

考虑台区运行控制及经济性提升的调容变压器配置评估方法

陆旦宏,李 艳,杨 婷,柏生奎,鱼泓漪

(南京工程学院 电力工程学院、沈国荣学院,南京 211167)

摘要:当前已有调容变压器配置评估方法中存在着考虑因素单一、综合成本考虑不充分以及缺乏台区运行控制结果分析等问题。对此提出了一种综合考虑台区运行控制与经济性提升的调容变压器配置评估方法。首先基于二阶锥规划构建了潮流模型,通过台区优化运行控制结果得到典型日净负荷数据,作为调容变压器容量选取的基础数据。其次分析了影响调容变压器配置评估的多维关键因素,然后建立了面向经济性提升的综合成本评估指标。最后依据典型台区历史负荷数据,开展调容变压器配置算例分析。在考虑光伏接入和不考虑光伏接入的两种场景下,基于不同运行规划周期和容量裕量,通过与传统变压器配置方案进行对比,验证了文中所提调容变压器配置方案的有效性和优越性。

关键词:调容变压器配置;台区运行控制;经济性提升;综合成本评估;二阶锥规划

A configuration evaluation method for adjustable capacity transformers considering operational control and economic efficiency in distribution areas

LU Danhong, LI Yan, YANG Ting, BAI Shengkui, YU Hongyi

(Nanjing Institute of Technology School of Electric Power Engineering, School of Shengguorong, Nanjing 211167, China)

Abstract: Current methods for configuring adjustable capacity transformers have several limitations. These include that the consideration of influencing factors is limited, the integration of comprehensive cost analysis is insufficient, and the assessment based on distribution transformer area operation and control results is absent. To address these issues, a configuration evaluation method for adjustable capacity transformers is proposed, which integrates operational control and economic performance. First, a power flow model is built using second-order cone programming. Based on the optimized operation of the distribution area, typical daily net load data are obtained to support capacity selection of adjustable capacity transformers. Then, key factors affecting configuration decisions are analyzed, and a comprehensive cost evaluation index is developed. Case studies using historical load data are conducted under both photovoltaic (PV) and non-PV scenarios. The effectiveness and advantages of the proposed method are demonstrated by comparing different planning periods and capacity margins with traditional configurations.

Key words: adjustable capacity transformer configuration; distribution transformer area control; economic performance improvement; comprehensive cost evaluation; second-order cone programming

0 引言

在“双碳”目标持续推进的背景下,电能替代进程不断加快,配电网的能源消费电气化水平显著提升^[1]。尤其许多农网台区,季节性负荷特征显著,“双高峰”现象日益突出,台区负荷的峰谷差不断扩大^[2-3]。随着PV接入台区后,虽然能降低出力时段的负载率,但存在负荷高峰与PV出力高峰时段错峰不重叠现象,进一步加大了台区负荷的波动情况^[4-5]。受此影响,当前大量存量配电台区采用固定容量模

式的传统变压器,普遍存在空载率高、运行效率低等问题,难以兼顾供电的经济性与可靠性^[6]。2023年,国家发展改革委等3部门联合发布的《关于实施农村电网巩固提升工程的指导意见》明确提出“因地制宜、降本增效”,强调应根据地区实际情况分类施策,科学制定电网提升方案,合理控制投资成本、提高投资效益^[7]。该政策导向对农村配电设备的经济性与适应性提出了更高要求,也为调容变压器的推广应用与配置评估提供了明确的政策支持。

在此背景下,具备容量调节能力的调容变压器因其供电匹配性与能效水平优势,近年来逐渐受到关注,并在部分地区实现示范应用^[8]。然而,目前国内有关调容变压器的研究主要聚焦于调容变压

器的运行控制策略,文献[9]采用门限值法实现调容点的计算与判断。文献[10]将深度学习与调容策略融合,提升调节智能性。文献[11]在调容变压器设备已投运的前提下,进一步探讨了台区自适应控制策略。相较而言,针对调容变压器在配置阶段的系统化评估研究仍较薄弱,尚缺乏完善的配置方法体系,难以有效发挥设备的运行潜力和经济优势。

目前,已有一些研究从规划视角对调容变压器的配置问题展开了初步探索,如文献[12]在考虑成本约束条件下提出了基于节能目标的优化替换策略,但其仅将节能作为调容变压器的更换判据缺乏对经济适用性的系统评估。文献[13]在配置过程中重点考虑了调容变压器的采购成本,然而其未将配置方案与固定容量模式的传统变压器配置进行对比分析,依然存在难以全面评估调容变压器经济适用性的缺陷。因此,亟需开展针对调容变压器配置阶段的评估研究,以支撑其在实际工程中的合理部署与推广应用。

调容变压器的配置评估方法应综合考虑采购成本与运行能耗成本,在有效使用期内达到经济性综合最优的目的。随着“双碳”政策推进,发电成本与碳排放成本共同构成了电—碳产品的价格^[14]。在配置调容变压器时,文献[15]指出变压器电能损耗是碳排放的重要来源之一,因此应考虑将碳排放成本纳入调容变压器配置评估体系。近年来,随着配电台区接入多元化设备,实现智能运行控制以提升整体效益已成为重要发展方向^[16]。因此,考虑台区经济性提升且将台区运行控制的结果纳入调容变压器容量配置评估过程,具有十分重要的现实意义。

综上所述,针对当前调容变压器配置评估方法中存在的考虑因素单一、综合成本考虑不充分以及体系不完善等问题,文中首先深入研究调容变压器的损耗计算,在此基础上建立配电台区潮流优化运行控制模型;其次,综合考虑影响调容变压器配置的关键因素,从提升经济性的角度出发,提出调容变压器配置评估方法;最后,选取典型农村配电台区和居民台区作为算例分析场景,对文中提出的调容变压器配置方案的有效性与经济性进行全面评估分析。

