针对新型配电网线损异常检测的精度提升问题，提出了一种结合多种算法的配电网线损综合检测方法，为配电网线损管控提供了支撑。文献[17-18]采用了精细化管理模式，主张在线损管理工作中推行分线路与分责任人的双维度管控机制，构建了以“数据精准化、分析专业化、目标靶向化、治理系统化”为核心的管理框架。文献[19-21]分析了计量技术革新在线损管理中的支撑作用，提出了涉及升级电能计量技术体系、加速智能计量设备迭代以及深化计量自动化系统应用的三维策略。文献[22]通过构建全流程计量安全防护体系，运用数字孪生技术，实现了计量数据全生命周期管理。文献[23]提出了电量采集管理的四化转型路径，并基于大数据的线损预测模型，通过智能算法优化抄核收流程，实现了线损计算的快速响应并保证降损精度。文献[24-25]加强了对供电企业降损工作中预防窃电管理的重视，制定了合理的反窃电策略，提高了相关人员的各方面的技术水准和反窃电能力，将窃电导致的电量损失减小到最小。

在技术降损方面，文献[26]构建了“设备-系统”双层降损技术框架，形成了完整的降损技术体系，实现了电能传输效率提升。文献[27-28]聚焦可再生能源消纳场景，提出了基于进化规划的概率云模型优化方法，突破了传统确定性优化框架，构建了考虑风光出力不确定性的辐射状配电网双层优化模型，实现了可再生能源渗透率提升与系统损耗降低的协同优化。文献[29-30]进一步构建了源-荷-储协同优化数学模型，将分布式电源出力波动性、负荷预测误差及储能系统充放电特性纳入统一优化框架，并利用基于禁忌搜索-遗传算法的混合智能优化算法对其进行求解。文献[31-32]研发了一款适用于配电网的无功补偿与效益评估软件系统，该系统可为电网调度运行人员定制多种降低配网线损的无功补偿策略。文献[32-36]分别建立了考虑各种分布式电源不确定性因素影响的配电网时域动态重构模型和配电网多目标重构模型，为配电网的多个重要目标与降低电能损失提供了有力的支撑。

但现有研究仍多以单一降损措施的研究或详细讨论为主，降损措施各自为政，对多种措施组合降损策略的研究较少。因此，对多种降损措施进行组合优化，已经成为多主体接入后配电网线损管控的关键之一。但如何设计出更高效与科学的降损措施组合，切实降低新型配电网的损耗的研究仍鲜见。

针对这些问题，本文提出一种考虑多主体参与的主动配电网线损多措施协同管控方法。先对配电网线路的所有配变低压侧负荷节点处近一年的负荷曲线集进行聚类分析，生成典型降损场景。再对配电导线、变压器、无功补偿等典型降损措施进行分析，以线损、无功补偿、线路及变压器更换成本最低为优化目标，考虑配电网以及设备运行约束建立优化模型。然后，提出基于效益系数的求解方法，对建立的优化模型进行求解，得到能达到预定配电网降损目标的最优综合降损策略。最后，采用实例对该方法进行仿真分析，验证其可行性与有效性。

## 1　主动配电网多措施组合降损模型

在主动配电网中，常通过若干类降损措施的组合来进行线损管控，不同种类的降损措施又由若干具体的实施方式组成，这些方式在技术方面和经济方面都可能存在较大的差异。因此，在确定降损方案的过程中，应综合考虑技术和经济指标，在满足降损效果的同时，制订经济上的具有较高效益的方

案,实现配电网线损管控的综合经济效益最大化。

### 1.1 目标函数

本文建立的主动配电网多措施协同线损管控模型旨在综合考虑降损效果与经济性,通过优化各类措施的组合方式,确保降损改造方案在技术性能和经济成本之间达到最佳平衡:

$$\min C = C_{\text{loss}}^{i} + C_{\text{vc}}^{i} + C_{\text{L}}^{i} + C_{\text{T}}^{i} \tag{1}$$

式中,$C$为降损措施的总成本;$C_{\text{loss}}^{i}$、$C_{\text{vc}}^{i}$、$C_{\text{L}}^{i}$分别为$i$个降损措施的线损成本、无功补偿成本、更换配电线路的成本;$C_{\text{T}}^{i}$为第$i$个降损措施的配电变压器更换成本。

#### 1.1.1 线损成本

线损成本是配电线路运行过程中电能损耗导致的售电费用的损失,这一成本可以在计算中将配电网线路的线损电量与对应的电价相乘来量化:

$$C_{\text{loss}}^{i} = \sum_{j=1}^{24} P_{\text{loss}}^{i,j} \tau_{\text{e}}^{j} n_{\text{LT}}^{j} \tag{2}$$

式中,$P_{\text{loss}}^{i,j}$为第$i$个降损措施的$j$小时的线路损耗;$\tau_{\text{e}}^{j}$为第$j$小时的电价;$n_{\text{LT}}^{j}$为降损成本计算的时间范围,本文设其值为1。

#### 1.1.2 无功补偿成本

无功补偿成本评估与无功补偿容量强相关.将总补偿无功容量与单位容量的设备投资成本相结合,可全面估算无功补偿的经济投入:

$$C_{\text{vc}}^{i} = \sum_{j=1}^{24} \sum_{k_{\text{vc}}=1}^{N_{\text{vc}}^{i}} Q_{k_{\text{vc}}}^{i,j} \tau_{\text{vc}} n_{\text{LT}} \tag{3}$$

