

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313044

# 协调电容器灵活度和复杂度矛盾的 变电站无功优化配置\*

赵吉祥 宋新新 潘志远 王璐璐 李壮壮

(国家电网有限公司技术学院分公司 济南 250000)

**摘要:** 不等容分组电容器投切灵活度高,无功调节能力优,但存在控制策略复杂,设备频繁投切的问题,因此提出一种协调二者矛盾的无功优化配置方法。首先根据变电站负荷求取变电站无功需求概率分布曲线,再采用最优覆盖法计算分布曲线和电容器补偿容量梯形曲线交叉形成的无功失配面积,面积越小,电容器调节灵活度往往越好。然后考虑调控复杂度指标,建立以失配面积最小和调控复杂度最小为目标函数的电容器不等容分组优化模型。再采用模糊加权法将多目标转化为单目标优化模型,利用改进遗传算法求解,得到变电站无功配置方案,为无功规划人员提供决策依据。最后案例仿真通过与现有文献等容分组法和不等容分组法进行对比,验证了本文所提方法能够兼顾不等容分组的优缺点。

**关键词:** 无功优化配置;电容器;不等容分组;灵活度;复杂度

**中图分类号:** TM715   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 470.4054

## Optimal configuration of reactive power in substations by coordinating the contradiction between capacitors flexibility and complexity

Zhao Jixiang Song Xinxin Pan Zhiyuan Wang Lulu Li Zhuangzhuang

(State Grid of China Technology College, Jinan 250000, China)

**Abstract:** Unequal capacitance grouped capacitors have high switching flexibility and excellent reactive power regulation ability, but there are problems with complex control strategies and frequent switching of equipment. Therefore, this article proposes a reactive power optimization configuration method that coordinates the contradiction between the two. Firstly, the probability distribution curve of reactive power demand in the substation is obtained according to the substation load, and then the optimal coverage method is used to calculate the reactive power mismatch area formed by the intersection of the distribution curve and the trapezoidal curve of capacitor compensation capacity. The smaller the area, the better the flexibility of capacitor regulation. Then considering the regulation complexity index, an optimization model of unequal capacitance grouping of capacitor is established with the minimum mismatch area and regulation complexity as the objective function. The multi-objective optimization model is transformed into a single-objective optimization model by the fuzzy weighting method. The improved genetic algorithm is used to solve the problem, and the reactive power configuration scheme of the substation is obtained, which can provide decision-making basis for reactive power planners. The final case simulation verifies that the proposed method in this paper can balance the advantages and disadvantages of unequal capacity grouping by comparing it with existing literature on equal capacity grouping and unequal capacity grouping.

**Keywords:** reactive power optimization configuration; capacitors; unequal capacity grouping; flexibility; complexity

## 0 引言

电力电容器是保证电力系统安全可靠经济运行的重要

无功补偿设备,因其具有造价低、设备运行维护方便等优点而在变电站无功优化配置中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。在采用电容器进行无功优化规划时,需要计算其最优无功补偿容量

收稿日期:2023-03-09

\* 基金项目:国网公司科技项目(5108202040036A0000)资助

并进行优化分组<sup>[2]</sup>。电容器分组包括等容和不等容两种方式,其中,不等容分组通常有等差、等比等方式<sup>[3]</sup>。从规划角度来看,不等容分组虽然能够在不显著增加投资成本的前提下提供更为灵活的无功调节方式,而等容分组则往往需要通过增加组数来提高条件能力,但是在电力系统实际运行时,不等容分组方式控制策略复杂,设备投切频繁,运行维护成本高,尤其是最小单组容量电容器容易发生故障。因而,实际变电站无功配置时,由于等容分组方式简单易行,往往应用更为广泛。但是,随着能源互联网、主动配电网、“源网荷储”等概念的提出,新能源、电动汽车等大量接入,源、荷波动性增大,对无功调节灵活性提出了更高要求,电容器不等容配置或是其中一种解决方式<sup>[4-6]</sup>。