1 调容变压器的损耗计算

1.1 调容临界点确定

调容变压器具有大、小两个额定容量,可依据低压出口侧净负荷的实时变化,在大容量与小容量模式之间在线切换。根据调容变压器的技术参数,调容变压器大、小容量状态下的空载无功损耗 Q_{OH} 、 Q_{OL} 可定义为

$$\begin{cases} Q_{OH} = \frac{I_{OH}\%S_{NH}}{100} \\ Q_{OL} = \frac{I_{OL}\%S_{NL}}{100} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{OH}\%$ 和 $I_{OL}\%$ 分别为调容变压器大、小容量模式下的空载电流; S_{NH} 和 S_{NL} 分别为调容变压器在大、小容量模式的额定容量。

调容变压器在大容量和小容量模式的负载无功损耗 Q_{KH} 、 Q_{KL} 定义为

$$\begin{cases} Q_{KH} = \frac{U_{KH}\%S_{NH}}{100} \\ Q_{KL} = \frac{U_{KL}\%S_{NL}}{100} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{KH}\%$ 和 $U_{KL}\%$ 分别为调容变压器大容量和小容量模式的短路阻抗。

在净负荷为 S 时,调容变压器大容量和小容量模式的损耗 ΔP_{ZH} 和 ΔP_{ZL} 分别为

$$\begin{cases} \Delta P_{ZH} = (P_{OH} + K_Q Q_{OH}) + (S/S_{NH})^2 (P_{KH} + K_Q Q_{KH}) \\ \Delta P_{ZL} = (P_{OL} + K_Q Q_{OL}) + (S/S_{NL})^2 (P_{KL} + K_Q Q_{KL}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{OH} 和 P_{OL} 分别为调容变压器大、小容量模式的空载有功损耗; P_{KH} 和 P_{KL} 分别为大、小容量模式的负载有功损耗; β_H 和 β_L 分别为大、小容量模式的负载率; K_Q 为无功经济当量。

图1所示为调容变压器在大、小两种容量模式下随着净负荷增长的损耗曲线。

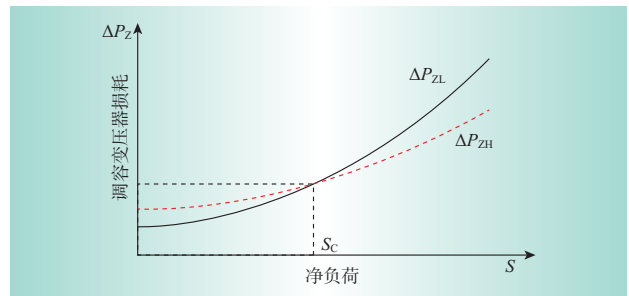


图1 调容变压器不同容量模式下的损耗曲线

Fig. 1 Loss curves under different capacity modes of adjustable capacity transformer

当 $\Delta P_{ZH} = \Delta P_{ZL}$ 时,可得调容变压器大容量模式和小容量模式的临界切换点 S_C 为

$$S_C = \sqrt{\frac{(P_{OH} + K_Q Q_{OH} - P_{OL} - K_Q Q_{OL})S_{NH}^2 S_{NL}^2}{S_{NH}^2 (P_{KL} + K_Q Q_{KL}) - S_{NL}^2 (P_{KH} + K_Q Q_{KH})}} \quad (4)$$

若负荷 S 高于临界点 S_C ,则调容变压器切换到大容量模式;若负荷 S 低于临界点 S_C ,则切换到小容量模式。

1.2 电能损耗计算

基于调容临界点 S_C ,采集 t 时刻净负荷数据 S_t 对应的调容变压器损耗 $\Delta P_{adj,t}$ 可表示为

$$\Delta P_{\text{adj},t} = \begin{cases} (P_{0H} + K_Q Q_{0H}) + \\ (S_t/S_{NH})^2 (P_{KH} + K_Q Q_{KH}) & S_t > S_C \\ (P_{0L} + K_Q Q_{0L}) + \\ (S_t/S_{NL})^2 (P_{KL} + K_Q Q_{KL}) & S_t \leq S_C \end{cases} \quad (5)$$

采集净负荷数据 S_t 对应的传统变压器损耗 $\Delta P_{\text{ord},t}$ 可表示为

$$\Delta P_{\text{ord},t} = (P_0 + K_Q Q_0) + (S_t/S_N)^2 (P_K + K_Q Q_K) \quad (6)$$

式中: P_0 和 Q_0 分别为传统变压器的空载有功损耗和空载无功损耗; P_K 和 Q_K 分别为传统变压器的负载有功损耗和负载无功损耗; S_N 为传统变压器的额定容量。

传统变压器的空载无功损耗 Q_0 和负载无功损耗 Q_K 分别为

$$Q_0 = \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (7)$$

$$Q_K = \frac{U_K \% S_N}{100} \quad (8)$$

式中: $I_0 \%$ 、 $U_K \%$ 分别为传统变压器的空载电流和短路阻抗。

2 配电台区运行控制模型

2.1 二阶锥潮流模型

文中以图2所示的支路为基础构建二阶锥潮流模型,作为台区运行控制模型的核心部分,支撑净负荷计算。

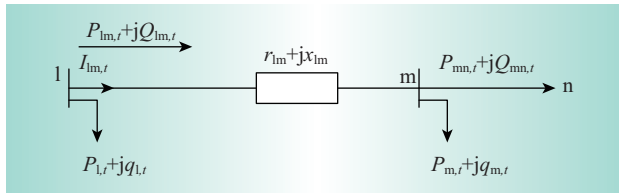


图2 支路潮流模型

Fig. 2 Branch power flow model

该支路的潮流关系为

$$\alpha_{m,t} = \alpha_{l,t} - 2(r_{lm} P_{lm,t} + x_{lm} Q_{lm,t}) + (r_{lm}^2 + x_{lm}^2) \beta_{lm,t} \quad (9)$$

$$p_{m,t} = P_{lm,t} - r_{lm} \beta_{lm,t} - P_{mn,t} \quad (10)$$

$$q_{m,t} = Q_{lm,t} - x_{lm} \beta_{lm,t} - Q_{mn,t} \quad (11)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{lm,t} \\ 2Q_{lm,t} \\ \beta_{lm,t} - \alpha_{l,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \beta_{lm,t} + \alpha_{l,t} \quad (12)$$