式中,$N_{\text{vc}}^{i}$为第$i$个降损措施的无功补偿点的个数;$Q_{k_{\text{vc}}}^{i,j}$为第$i$个降损措施在$k_{\text{vc}}$处第$j$小时的补偿容量;$\tau_{\text{vc}}$为单位容量的投资成本。

#### 1.1.3 配电线路更换成本

配电线路的更换所需费用可由将线路长度与单位长度的材料所需费用、施工费用以及其他相关费用相乘来得到:

$$C_{\text{L}}^{i} = \sum_{k_l=1}^{N_{\text{L}}^{i}} L_{k_l}^{i} \tau_{l,k_l}^{i} \tag{4}$$

式中,$N_{\text{L}}^{i}$为第$i$个降损措施中须更换的配电线路总数;$L_{k_l}^{i}$和$\tau_{l,k_l}^{i}$分别为第$i$个降损措施中第$k_l$条线路更换的长度和单位工程造价。

#### 1.1.4 配电变压器更换成本

配电变压器的更换所需费用通过将变压器的容量与单位容量的工程所需费用相乘来得到:

$$C_{\text{T}}^{i} = \sum_{k_t=1}^{N_{\text{T}}^{i}} \tau_{t,k_t}^{i} \tag{5}$$

式中,$N_{\text{T}}^{i}$为第$i$个降损措施中要更换的配电变压器总数;$\tau_{t,k_t}^{i}$为第$i$个降损措施中需要更换的第$k_t$台配电变压器的单位价格。

### 1.2 约束条件

1)线损率约束。

《电力发展“十四五”规划(2021—2025年)》明确提出,到2025年,要将电网的综合线损率严格控制在5.5%这一水平之下。在不同的电力发展规划下,配电网运行商须考量自身的发展愿景与实际需求,制定契合自身发展路径的线损目标:

$$P_{\text{loss2}} = \frac{P_{\text{sup2}} - P_{\text{sales2}}}{P_{\text{sup2}}} \times 100\% < \eta \tag{6}$$

式中,$P_{\text{loss2}}$为配网实施降损措施后的线损率;$P_{\text{sup2}}$为供电量;$P_{\text{sales2}}$为售电量;$\eta$为降损目标设定值。

2)潮流约束。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum\limits_{j \in i} U_j \left( G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij} \right) \\ Q_i = U_i \sum\limits_{j \in i} U_j \left( G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij} \right) \end{cases} \tag{7}$$

式中,$P_i$、$Q_i$分别为节点$i$注入的有功功率与无功功率;$U_i$、$U_j$分别为节点$i$与节点$j$的节点电压;$\delta_{ij}$为节点$i$与节点$j$之间的功角;$G_{ij}$、$B_{ij}$分别为节点$i$与节点$j$之间的电导与电纳。

3)支路电流约束。

$$I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{U_i^2} \tag{8}$$

$$0 \leqslant I_{ij} \leqslant I_{\max} \tag{9}$$

式中,$P_{ij}$和$Q_{ij}$分别为支路$l_{ij}$的有功功率和无功功率;$I_{\max}$为支路允许通过的最大载流量;$I_{ij}$为支路$l_{ij}$上流过的电流。

4)节点电压约束。

$$U_{\min} \leqslant U_i \leqslant U_{\max} \tag{10}$$

式中,$U_{\min}$为允许的节点电压最小值;$U_{\max}$为允许的节点电压最大值。

5)无功补偿容量约束。

$$Q_{i,\min} \leqslant Q_i \leqslant Q_{i,\max} \tag{11}$$

式中,$Q_{i,\min}$为节点$i$处无功补偿的最小值;$Q_{i,\max}$为节点$i$处无功补偿的最大值。

6)分布式电源出力约束[35]。

$$0 \leqslant P_{\text{dg,WT}}^{t} \leqslant P_{\text{dg,WT}}^{t,\text{pro}} \tag{12}$$

$$0 \leqslant P_{\text{dg,PV}}^{t} \leqslant P_{\text{dg,PV}}^{t,\text{pro}} \tag{13}$$

式中,$P_{\text{dg,WT}}^{t}$、$P_{\text{dg,WT}}^{t,\text{pro}}$分别为第$t$个运行时段内风电机组的实际出力和计划出力;$P_{\text{dg,PV}}^{t}$、$P_{\text{dg,PV}}^{t,\text{pro}}$分别为第$t$个运行时段内光伏设备的实际出力和计划出力。

7）储能设备约束[36]。

$$I_{\mathrm{soc}}^{\mathrm{s-min}} \leqslant I_{\mathrm{soc}}^{s,t} \leqslant I_{\mathrm{soc}}^{\mathrm{s-max}} \tag{14}$$

$$0 \leqslant P_{\mathrm{ch}}^{t} \leqslant P_{\mathrm{ch,max}} \tag{15}$$

$$0 \leqslant P_{\mathrm{dch}}^{t} \leqslant P_{\mathrm{dch,max}} \tag{16}$$

$$x_{\mathrm{ch}}^{t} + x_{\mathrm{dch}}^{t} \leqslant 1 \tag{17}$$

式中，$I_{\mathrm{soc}}^{\mathrm{s-min}}$、$I_{\mathrm{soc}}^{\mathrm{s-max}}$分别为荷电状态的上、下限；$P_{\mathrm{ch}}^{t}$、$P_{\mathrm{dch}}^{t}$分别为$t$时刻储能装置的充、放电功率；$P_{\mathrm{ch,max}}$、$P_{\mathrm{dch,max}}$分别为储能装置充、放电功率的最大值；$x_{\mathrm{ch}}^{t} \in [0,1]$，$x_{\mathrm{dch}}^{t} \in [0,1]$分别为表征储能装置的充、放电的状态的0-1变量。