当前文献对电容器分组问题进行了诸多研究。文献[7]提出一种基于最优覆盖法的变电站无功配置方法,通过经验确定分组数,采用电容器组和静止无功补偿器在无功负荷概率分布曲线上的最优覆盖建立无功优化规划模型。文献[8]构建超调律指标,分别给出了在负荷波动大情况下,与静止同步补偿器相配合的电容器等容和不等容分组方法,但是具体何种负荷适合何种方法有待进一步研究。文献[9-10]利用变电站典型日无功需求曲线,提出一种基于曲线分段—聚类法电容器不等容分组方法,具有良好的调压性能,但其未考虑电容器投切次数问题。文献[11]提出一种基于变电站无功补偿约束区间的电容配置方法,建立电容器分组最少和投切次数最少的无功优化模型,但其求解精度难以得到有效保证。文献[12]提出一种基于“准无级”调节的变电站无功规划方法,分析了给定分组电容器的调压性能,但其优化模型尚需完善。文献[13]提出一种以无功损耗费用和投资成本为目标函数的无功配置模型,但其各项指标合理性有待进一步商榷。本可以看到,如何充分发挥不等容分组无功调节能力优势并避免其设备投切频率劣势,当前尚无一套行之有效的方案。

因此,针对上述问题,本文提出一种协调电容器灵活度和复杂度矛盾的变电站无功优化配置方法,将电容器在无功需求概率曲线上的交叉面积作为灵活度指标,并设立复杂度指标,再构建无功失配面积最小和调控复杂度指标最小的多目标函数的无功优化模型,采用遗传算法求解。最后通过仿真案例与现有文献等容分组法和不等容分组法对比分析,结果显示本文所提方法在调控复杂度、无功调节能力和投切次数等方面综合性能较优,表明本文所提方法能够在保证电容器组无功调节能力的同时,避免设备频繁投切。

## 1 最优覆盖法

### 1.1 变电站无功需求

文献[9]指出,变电站无功配置应包括无功负荷和变压器无功损耗两个方面,以保证电网满足无功平衡。

#### 1) 无功负荷

无功负荷  $Q_L$  指变电站负荷侧无功功率,与负荷侧有

功率  $P_L$  和负荷侧功率因数  $\cos\varphi_L$  有关。计算公式如下:

$$Q_L = \frac{P_L}{\cos\varphi_L} \sqrt{1 - \cos^2\varphi_L} \quad (1)$$

#### 2) 变压器无功损耗

变压器无功损耗  $\Delta Q_{LT}$  表示变压器所吸收的无功功率。假定无功负荷就地完全补偿,近似系统电压为变压器额定电压,则  $\Delta Q_{LT}$  与变压器空载无功损耗  $\Delta Q_0$ 、变压器负荷侧有功功率  $P_L$ 、变压器额定电压  $V_N$  和变压器短路阻抗  $X_T$  有关。计算公式如下:

$$\Delta Q_{LT} = \Delta Q_0 + \left(\frac{P_L}{V_N}\right)^2 X_T \quad (2)$$

#### 3) 变电站无功需求

变电站无功需求  $Q_B$  表示变电站所应补偿的无功容量。计算公式如下:

$$Q_B = Q_L + \Delta Q_{LT} \quad (3)$$

## 1.2 无功需求概率分布曲线

无功需求概率分布曲线表示在给定的一段时间内,变电站实际所需无功补偿最少容量的概率,反应了变电站多负荷水平下的无功需求情况。

求取分布曲线的具体步骤如下:

1) 获取负荷数据。采集变电站的负荷数据,时间设置为1年,采样间隔设置为15 min,共35 040个采样点,得到变电站年负荷数据矩阵:

$$A = [a_t]_{T \times 1} \quad (4)$$

式中:  $a_t$  表示第  $t$  时间点变电站的负荷数据;  $T=35\ 040$ ,表示所采集的变电站负荷数据点个数。

2) 计算无功需求。利用所获取的负荷数据,根据式(1)~(3)计算得到变电站年无功需求矩阵:

$$B = [b_t]_{T \times 1} \quad (5)$$

式中:  $b_t$  表示第  $t$  时间点变电站的无功需求。

3) 统计无功需求概率。设置步长  $\Delta b$ , 逐渐增大  $Q_b$  (从零到最大无功需求), 统计无功需求  $Q_B$  大于  $Q_b$  的概率。计算公式如下:

$$P(Q_B > Q_b) = \frac{N_b}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $N_b$  表示无功需求  $Q_B$  大于  $Q_b$  的时间点的个数。

4) 绘制分布曲线  $F_Q(Q)$ 。以无功需求为横轴, 概率为纵轴, 得到变电站年无功需求概率分布曲线, 如图1所示。

## 1.3 最优覆盖原理

电容器容量在分布曲线上的最优覆盖如图1所示。图中虚线表示电容器组容量, 电容器不能连续调节, 为阶梯状曲线; 圆点表示电容器投切点; 阴影部分表示无功失配, 由补偿容量曲线和需求分布曲线交叉形成, 包括欠补偿(补偿容量小于需求容量)和过补偿(补偿容量大于需求容量)两部分, 无功失配面积代表了补偿容量与需求容量的失衡度, 面积越小越好。

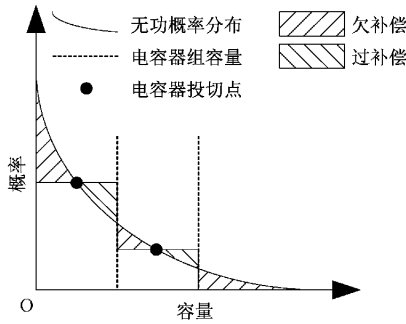


图 1 分布曲线上的最优覆盖

故本文所谓最优覆盖即是计算电容器最优分组,使得无功失配面积最小。

## 2 无功优化配置模型

### 2.1 电容器调节灵活度

文献[7,13]的研究表明,电容器在分布曲线上的失配面积越小,往往设备的补偿效果就越好,灵活度也越高,调节效果与失配面积呈负相关,故本文采用无功失配面积代表电容器调节灵活度。

求取失配面积的具体步骤如下:

1)按照从小到大的顺序排列电容器组的单组容量,得到单组容量矩阵:

$$Q_o = [Q_{oi}]_{N_Q \times 1} \quad (7)$$

$$Q_c = \sum_{i=1}^{N_Q} Q_{oi} \quad (8)$$

式中: $Q_{oi}$  表示第  $i$  组电容器的单组容量; $N_Q$  表示电容器的总组数; $Q_c$  表示电容器的总容量。

2)计算电容器所形成的容量组合,记为档位,按照从小到大的顺序排列,得到档位矩阵:

$$Q_T = [Q_{Tj}]_{N_T \times 1} \quad (9)$$

式中: $Q_{Tj}$  表示电容器的第  $j$  组档位, $Q_{Tj} \in [0, Q_c]$ ;  $N_T$  表示电容器的总档位数,可通过计算容量组合时得到。

3)计算投切点。文献[7]指出,在两相邻档位均值处投切电容器,失配面积最小。电容器投切点( $Q_{Tj}^s, P_{Tj}^s$ )计算公式如下:

$$Q_{Tj}^s = \frac{Q_{Tj-1} + Q_{Tj}}{2} \quad (10)$$

$$P_{Tj}^s = F_Q(Q_{Tj}^s) \quad (11)$$

4)计算失配面积,公式如下:

$$S_Q = \sum_{j=2}^{N_T} \int_{Q_{Tj-1}}^{Q_{Tj}} |F_Q(Q) - P_{Tj}^s| Q_{Tj} dQ + \int_{Q_c}^{max\{B\}} F_Q(Q) dQ \quad (12)$$