式中: l 、 m 和 n 为支路两端节点; lm 为由节点 l 、 m 构成的支路; $\alpha_{m,t}$ 和 $\alpha_{l,t}$ 分别为 l 节点和 m 节点电压的平方; $\beta_{lm,t}$ 为 lm 支路电流的平方; r_{lm} 和 x_{lm} 分别为支路 lm 的电阻和电抗; $P_{lm,t}$ 和 $Q_{lm,t}$ 分别为注入 lm 支路前端的有功功率和无功功率; $P_{mn,t}$ 和 $Q_{mn,t}$ 分别为注入

支路 mn 前端的有功功率和无功功率; $P_{m,t}$ 和 $Q_{m,t}$ 分别为从 m 节点向用户侧输出的有功功率和无功功率。

2.2 目标函数与约束条件

(1) 目标函数

文中设置以最小化配电网全天的线路损耗为优化目标,可表示为

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{lm \in E} \beta_{lm,t} r_{lm} \quad (13)$$

式中: P_{loss} 为配电网全天各支路线损之和; E 为配电网支路集合。

(2) 潮流约束条件

支路潮流关系约束由式(9)一式(12)构成。对于支路潮流的电压和电流的约束为

$$\alpha_{l,t,\min} \leq \alpha_{l,t} \leq \alpha_{l,t,\max} \quad (14)$$

$$\beta_{lm,t,\min} \leq \beta_{lm,t} \leq \beta_{lm,t,\max} \quad (15)$$

式中: $\alpha_{l,t,\min}$ 和 $\alpha_{l,t,\max}$ 分别为节点 l 对应的电压平方最大值和最小值; $\beta_{l,t,\min}$ 和 $\beta_{l,t,\max}$ 分别为支路 lm 对应的电流平方最大值和最小值。

电压分接头约束、光伏逆变器出力约束和静止无功发生器(static var generator, SVG)出力约束满足

$$U_{\min}^{\text{Tra}} \leq U_N^{\text{Tra}} \leq U_{\max}^{\text{Tra}} \quad (16)$$

$$|Q_{l,t}^{\text{PV}}| \leq \sqrt{(S_{l,t}^{\text{PV}})^2 - (P_{l,t}^{\text{PV}})^2} \quad (17)$$

$$Q_{l,\min}^{\text{SVG}} \leq Q_{l,t}^{\text{SVG}} \leq Q_{l,\max}^{\text{SVG}} \quad (18)$$

式中: U_N^{Tra} 为变压器的额定电压, $U_{\max}^{\text{Tra}}$ 和 $U_{\min}^{\text{Tra}}$ 分别为变压器分接头电压的上下限; $Q_{l,t}^{\text{PV}}$ 为光伏逆变器的无功出力; $S_{l,t}^{\text{PV}}$ 为光伏逆变器额定容量; $P_{l,t}^{\text{PV}}$ 为光伏逆变器的有功出力; $Q_{l,t}^{\text{SVG}}$ 为 SVG 在节点 l 处无功出力; $Q_{l,\max}^{\text{SVG}}$ 、 $Q_{l,\min}^{\text{SVG}}$ 分别为 SVG 设备无功出力的上下限。

3 调容变压器配置评估方法

3.1 关键因素分析

文中选取规划周期、净负荷特性以及容量裕量作为调容变压器配置评估的核心因素,如图3所示。

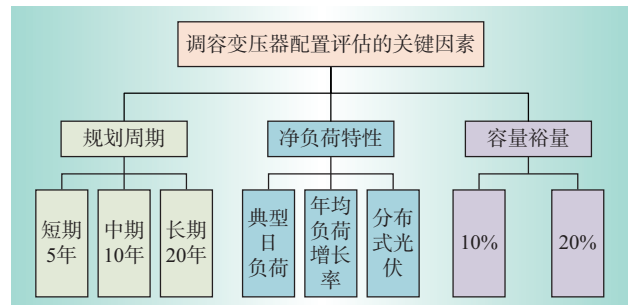


图3 调容变压器配置评估的关键因素

Fig. 3 Key factors in the configuration evaluation of adjustable capacity transformer

(1) 规划周期

规划周期 T 是变压器配置的时间尺度,文中分别选取20年、10年和5年作为长期、中期和短期规划尺度。

(2) 净负荷特性

文中选取台区用户的历史典型日负荷数据 $S_{k,t}^0$ 作为基础数据,其中 $k=1,2,3,\dots,n$, n 为一年内典型日类别的数量, t 为数据点对应的时刻,按照每15分钟的采集频率,则典型日内 $t=1,2,3,\dots,96$ 。规划周期内第 y 年的用户典型日负荷数据 $S_{k,t}^y$, $y=1,2,3,\dots,T$, 计算式为

$$S_{k,t}^y = S_{k,t}^0 (1+r)^y \quad (19)$$

在此基础上,文中引入了台区运行控制模型,求解净负荷数据,具体包括:不含PV场景下的净负荷数据 $S_{\text{net},k,t}^y$ 、含PV场景的晴天典型日净负荷数据 $S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}$ 和非晴天典型日净负荷数据 $S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}$ 。

(3) 容量裕量

容量裕量 δ 是衡量变压器容量冗余度的指标,文中按照年最大负荷的10%和20%分别设定容量裕量,即 $\delta \in \{10\%, 20\%\}$ 。待选变压器容量应满足

$$\begin{cases} S_N \geq (1+\delta)(1+r)^T S_{\max}^0 \\ S_{NH} \geq (1+\delta)(1+r)^T S_{\max}^0 \end{cases} \quad (20)$$

3.2 经济性评估指标

(1) 不含PV场景

根据式(5),在不含PV场景下,第 y 年的调容变压器的损耗电能 $\Delta W_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^y, D_k)$ 和传统变压器的损耗电能 $\Delta W_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^y, D_k)$ 分别为

$$\Delta W_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^y, D_k) = 0.25 \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} [\Delta P_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^y) D_k] \quad (21)$$

$$\Delta W_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^y, D_k) = 0.25 \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} [\Delta P_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^y) D_k] \quad (22)$$