## 2　基于效益系数的降损方案筛选

多主体参与的主动配电网线损多措施协同管控模型的核心求解目标在于从不同降损对象所对应的多种线损管控措施的组合方案中筛选出能兼具降损幅度与经济性、综合效益达到最优的组合降损方案。传统枚举方法随着参与配电网降损资源数量的增多，其求解效率会大幅度降低[37]。因此，本文提出了一种基于效益系数的模型求解算法，以解决计算量过大的问题，提升模型的求解效率。

降损效益与降损成本的比值为效益系数$\mu_{\mathrm{LR}}$。降损成本主要包括线损管控改造过程中所产生的相关费用，而降损效益则通过线损管控改造后节省的电能来体现：

$$C_{\mathrm{LR}} = C_{\mathrm{vc}} + C_{\mathrm{L}} + C_{\mathrm{T}} \tag{18}$$

$$B_{\mathrm{LR}} = C_{\mathrm{loss1}} - C_{\mathrm{loss2}} \tag{19}$$

$$\mu_{\mathrm{LR}} = \frac{B_{\mathrm{LR}}}{C_{\mathrm{LR}}} \tag{20}$$

式中，$C_{\mathrm{loss1}}$为采取线损管控措施前的线损成本；$C_{\mathrm{loss2}}$为采取线损管控措施后的线损成本；$C_{\mathrm{LR}}$为线损管控成本；$C_{\mathrm{vc}}$为用于线损管控的无功补偿成本；$B_{\mathrm{LR}}$为线损管控收益。

若在降损过程中投入的成本相对较少，且降损所取得的经济效益较为可观，则效益系数就会呈现出增大的趋势。这表明该降损措施在综合效益方面表现优异，在制定改造方案时应优先考虑采用。

基于效益系数构建的配电网多措施协同线损管控模型求解过程如图1所示，其核心的解决思路为：先针对配电网中每一个需要降低线损的对象，逐一确定出效果最佳的单一降损措施；再以这些针对不同对象所确定的最优单一降损措施为基础，构建出一套可供选择的降损方案集合；最后，按照效益系数从高到低进行排序，将这些备选方案进行组合，逐步实施降损措施，直至线损率降低到所设定的目标值。若所有备选方案的组合都无法达成既定的线损率目标，则继续根据线损的薄弱环节，提出更具针对性的有效降损措施。具体实施步骤可分为6个步骤：

1）先基于线损薄弱点的分析结果，生成相对应的降损措施。再对这些措施进行筛选，确保它们都满足相关约束条件。同时，分别计算每个降损对象所对应措施的效益系数。

2）按照效益系数大小从高到低排序，将每个降损对象中效益系数最高的降损措施作为该对象在单项措施中的最优选择。

3）将计算得到的单项最优降损措施按照效益系数按照从高到低进行排序，构建一个主动配电网线损管控方案的备选措施集。

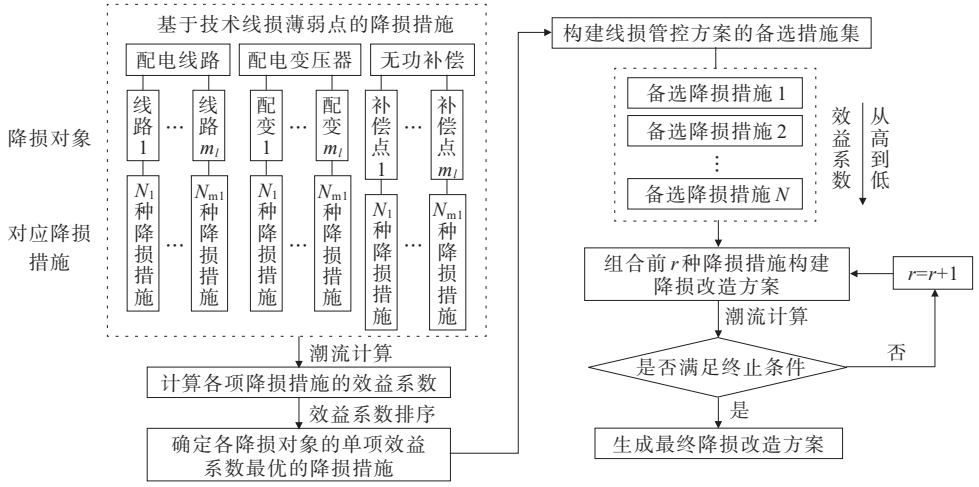



**图1**　基于效益系数的多措施组合线损管控模型求解方法流程

**Figure 1**　Solution method for multi-measure combined line-loss control model based on benefit coefficient

4)确定方案中降损措施的数量。

5)依次选取备选措施中的前若干种措施,组合形成一种多措施组合降损方案,并采用潮流计算,对该方案的效益系数进行详细解析。

6)判断是否满足终止条件。如果当前组合降损方案实施后的线损率仍然高于目标设定值,说明终止条件未满足,将措施数量增加1,并返回步骤5),重新构建方案;否则,输出此时的降损方案,将其作为最终的配电网降损改造策略。