式中: $dQ \approx \Delta b$ ,表示绘制分布曲线时的采样步长。

5)灵活度最优的目标函数为

$$\min F_1 = \min S_Q \quad (13)$$

### 2.2 电容器调控复杂度

本文利用文献[12]所给出的电容器分组方案评价指标体系,将其加入本文不等容分组模型,调控复杂度指标包括投资成本效益比、调节档位级数比和单组最大容量比三个方面。

1)投资成本效益比

投资成本效益比  $F_{21}$  表示电容器单位档位投资成本,其数值越小越好,表明以较小的投资获得了较多的档位,调压性能亦越好。计算公式如下:

$$F_{21} = W_c / N_T \quad (14)$$

$$W_c = \omega_N N_Q + \omega_Q Q_c \quad (15)$$

式中: $W_c$  表示电容器投资成本; $\omega_N$  表示电容器组数单价; $\omega_Q$  表示电容器容量单价。

2)调节档位级数比

调节档位级数比  $F_{22}$  表示电容器的控制策略复杂程度,其数值越小越好,表明电容器在有限组数下,提供档位较少,电网实际运行时其控制策略亦越简单。计算公式如下:

$$F_{22} = N_T / N_Q \quad (16)$$

3)单组最大容量比

单组最大容量比  $F_{23}$  表示电容器的可靠性,其数值越小越好,表明最大单组容量电容器占比较小,在最大组故障时,设备能投入无功数值大,满足变电站无功需求概率高。计算公式如下:

$$F_{23} = \frac{\max\{Q_o\}}{Q_c} \quad (17)$$

4)复杂度最优的目标函数为

$$\min F_2 = \{\min F_{21}, \min F_{22}, \min F_{23}\} \quad (18)$$

### 2.3 多目标无功优化模型

由上文分析可知,失配面积和投资成本效益比、调节档位级数比、单组最大容量比均越小越好,建立本文协调电容器灵活度和复杂度的多目标无功优化配置模型。

1)多目标函数

$$\min F_O = \{\min F_1, \min F_2\} \quad (19)$$

2)目标函数模糊化

文献[14]提出一种采用线性隶属函数将目标函数模糊化的处理方法,计算公式如下:

$$g(F_u) = \begin{cases} 1, & F_u \leq F_{u,\min} \\ \frac{F_{u,\max} - F_u}{F_{u,\max} - F_{u,\min}}, & F_{u,\min} < F_u \leq F_{u,\max} \\ 0, & F_u > F_{u,\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $F_{u,\min}$  表示目标函数  $F_u$  的理想值; $F_{u,\max}$  表示目标函数  $F_u$  不能接受的目标值。

3)多目标转化为单目标

模糊化处理,  $g(F_u)$  为单调递减函数,最小化目标函数转化为最大化目标函数,选择合适权重,无功优化模型可表示为:

$$\min F_O = \min \sum_{u=1}^2 \mu_u g(F_u) \quad (21)$$

$$F_2 = \sum_{v=1}^3 \mu_{2v} g(F_{2v}) \quad (22)$$

式中:  $\mu_u$ 、 $\mu_{2v}$  分别表示目标函数  $g(F_u)$ 、的  $g(F_{2v})$  的权重系数。

### 2.4 约束条件

约束条件包括总容量约束、单组容量约束和组数约束。

$$s. t. \begin{cases} Q_C = \sum_{i=1}^{N_Q} Q_{0i} \\ Q_{0i, \min} \leq Q_{0i} \leq Q_{0i, \max} \\ N_{Q, \min} \leq N_Q \leq N_{Q, \max} \end{cases} \quad (23)$$

### 2.5 模型求解

本文采用自适应遗传算法<sup>[15-17]</sup>进行模型求解,自适应遗传算法根据个体的适应度调整交叉率和变异率,并采用精英保留策略将父代优秀个体代替子代较差个体,有效提高了算法的计算速度和收敛性能。