式中: D_k 为各类典型日对应的天数。

(2) 含PV场景

在含PV场景下,第 y 年的调容变压器的损耗电能 $\Delta W_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}, S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}, D_{\text{pvc},k}, D_{\text{pvd},k})$ 和传统变压器的损耗电能 $\Delta W_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}, S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}, D_{\text{pvc},k}, D_{\text{pvd},k})$ 分别为

$$\Delta W_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}, S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}, D_{\text{pvc},k}, D_{\text{pvd},k}) = 0.25 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} \Delta P_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}) D_{\text{pvc},k} + \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} \Delta P_{\text{adj}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}) D_{\text{pvd},k} \right] \quad (23)$$

$$\Delta W_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}, S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}, D_{\text{pvc},k}, D_{\text{pvd},k}) = 0.25 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} \Delta P_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvc},y}) D_{\text{pvc},k} + \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^{96} \Delta P_{\text{ord}}(S_{\text{net},k,t}^{\text{pvd},y}) D_{\text{pvd},k} \right] \quad (24)$$

式中: $D_{\text{pvc},k}$ 和 $D_{\text{pvd},k}$ 分别为各类典型日对应的晴天数和非晴天数。

基于损耗电能,文中提出规划周期下调容变压器配置的综合成本评估指标为

$$C = C_w + \sum_{y=1}^T \Delta W \cdot e + \lambda C_{\text{CO}_2} \sum_{y=1}^T \Delta W \quad (25)$$

式中: C_w 为变压器设备采购成本; ΔW 为损耗电能; e 为电价; λ 为电网碳排放因子; C_{CO_2} 为碳交易价格。其中,在规划周期内实际发生的成本投入维度下, C_w 为实际采购成本;在寿命周期价值分摊消耗维度下, C_w 基于实际采购成本按照平均年限折旧法折算。

3.3 调容变压器配置评估流程

进一步地,文中给出调容变压器配置评估的具体实施流程,主要包括以下6步。

(1) 数据采集:获取配电台区的历史数据,主要包括典型日负荷 $S_{k,t}^0$ 、年最大负荷 $S_{\max}^0$ 、各类典型日对应的天数 D_k 、晴天日天数 $D_{\text{pvc},k}$ 和非晴天日天数 $D_{\text{pvd},k}$ 。

(2) 待选变压器的容量配置:根据规划周期和容量裕量 δ 计算待选变压器的容量配置。

(3) 典型日负荷计算:基于规划周期 T 和年均负荷增长率 r ,依据式(19)推算规划周期内各年的典型日负荷数据 $S_{k,t}^y$ 。

(4) 净负荷求解:通过MATLAB建立配电台区运行控制模型,并采用求解器得到净负荷数据。

(5) 综合成本评估指标计算:建立如式(5)一式(6)的损耗模型并按式(21)一式(24)计算损耗电能,进一步计算综合成本评估指标。

(6) 配置方案确定:对比调容变压器与传统变压器的综合成本指标表现,进而确定配置方案。

4 算例分析

文中选取某农业台区和居民台区作为研究对象,基于规划周期内实际发生的成本投入维度下开展详细的算例分析,并依据相同配置评估流程给出了寿命周期价值分摊消耗维度下的配置结果。

4.1 农业台区

4.1.1 农业台区负荷情况分析

如图4所示为该农业台区在夏季与非夏季典型日下的净负荷变化曲线。夏季农业生产活动强度显著增加,导致台区整体用电水平较非夏季明显上升,充分体现出季节因素对农业用电特性的显著影响。

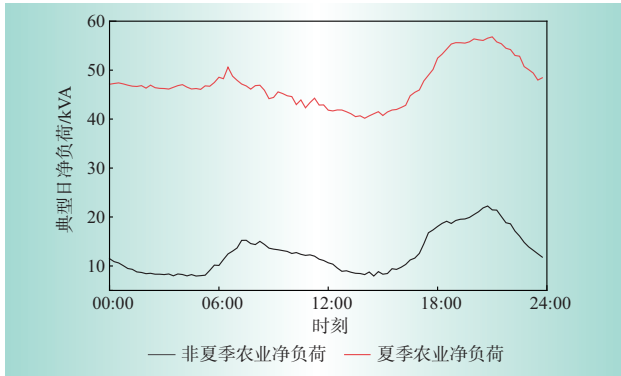


图4 农业台区典型日净负荷

Fig. 4 Typical daily net load of agricultural transformer area

鉴于该地区农业用电负荷整体稳定,文中在该农业台区场景假设负荷增长率为0。根据标准GB/T 6451—2023《油浸式电力变压器技术参数》、JB/T 10778—2020《三相油浸式调容变压器》和DL/T 1853—2024《10kV有载调容调压变压器技术导则》整理得出农业台区待选变压器的主要技术参数与采购成本,如表1所示。

表1 农业台区待选变压器技术参数及采购成本

Table 1 Technical parameters and procurement costs of candidate transformers in agricultural transformer area

容量/ kVA	空载损 耗/kW	负载损 耗/kW	空载电 流/%	短路阻 抗/%	实际采购 成本/万元
100	0.170 (0.060)	1.89 (0.630)	1.1 (0.6)	4	3.1
100 (30)	0.200 (0.070)	2.31 (0.770)	1.0 (0.5)	4	5.0
100 (25)	0.240 (0.080)	2.73 (0.910)	1.0 (0.5)	4	4.5

4.1.2 农业台区待选变压器损耗分析

基于农业台区负荷情况,待选变压器在夏季与非夏季典型日的日内损耗变化趋势,如图5所示。分析图5可得,在夏季,由于调容变压器运行在大容

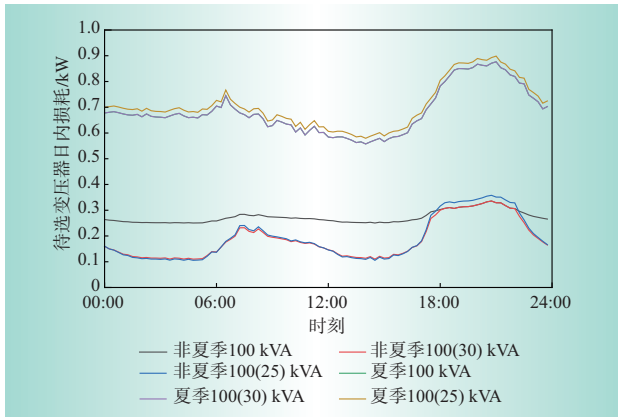


图5 农业台区待选变压器日内损耗

Fig. 5 Daily losses of candidate transformers in agricultural transformer area

量100 kVA模式下,因此其损耗与传统变压器相近。非夏季时,100(30) kVA和100(25) kVA调容变压器在大部分时间段内处于小容量运行状态,损耗显著低于100 kVA传统变压器。仅在夜间18:00~22:00时段,因负荷显著上升,调容变压器在此时段切换至大容量模式。