通过上述步骤,本文所提策略能高效筛选出综合效益最优的降损改造方案,并可兼顾降损效果与经济性,为配电网降损改造提供科学依据。

## 3 仿真结果分析

以中国江苏省江宁某地10 kV配电网为实例,进行仿真分析,验证本文所提策略的降损效果。该配电线路拓扑结构如图2所示。在图2中,该配电网基准电压为12.66 kV;其中,节点0、节点4和节点16均为分布式电源的接入节点,节点7为电动汽车充电桩接入节点,节点11为储能设备的接入节点。本节所有仿真均在Python 3.7环境下完成。

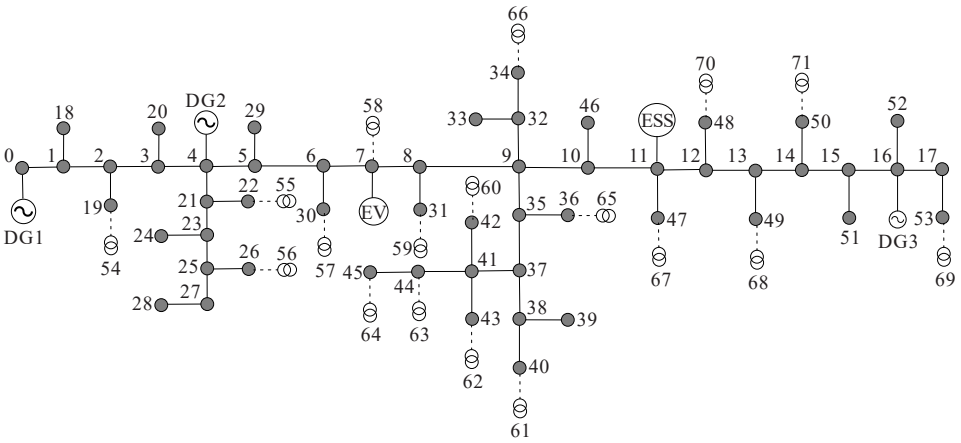



**图2** 江苏省江宁某地区10 kV配电网线路拓扑结构

**Figure 2** Line topology of 10 kV distribution network in Jiangning District, Jiangsu Province

为模拟技术线损异常场景,先将线路电阻增加至原电阻的1.04~1.14倍。再采用本文提出的方法对这条配电线路的多措施协同线损管控方案进行综合效益评估与优化求解,得到最优的降损措施组合。

### 3.1 典型降损场景生成

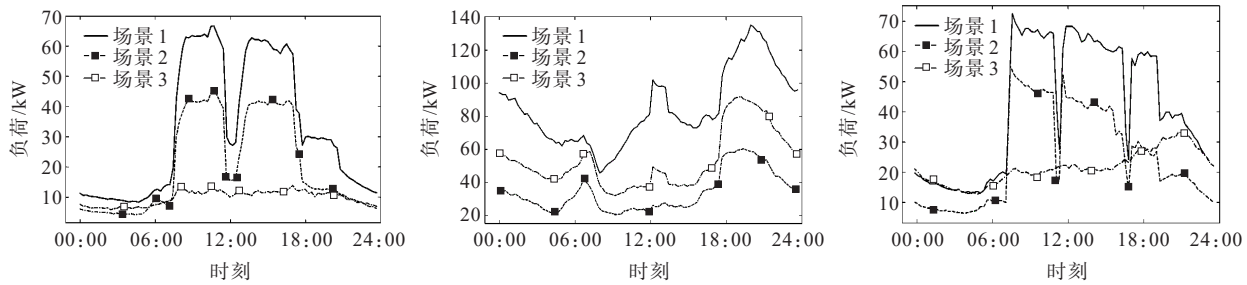
为验证所提线损管控方法对不同配电网运行场景下的适应性,本节生成了3种配电网线损管控的典型场景。

1)场景1:夏季典型供电场景。

2)场景2:过渡季典型供电场景。

3)场景3:冬季典型供电场景。

对所有配变低压侧负荷节点一年内的以15 min为间隔的日负荷曲线数据集进行聚类分析[38]。在聚类分析完成后,部分配度负荷聚类结果如图3所示,样本数量最多的3类中心曲线分别对应夏季、过渡季以及冬季的典型负荷情况。在实际应用中,把每个配变所属聚类中样本数最多的中心曲线,确定




(a)54节点配变负荷聚类结果 (b)55节点配变负荷聚类结果 (c)56节点配变负荷聚类结果

**图3** 部分配变负荷曲线聚类结果

**Figure 3** Clustering results of load curves for selected distribution transformers

为降损典型场景下该配变的典型负荷曲线。

以这些典型负荷曲线作为基础，把负荷数据进一步划分成24个断面，并依据这些断面数据开展潮流分析。得出以下结果：在未实施任何降损举措的条件下，该馈线每日的线损率达到了5.4%，其平均功率因数为0.96。该配电线路配变的功率因数如图4所示。