4.1.3 农业台区配置评估分析

基于表1的采购成本,结合式(24)所构建的综合成本评估指标,计算得到待选变压器在不同规划周期下的评估结果,如图6所示。

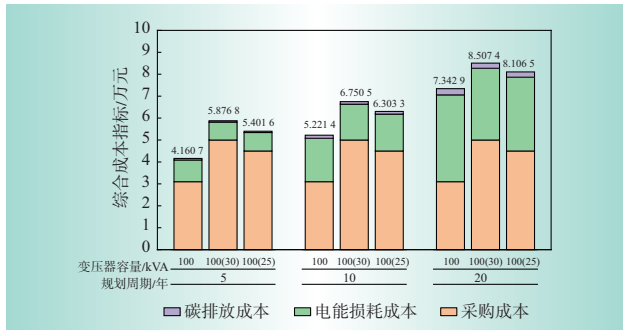


图6 农业台区待选变压器综合成本指标

Fig. 6 Comprehensive cost index of candidate transformers in agricultural transformer area

分析图6可得,由于该台区整体负荷水平较小,调容变压器所带来的节能收益难以弥补其相较于传统变压器更高的采购成本,导致其在经济性方面不具优势。因此,在该农业台区中,3种规划周期下选择100 kVA的传统变压器更具效益。

基于相同配置评估流程,在寿命周期价值分摊消耗维度下得到表2所示的综合成本指标。

表2 农业台区考虑寿命周期价值分摊消耗的待选变压器综合成本指标

Table 2 Comprehensive cost index of candidate transformer considering life cycle value allocation consumption in agricultural transformer area

容量/kVA	规划周期下的综合成本/万元		
	5年	10年	20年
100	1.835 7	3.671 5	7.342 9
100(30)	2.126 9	4.250 5	8.507 4
100(25)	2.026 6	4.053 3	8.106 5

由表2可得,该农业台区按照寿命周期价值分摊消耗维度下100 kVA的传统变压器依然更具经济效益。

4.2 居民台区

4.2.1 居民台区负荷情况分析

图7所示为该居民台区在春秋季节、夏季和冬季典型日的净负荷情况。该台区春秋季节相比于夏季,用电负荷水平较低,而夏季和冬季时,居民对制冷、制暖设备的用电需求增大,其典型日峰值负荷

进一步上升至193.82 kVA。

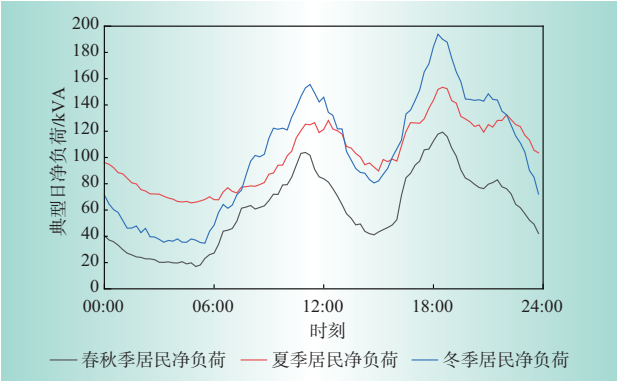


图7 居民台区典型日净负荷
Fig. 7 Typical daily net load of residential transformer area

考虑居民负荷的年均增长率约为2%，采用式(20)确定变压器配置容量，并分别按照10%与20%的裕量选择容量。

在10%裕量的条件下，5年期与10年期的待选变压器为：315 kVA的传统变压器，315(100) kVA的3:1调容变压器，315(80) kVA的4:1调容变压器。20年期的待选变压器为：400 kVA的传统变压器，400(125) kVA的3:1调容变压器，400(100) kVA的4:1调容变压器。

在20%裕量的条件下，5年期待选变压器与10%裕量一致；10年期选择400 kVA的传统变压器、400(125) kVA的3:1调容变压器和容量为400(100) kVA的4:1调容变压器为待选变压器；20年期选择500 kVA的传统变压器、500(160) kVA的3:1调容变压器和容量为500(125) kVA的4:1调容变压器为待选变压器。表3汇总了待选变压器的技术参数，并给出对应的采购成本。

表3 居民台区待选变压器技术参数及采购成本					
Table 3 Technical parameters and procurement costs of candidate transformers in residential transformer area					
容量/ kVA	空载损 耗/kW	负载损 耗/kW	空载电 流/%	短路阻 抗/%	实际采购 成本/万元
315	0.425	4.10	0.72	4.0	6.50
315 (100)	0.340 (0.115)	3.83 (1.28)	0.72 (0.40)	4.0	8.00
315 (80)	0.340 (0.085)	3.83 (0.96)	0.90 (0.50)	4.0	7.00
400	0.510	4.95	0.64	4.0	7.80
400 (125)	0.410 (0.140)	4.52 (1.51)	0.64 (0.32)	4.0	8.50
400 (100)	0.410 (0.105)	4.52 (1.13)	0.80 (0.40)	4.0	8.00
500	0.610	5.89	0.64	4.0	8.50
500 (160)	0.480 (0.160)	5.41 (1.81)	0.64 (0.32)	4.0	9.15
500 (125)	0.480 (0.120)	5.41 (1.36)	0.80 (0.40)	4.0	8.60

4.2.2 居民台区待选变压器损耗分析

文中采用21节点拓扑图进行仿真，如图8所示^[17]。在节点10、15和17处配置有SVG设备。虑及PV出力不确定性，文中将其转化为确定性典型PV出力场景，具体曲线如图9所示。