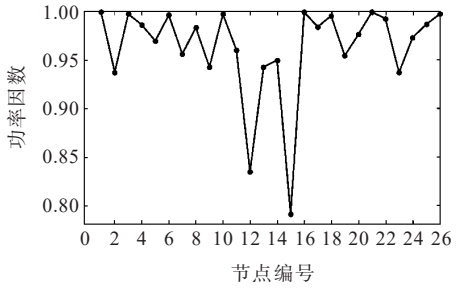



**图4**　配变的功率因数

**Figure 4**　Power factors of distribution transformers

### 3.2　典型降损策略筛选

本文考虑的降损措施主要针对配电网线路、变压器及无功补偿这3个方面，特别是针对功率因数较低的配电变压器[39]。线路改造、变压器更换与无功补偿的典型降损措施参数分别见表1～3。

**表1**　线路改造的典型降损措施参数

**Table 1**　Parameters of typical loss-reduction measures for distribution line upgrading

| 型号 | 成本/(万元·km$^{-1}$) | 设备更新编号 |
|---|---|---|
| YJV22-3×50 | 11.5 | 1 |
| YJV22-3×70 | 40 | 2 |
| YJV22-3×120 | 60 | 3 |

**表2**　变压器更换的典型降损措施参数

**Table 2**　Parameters of typical loss-reduction measures for transformer replacement

| 型号 | 成本/(万元·台$^{-1}$) | 设备更新编号 |
|---|---|---|
| S11-315 | 9 | 1 |
| S11-630 | 13 | 2 |
| S13-630 | 15 | 3 |

**表3**　无功补偿的典型降损措施参数

**Table 3**　Parameters of typical loss-reduction measures for reactive power compensation

| 型号 | 成本/(元·kVar$^{-1}$) | 设备更新编号 |
|---|---|---|
| — | 80 | — |

线路的单项降损措施见表4。若配电线路老化严重，应采用新型导线进行更换；若预期未来负荷将增长，可结合实际情况，适当增大导线截面。

**表4**　线路的单项降损措施

**Table 4**　Individual loss-reduction measures for distribution lines

| 措施编号 | 支路首节点 | 支路尾节点 | 新型号编号 |
|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 7 | 2 |
| 2 | 6 | 7 | 3 |
| 3 | 7 | 8 | 2 |
| 4 | 7 | 8 | 3 |
| 5 | 8 | 9 | 2 |
| 6 | 8 | 9 | 3 |
| 7 | 9 | 10 | 2 |
| 8 | 9 | 10 | 3 |
| 9 | 12 | 48 | 1 |
| 10 | 12 | 48 | 2 |
| 11 | 12 | 48 | 3 |
| 12 | 14 | 50 | 1 |
| 13 | 14 | 50 | 2 |
| 14 | 14 | 50 | 3 |
| 15 | 38 | 39 | 1 |
| 16 | 38 | 39 | 2 |
| 17 | 38 | 39 | 3 |
| 18 | 41 | 44 | 1 |
| 19 | 41 | 44 | 2 |
| 20 | 41 | 44 | 3 |

变压器的单项降损措施见表5。无功补偿的单项降损措施见表6。由表6可知，将S7型变压器更换为S11或S13系列，将功率因数提升至0.90～0.99的目标值，可有效降低主动配电网的线路损耗。

**表5**　变压器的单项降损措施

**Table 5**　Individual loss-reduction measures for ransformers

| 措施编号 | 支路首节点 | 支路尾节点 | 新型号编号 |
|---|---|---|---|
| 1 | 47 | 67 | 1 |
| 2 | 48 | 70 | 1 |
| 3 | 43 | 62 | 2 |
| 4 | 43 | 62 | 3 |
| 5 | 44 | 63 | 2 |
| 6 | 44 | 63 | 3 |
| 7 | 45 | 64 | 2 |
| 8 | 45 | 64 | 3 |

**表6**　无功补偿的单项降损措施

**Table 6**　Individual reactive power compensation measures for loss reduction

| 措施编号 | 支路首节点 | 目标功率因数 |
|---|---|---|
| 1 | 12 | 0.90 |
| 2 | 15 | 0.90 |
| 3 | 12 | 0.91 |
| 4 | 15 | 0.91 |
| 5 | 12 | 0.92 |
| 6 | 15 | 0.92 |
| 7 | 12 | 0.93 |

续表6

| 措施编号 | 支路首节点 | 目标功率因数 |
|---|---|---|
| 8 | 15 | 0.93 |
| 9 | 12 | 0.94 |
| 10 | 15 | 0.94 |
| 11 | 12 | 0.95 |
| 12 | 15 | 0.95 |
| 13 | 12 | 0.96 |
| 14 | 15 | 0.96 |
| 15 | 12 | 0.97 |
| 16 | 15 | 0.97 |
| 17 | 12 | 0.98 |
| 18 | 15 | 0.98 |
| 19 | 12 | 0.99 |
| 20 | 15 | 0.99 |

### 3.3 多主体多措施组合线损管控

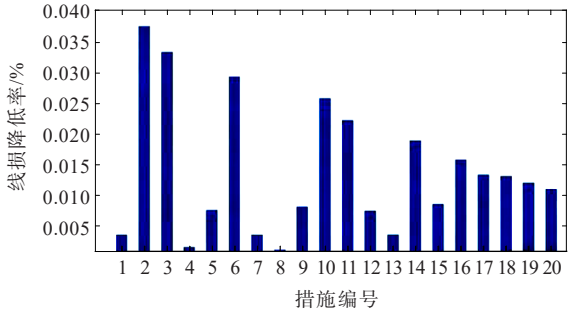
依据表1～3的成本与表4～6所列降损措施，对各项措施的降损效果进行了仿真分析。随后，按效益系数由高到低的顺序，对所有措施进行排序，确定针对不同降损目标的最优单项措施。基于效益系数排序的各降损对象的单项最优措施的具体编号变压器降损措施的效益系数见表7。

**表7** 基于效益系数排序的各降损对象的单项最优措施的具体编号变压器降损措施的效益系数

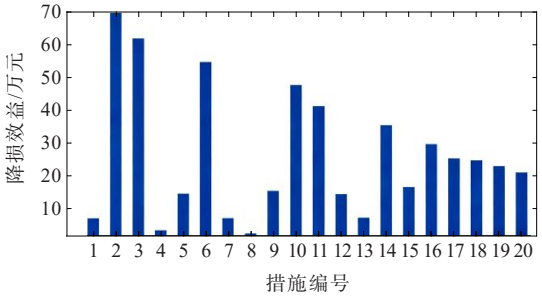
**Table 7** Specific IDs of individual optimal loss-reduction measures for different loss-reduction objects ranked by benefit coefficient

| 序号 | 降损类型 | 对应降损类型的措施编号 |
|---|---|---|
| 1 | 线路 | 12 |
| 2 | 无功补偿 | 19 |
| 3 | 无功补偿 | 17 |
| 4 | 线路 | 9 |
| 5 | 线路 | 1 |
| 6 | 无功补偿 | 15 |
| 7 | 线路 | 3 |
| 8 | 线路 | 15 |
| 9 | 线路 | 5 |
| 10 | 无功补偿 | 13 |
| 11 | 无功补偿 | 11 |
| 12 | 线路 | 2 |
| 13 | 线路 | 4 |
| 14 | 无功补偿 | 9 |
| 15 | 线路 | 6 |
| 16 | 无功补偿 | 7 |
| 17 | 无功补偿 | 20 |
| 18 | 无功补偿 | 5 |
| 19 | 无功补偿 | 18 |
| 20 | 无功补偿 | 16 |

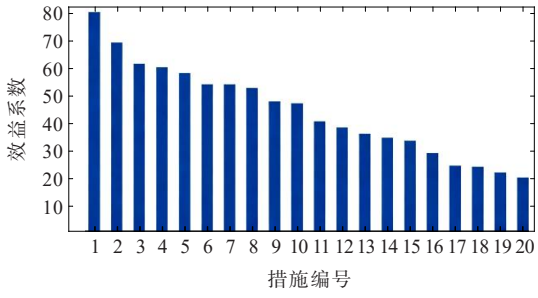
单项最优降损措施的效益系数计算结果如图5所示。从图5中可以看出，线路改造与无功补偿措施具有较高的效益系数，这是因为这些措施能直接针对该主动配电网的主要损耗源，且相关改造投资成本较低。相比之下，变压器更换的效益系数较低，其主要原因是投资成本高，降损效果有限。




(a)线损率降低率




(b)降损效益




(c)效益系数

**图5** 单项最优降损措施的效益系数计算结果

**Figure 5** Calculation results for benefit coefficients of individual optimal loss-reduction measures

根据表7所列单项措施的顺序，对降损措施进行迭代组合，并通过潮流计算判定其是否达到5%的目标线损率。多措施组合线损管控的线损率计算结果如图6所示。从图6中可以看出，当组合措施数量达到9项时，主动配电网线损率降低到了4.9%左右，低于预先设定的5.0%目标值。与此同时，此次降损带来的效益为142.52万元，而这些降损措施所花费的成本仅为26.67万元。

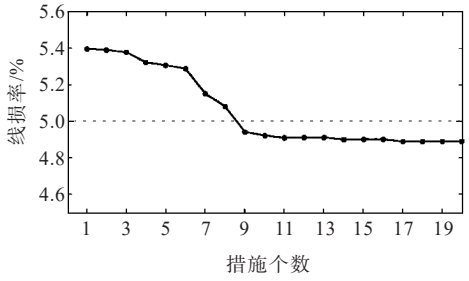



**图 6**　多措施组合线损管控的线损率计算结果

**Figure 6**　Calculation results for line-loss rates under combined multi-measure control

## 4　结语

为有效管理主动配电网线损问题，本文提出一种主动配电网多主体多措施组合线损优化方法。先建立了综合考虑降损效益与改造成本的多目标优化模型，以此协调无功补偿、配电线路升级改造、配电变压器更换等典型降损措施。然后，针对现有研究中普遍采用的枚举法求解模型所导致的求解效率低下的问题，提出了基于效益系数的优化求解方法，在保证配电网降损效果的同时显著地降低了计算复杂度。最后，进行了实例的仿真分析。仿真分析结果表明，本文所提方法能得到满足线损目标的多措施组合降损策略，可有效降低主动配电网损耗，减小配电运行商计算负担，在减少计算量的基础上，求得最合适的主动配电网多措施组合线损管控方案。

本文提出的配电网线损管控方法是基于特定的主动配电网拓扑提出的，随着分布式电源渗透率的进一步提升，配电网拓扑灵活变换也成为了应对新能源接入问题的重要手段，因此，未来研究中将进一步研究配电网拓扑变换对于线损管控的影响。

**参考文献：**

[1] Pang K Y, Wang C Y, Hatziargyriou N D, et al. Microgrid formation and real-time scheduling of active distribution networks considering source-load stochasticity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 2801-2813.