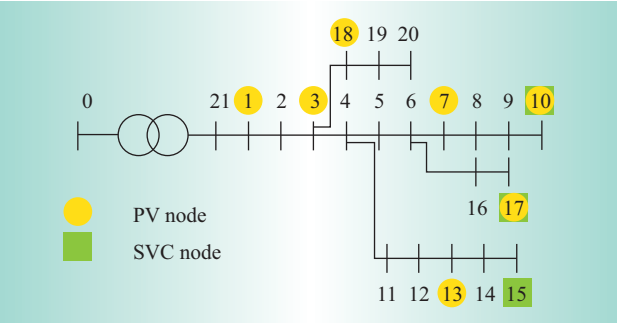


图8 台区节点拓扑
Fig. 8 Node topology of transformer area

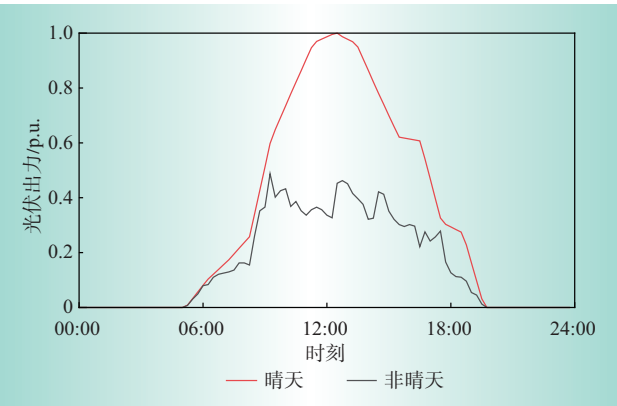


图9 典型PV出力曲线
Fig. 9 Typical output curves of PV power

(1) 不含PV场景

如图10所示，以5年期的待选变压器为例，选取第1年春秋季典型日分析损耗变化。春秋季典型日的00:00—7:00时段和13:00—16:00时段，调容变压器处于小容量模式，从而有效降低了空载损耗。

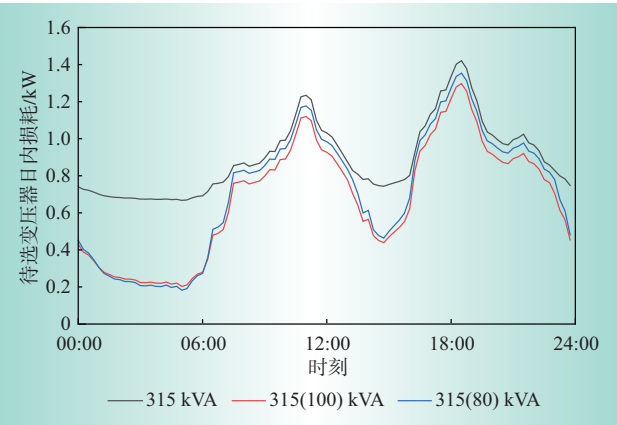


图10 居民台区待选变压器日内损耗
Fig. 10 Daily losses of candidate transformers in residential transformer area

(2) 含PV场景

以第1年春秋季节典型日为例,对比分析变压器日内损耗进行,如图11所示。PV出力时段内,含PV场景下的待选变压器损耗均呈现下降趋势,尤其在12:00—16:00时段,调容变压器的节能效果较不含PV场景更为显著。

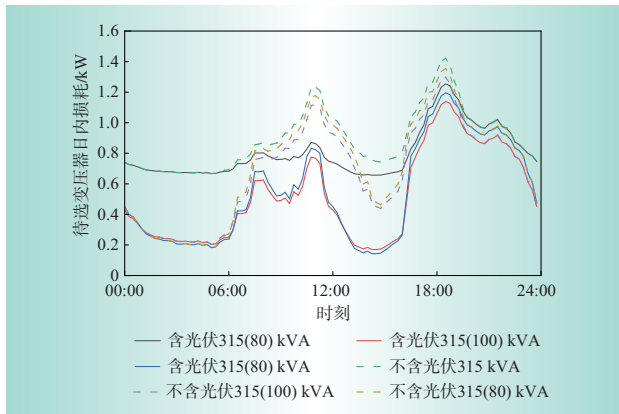


图11 春秋季晴天待选变压器日内损耗对比

Fig. 11 Daily loss comparison for candidate transformers on sunny days in spring and autumn

4.2.3 居民台区配置评估分析

(1) 不含PV场景

待选变压器在不同规划周期下的综合成本指标如图12和图13所示。

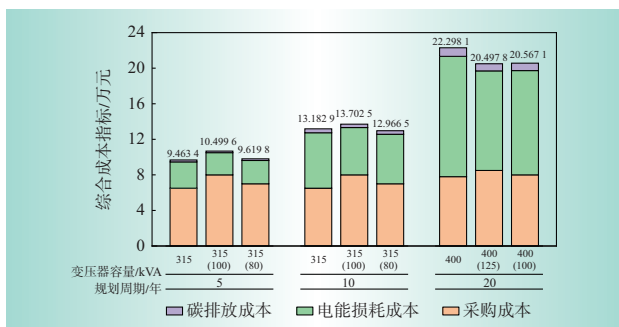


图12 10%裕量的待选变压器综合成本指标

Fig. 12 Comprehensive cost index of candidate transformers with 10% capacity margin

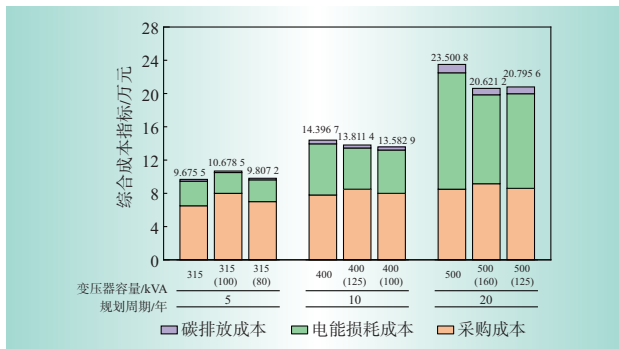


图13 20%裕量的待选变压器综合成本指标

Fig. 13 Comprehensive cost index of candidate transformers with 20% capacity margin

分析图12可得,不含PV场景,裕量10%时,315 kVA传统变压器更适用于5年期规划。10年期下,315(80) kVA调容变压器综合成本最优。20年期下,400(125) kVA调容变压器的节能优势进一步显现,综合成本优于400(100) kVA的调容方案,成为最优选择。

分析图13可得,不含PV场景,裕量20%时,5年期下315 kVA传统变压器综合成本最低;10年期,400(100) kVA调容变压器综合成本最低;20年期,500(160) kVA调容变压器综合成本最低。

综合图12和图13,该居民台区不含PV场景下按照规划周期内实际发生的经济投入成本的维度,短期宜采用传统变压器,中期适合配置4:1调容变压器,长期则更适合3:1调容变压器。

在相同配置评估流程下,按照设备寿命周期价值分摊消耗维度,5年期和裕量为10%的10年期更适合选择4:1调容变压器,而裕量为20%的10年期和20年期更适合选择3:1调容变压器。

(2) 含PV场景

PV为40~70 kW的场景下,10年期的综合成本指标评估选择与不含PV场景一致,依旧选择4:1的调容变压器;20年期下裕量为20%时,500(160) kVA的调容变压器类型依旧保持经济优势。进一步地,文中给出5年期及10年期,裕量为10%的待选变压器的综合成本指标情况,如图14和图15所示。

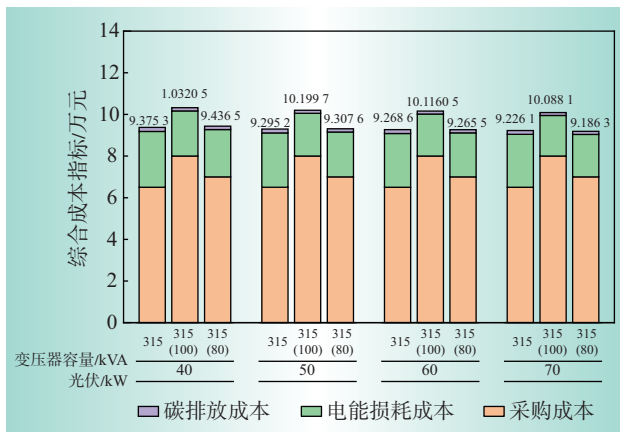


图14 5年期的待选变压器综合成本指标

Fig. 14 Comprehensive cost index of candidate transformers in 5-year planning period

分析图14可得,在5年期规划下,当台区PV为40 kW或50 kW时,315 kVA传统变压器的综合成本指标最低;然而,当PV增至60 kW时,由于PV出力较大的时段,315(80) kVA的调容变压器凭借其节能优势,弥补了与传统变压器的成本差额,因此其综合成本评估指标最低。

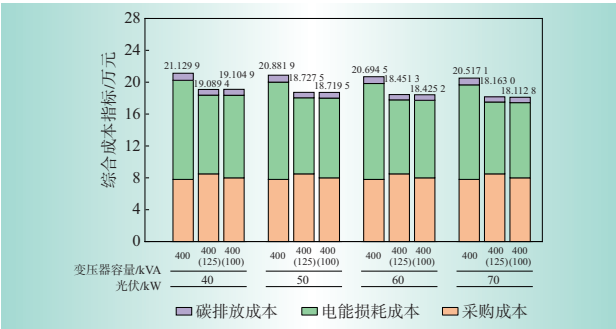


图 15 10年期裕量 10%的待选变压器综合成本指标

Fig. 15 Comprehensive cost index of candidate transformers with 10% capacity margin in 10-year planning period

分析图 15 可得,20 年期,裕量为 10%时,在 PV 为 40 kW 时,400(125) kVA 的调容变压器的综合成本评估指标最低;当 PV 超过 50 kW 时,PV 接入会降低台区负荷,导致 400(125) kVA 调容变压器的节能效益优势减少,无法弥补与 400(100) kVA 变压器之间的固定采购成本差异,因此其综合成本指标最低的选择转为 400(100) kVA 调容变压器。

基于对综合成本评估指标对比验证后,归纳得到规划周期内实际发生的成本投入维度下,对应的 3 种时间尺度下的配置方案,如表 4 所示。

表 4 居民台区考虑实际成本投入的配置方案
Table 4 Configuration scheme of residential transformer area considering actual cost input

规划周期/年	PV 最大出力/kW	容量裕量/%	配置方案
5	0~60	10	315 kVA 传统变压器
		20	
	60~70	10	315(80) kVA 调容变压器
		20	
10	0~70	10	315(80) kVA 调容变压器
		20	400(100) kVA 调容变压器
20	0~50	10	400(125) kVA 调容变压器
		20	400(100) kVA 调容变压器
	50~70	10	400(100) kVA 调容变压器
		20	500(160) kVA 调容变压器

基于相同配置流程,文中给出了寿命周期价值分摊消耗维度下的配置结果,如表 5 所示。

表 5 居民台区考虑寿命周期价值分摊消耗的配置方案
Table 5 Configuration scheme of residential transformer area considering life cycle value allocation consumption

规划周期/年	PV 最大出力/kW	容量裕量/%	配置方案
5	0~70	10	315(80) kVA 调容变压器
		20	
10	0~70	10	315(80) kVA 调容变压器
		20	400(125) kVA 调容变压器
20	0~50	10	400(125) kVA 调容变压器
		20	400(100) kVA 调容变压器
	50~70	10	400(100) kVA 调容变压器
		20	500(160) kVA 调容变压器

分析表 4 和表 5 可得,所提的关键因素在两种维度下均会影响调容变压器的配置评估及方案,验证了本文方法中所提关键因素的有效性。

综上,文中提出的调容变压器配置评估方法经台区运行控制模型得到净负荷数据,并构建了综合成本评估指标,在多维关键因素下,通过将调容变压器与传统变压器对比分析形成适配台区的配置方案,有效降低了综合运行成本,减少了冗余投资,证明了所提方案合理有效。

5 结束语

文中针对当前调容配电变压器配置方法体系不完善、考虑因素单一等问题,提出了一种调容变压器配置评估方法。主要结论如下:

- (1) 构建台区运行控制模型和面向经济性的综合成本评估指标,用于提供数据支撑和量化不同配置方案的经济性,为台区配置决策提供依据。
- (2) 提出并验证了调容变压器配置的关键影响因素,实验结果证实了这些因素对配置方案具有实际影响,减少了关键因素不全而导致的不合理选型。
- (3) 结合农业台区和居民台区的差异化用电特征和实际关键因素,对两种台区下调容变压器配置开展评估分析对比并给出配置方案,并分析验证了所提方法在不同台区的可行性。

值得说明的是,文中所提方法具有良好拓展性,后续可结合实际对光伏接入及台区控制模型进行优化调整,以获得更贴近工程实际的净负荷数据进一步提高调容变压器配置评估方案的准确性。

参考文献:

[1] 屈博,刘畅,李德智,等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):1-3,9.
QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the development strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral”[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 1-3, 9.

[2] 舒印彪,张正陵,汤涌,等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报,2024,44(21):8 327-8 341.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8 327-8 341.

[3] 周伏秋,王娟,赵晓东,等. 创新优化电力需求响应,支撑新型电力系统建设[J]. 电力需求侧管理,2023,25(1):1-4.
ZHOU Fuqiu, WANG Juan, ZHAO Xiaodong, et al. Inno-

- vate and optimize power demand response to support the construction of new power system [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(1): 1-4.
- [4] 张芳,毛学魁. 户用光伏接入对配电网电压影响及优化研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(6): 811-816.
ZHANG Fang, MAO Xuekui. Influence and optimization of household photovoltaic on distribution network voltage [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(6): 811-816.
- [5] JAFARABADI B R, MOUSAVI S M S. Peak load shaving of air conditioning loads via rooftop grid-connected photovoltaic systems: a case study [J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5 640-5 640.
- [6] 郭莹霏,池源,王强钢,等. 面向多元负荷和优质供电的虚拟增容配电变压器:概念、应用与展望[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21): 6 666-6 686, 6 803.
GUO Yingfei, CHI Yuan, WANG Qianggang, et al. Virtual capacity-enhanced distribution transformer for diverse loads and quality power supply: concepts, applications, and prospects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6 666-6 686, 6 803.
- [7] 国家发展和改革委员会. 关于实施农村电网巩固提升工程的指导意见[EB/OL]. (2023-07-04) [2025-06-04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891875.htm.
National Development and Reform Commission. Guiding opinions on implementing the consolidation and upgrading project of rural power grids[EB/OL]. National Development and Reform Commission. (2023- 07- 04) [2025-06-04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891875.htm.
- [8] ZHAO L L, WANG H M, YUAN D C. Research on capacity regulating transformer system based on computer artificial intelligence load forecasting technology [C]//2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), 18-20 November, 2022, Shenyang, China: 652-656.
- [9] WANG J L, ZHANG T M, LI Y S, et al. Evaluation method of energy efficiency of on-load capacity regulating distribution transformers [C]//2023 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET), 28-30 December, 2023, Shanghai, China: 217-221.
- [10] LI J C, CAO R, HAO W B, et al. Loss reduction control strategy of on-load capacity-adjusting transformer based on load forecast [C]//2021 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS), 10-11 December, 2021, Shenyang, China: 197-201.
- [11] 张天明,王金丽,李运硕,等. 基于有载调容变压器和动态增容的光伏台区反向过载治理研究[J/OL]. 电力信息与通信技术, 1-12 [2025-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1164.TK.20250512.1747.002.html>.
ZHANG Tianming, WANG Jinli, LI Yunshuo, et al. Research on reverse overload control of PV station area based on-load capacity regulating transformer and dynamic capacity enhancements [J/OL]. Electric Power Information and Communication Technology, 1-12 [2025-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1164.TK.20250512.1747.002.html>.
- [12] 苏宇,王强钢,雷超,等. 电能替代下的城市配电网有载调容配电变压器规划方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1 496-1 504.
SU Yu, WANG Qianggang, LEI Chao, et al. A planning method of on-load capacity regulating distribution transformers in urban distribution network after electric energy substitution [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1 496-1 504.
- [13] HAO S Q, CAI Y X, WANG Z Y, et al. Optimal configuration of adjustable capacity transformers considering OPF distribution [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2 896(1): 012 005-012 005.
- [14] 刘海英,韩鹏程,张瑜. 电力供给清洁化和能源消费电气化的耦合协调度及其对碳减排影响[J]. 生态经济, 2025, 41(3): 33-42.
LIU Haiying, HAN Pengcheng, ZHANG Yu. The coupling coordination degree of clean power supply and electrification of energy consumption and its impact on carbon emission reduction [J]. Ecological Economy, 2025, 41(3): 33-42.
- [15] 张益兵,朱朝勇,武美辰,等. 基于全生命周期评价的变压器碳足迹研究与分析[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 57-67.
ZHANG Yibing, ZHU Chaoyong, WU Meichen, et al. Research and analysis of carbon footprint of transformer based on full life cycle assessment [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 57-67.
- [16] 尹力,盛俊杰,杨帆,等. 基于MDE-PPO算法的配电网多时间尺度无功优化[J]. 电气自动化, 2025, 47(1): 79-81, 85.
YIN Li, SHENG Junjie, YANG Fan, et al. Multi time scale reactive power optimization of distribution network based on the MDE-PPO algorithm [J]. Electrical Automation, 2025, 47(1): 79-81, 85.
- [17] 蔡永翔,唐巍,张博,等. 含高比例户用光伏低压配电网集中-就地两阶段电压-无功控制[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1 271-1 280.
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. A two-stage volt-var control in LV distribution networks with high proportion of residential PVs [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1 271-1 280.

作者简介:

陆旦宏(1978),男,江苏靖江人,博士,教授,研究方向为新能源与智能电网;

李艳(1999),女,江苏如皋人,研究方向为调容变压器在智能配电网中的应用;

杨婷(1986),女,通信作者,四川苍溪人,研究方向为机器学习在智能电网中的应用。

(责任编辑 安然)