[2] 吴青峰, 王毅, 刘立群, 等 . 储能型虚拟直流发电机非等容锂电池健康状态均衡策略[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(6): 762-773.
Wu Qingfeng, Wang Yi, Liu Liqun, et al. State of health balancing scheme for non-equal capacity lithium batteries in energy storage virtual DC generator[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(6): 762-773.

[3] Fu J Q, Han Y, Li W H, et al. A novel optimization strategy for line loss reduction in distribution networks with large penetration of distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 150: 109112.

[4] Muralikrishnan G, Preetha K, Selvakumaran S, et al. Optimal planning of photovoltaic, wind turbine and battery to mitigate flicker and power loss in distribution network[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 116: 116034.

[5] Shao C, Yan X W, Yang Y H, et al. Multiple-zone synchronous voltage regulation and loss reduction optimization of distribution networks based on a dual rotary phase-shifting transformer[J]. Sustainability, 2024, 16(3): 1029.

[6] 吴依婷 . 电力计量的抄核收精益化管理措施[J]. 集成电路应用, 2020, 37(9): 52-53.
WU Yiting. Study on lean management measures of electric power metering[J]. Integrated Circuit Applications, 2020, 37(9): 52-53.

[7] 陈畅 . 配电网线损异常识别及多措施组合降损优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 34-46.
Chen Chang. Research on abnormal power loss detection and combined power loss reduction strategy optimization in the distribution network[D]. Nanjing: Southeast University, 2021: 34-46.

[8] 刘东, 张弘, 王建春 . 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7+20.
Liu Dong, Zhang Hong, Wang Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 2-7+20.

[9] 穆怀天, 廉洪亮, 刘娟, 等 . 基于数据物理融合驱动配电网三相线性化潮流及线损分析应用[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 46-56.
Mu Huaitian, Lian Hongliang, Liu Juan, et al. Application of three-phase linearized power flow and line loss analysis of distribution network driven by data and physics fusion[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 46-56.

[10] 安海云, 周前, 刘玉方, 等 . 基于拓扑门控的数据-机理混合驱动的主动配电网线损计算方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(5): 51-61.
An Haiyun, Zhou Qian, Liu Yufang, et al. A hybrid data-mechanism driven approach to active distribution network line loss calculation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5): 51-61.

[11] 程维杰, 颜云松, 康明才, 等 . 考虑分布式电源影响的配电网源荷储分层协调控制[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 113-119.

Cheng Weijie, Yan Yunsong, Kang Mingcai, et al. Generation-load-storage layered coordinated control of distribution network considering the influence of distributed generation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 113-119.

[12] 陈光宇, 徐嘉杰, 卢兆军, 等. 基于相关性度量算法的台区线损异常判断及精准定位[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 67-74.
Chen Guangyu, Xu Jiajie, Lu Zhaojun, et al. Judgment and precise location of abnormal line loss in station areabased on correlation measurement algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 67-74.

[13] 黄素娟, 张晓青, 孙保华, 等. 主动配电网协调控制系统设计及应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 25-30.
Huang Sujuan, Zhang Xiaoqing, Sun Baohua, et al. Design and application of an active distribution grid coordinated control system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 25-30.

[14] 顾江, 陆涟, 杨江, 等. 基于等值电阻和回归分析的配电网降损潜力研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(3): 61-63.
Gu Jiang, Lu Lian, Yang Jiang, et al. Loss reduction potential of distribution network based on equivalent resistance and regression analysis[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(3): 61-63.

[15] 庄远灿, 朱建全, 黄俊铭. 基于计量自动化系统的配电网线损特征及影响因素分析[J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 63-68+74.
Zhuang Yuancan, Zhu Jianquan, Huang Junming. Analysis of line loss characteristics and influencing factors of distribution network based on metrological automation system[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 63-68+74.

[16] 张晨晨. 新型电力系统下配电网线损综合检测方法及应用[J]. 电力设备管理,2025(3):118-120.
Zhang Chenchen. Comprehensive detection method and application of distribution line loss in new power system [J]. Electric Power Equipment Management, 2025(3): 118-120.

[17] 张新鹤, 王松岑, 吴乃月, 等. 配电网线损经济成本动态评价机制与优化路径研究[J]. 价格理论与实践, 2025(5): 128-134.
Zhang Xinhe, Wang Songcen, Wu Naiyue, et al. Research on dynamic evaluation mechanism and optimization path of distribution network line loss economic cost[J]. Price: Theory & Practice, 2025(5): 128-134.

[18] 韩茂岳,尹忠东,付瑜,等. 基于多源数据融合的配电网线损研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7):71-80.
Han Yuemao, Yin Zhongdong, Fu Yu, et al. Research on the distribution network line loss based onmulti-source data fusion[J].Power System and Clean Energy, 2024, 40(7):71-80.

[19] 戴雪婷, 李辉, 何柏娜, 等. 配电网拓扑分析与线路参数辨识研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 46-56.
Dai Xueting, Li Hui, He Baina, et al. Research on topology analysis and line parameter identification of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 46-56.

[20] 梁悦嫦. 配电网节能降损技术改造措施[J]. 数字通信世界, 2017(3): 256-258.
Liang Yuechang. Energy-saving and loss-reducing technical transformation measures for distribution networks[J]. Digital Communications World, 2017(3): 256-258.

[21] 曾剑豪. 电网企业营销管理中降低管理线损的措施[J]. 设备管理与维修, 2018(24): 15-17.
Zeng Jianhao. Measures to reduce management line loss in marketing management of power grid enterprises[J]. Equipment Management and Maintenance, 2018(24): 15-17.

[22] Sadiq E H, Antar R K. Minimizing power losses in distribution networks: a comprehensive review[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 10(4): 20-36.

[23] 姜叶海, 焦昊, 陈志, 等. 基于智能电表量测的配电网线路异常参数辨识及定位方法[J]. 电气传动, 2024, 54(7): 50-57.
Jiang Yehai, Jiao Hao, Chen Zhi, et al. Abnormal parameters identification and location method of distribution network line based on smart meter measurement[J]. Electric Drive, 2024, 54(7): 50-57.

[24] 张斌, 张洪波. 融合边缘计算的用电检查终端数据可信度提升与窃电溯源研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2025(7): 214-217.
Zhang Bin, Zhang Hongbo. Research on improving the data credibility and tracing the source of power stealing in power inspection terminal based on edge computing [J]. Electronic Components and Information Technology, 2025(7): 214-217.

[25] 梁华宝. 用电检查要点剖析与窃电防治管理[J]. 科技创新导报, 2018, 15(36): 151-152.
Liang Huabao. Analysis of the main points of electricity inspection and management of electricity theft prevention and control[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(36): 151-152.

[26] 应丽云, 刘敏, 邓磊, 等. 配电网降损综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 162-169.
Ying Liyun, Liu Min, Deng Lei, et al. A comprehensive review of the loss reduction in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19):

162-169.

[27] 周文青, 刘刚 . 基于深度学习和无人机图像的架空线路缺陷巡检综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 73-82.
Zhou Wenqing, Liu Gang. Review of overhead line defect inspection based on deep learning and UAV images[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 73-82.

[28] Khatod D K, Pant V, Sharma J. Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 683-695.

[29] Pereira B R, da Costa G R M, Contreras J, et al. Optimal distributed generation and reactive power allocation in electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 975-984.

[30] 赵琛, 叶金池, 和萍, 等 . 考虑源荷多重不确定性的园区综合能源系统优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 148-164.
Zhao Chen, Ye Jinchi, He Ping, et al. A PIES optimization strategy considering multiple uncertainties in source and load[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 148-164.

[31] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等 . 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
Zhang Haipeng, Lin Shunjiang, Liu Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.

[32] 安海云, 周前, 周琪 . 江苏电网降损潜力和实现途径方法分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6): 42-44.
An Haiyun, Zhou Qian, Zhou Qi. Analysis on the potential loss reduction and its implementation of Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(6): 42-44.

[33] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等 . 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.
Xie Linyu, Tang Zhong, Huang Xingyu, et al. Bi-layer dynamic reconfiguration of a distribution network considering the uncertainty of distributed generation and electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 1-11.

[34] 魏炜, 王禹东, 靳小龙 . 基于改进CGAN的主动配电网分布鲁棒日前调度[J]. 电力建设, 2025, 46(6): 175-191.
Wei Wei, Wang Yudong, Jin Xiaolong. Distributionally robust day-ahead dispatch optimization for active distribution networks based on improved conditional generative adversarial network[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 175-191.

[35] 王薪苹, 卫志农, 孙国强, 等 . 计及分布式电源和负荷不确定性的多目标配网重构[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 116-121.
Wang Xinping, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 116-121.

[36] 高辉, 徐晴, 欧阳曾恺, 等 . 含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 21-26.
Gao Hui, Xu Qing, Ouyang Cengkai, et al. Analysis of the optimal control strategy for source network load with multi-type distributed power source[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 21-26.

[37] 张俊, 蒲天骄, 高文忠, 等 . 电力系统智能计算的关键技术及应用展望[J]. 发电技术, 2025, 46(3): 421-437.
Zhang Jun, Pu Tianjiao, Gao Wenzhong, et al. Key technologies and application prospects of intelligent computing in power systems[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(3): 421-437.

[38] 唐竹,肖宇航,郭淳,等 . 基于CEEMDAN模态分解和TCN-BiGRU的短期电力负荷预测[J]. 智慧电力,2024, 52(12):59-64+72.
Tang Zhu,Xiao Yuhang,Guo Chun. Short-term electricity load forecasting based on CEEMDAND ecomposition and TCN-BIGRU model[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 59-64+72.

[39] 黄泽平, 陈丽安, 王红艳, 等 . 基于多物理场的大电流固体绝缘开关柜温升特性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 71-79.
Huang Zeping, Chen Li’an, Wang Hongyan, et al. Research on temperature rise characteristics of high current solid insulated switchgear based on multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 71-79.