设定优化变量为电容器单组容量  $Q_{0i}$ , 优化变量个数为组数上限  $N_{Q, \max}$ , 本文变电站无功优化配置模型计算步骤如图 2 所示。

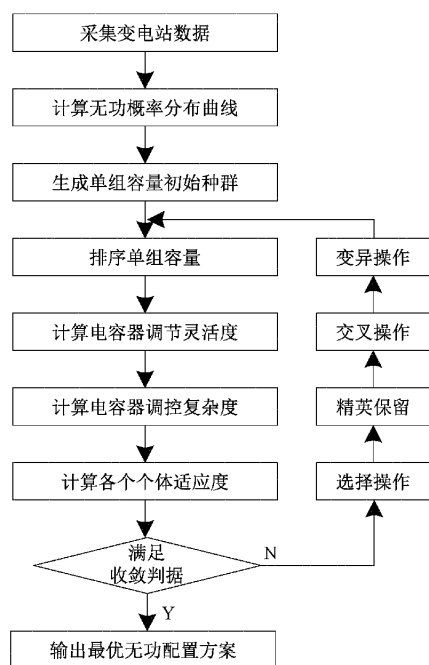


图 2 无功优化计算流程

需要说明的是,每轮子代计算适应度前,均须重新排序单组容量。另外,计算过程中出现某单组容量为零时,即表示无需配置该组电容器。

### 3 案例仿真

取功率基准值  $S_B = 100$  MVA, 某 110 kV 变电站等效电网模型如图 3 所示。经计算得到其典型日无功需求曲线

和无功需求概率分布曲线分别如图 4 和 5 所示。

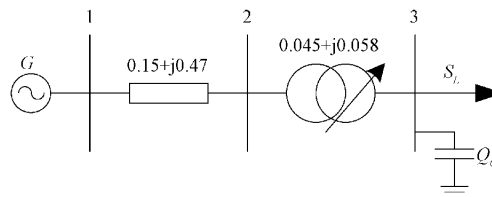


图 3 简化电网模型

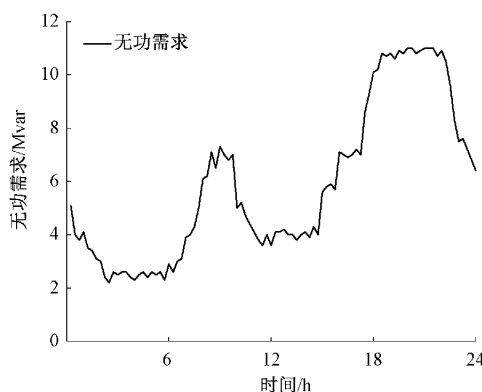


图 4 典型日无功需求曲线

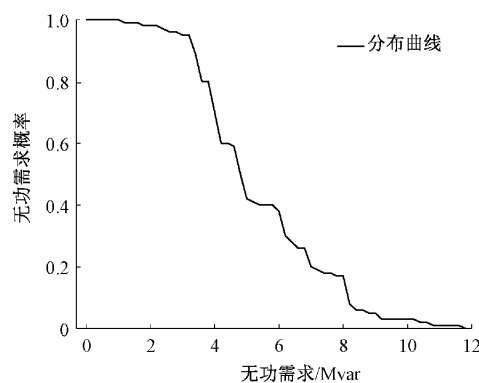


图 5 无功需求概率分布曲线

取电容器组数单价  $w_N = 1$  万元·组<sup>-1</sup>, 容量单价  $w_Q = 2$  万元·Mvar<sup>-1</sup>, 设定组数约束  $N_{\sum} \in [2, 4]$ , 单位为组, 单组容量约束  $Q_{0i} \in [0, 4.5]$ , 单位为 Mvar。分别采用方法 1 (最优覆盖法<sup>[7]</sup>)、方法 2 (分段一聚类法<sup>[9]</sup>)、方法 3 (本文方法) 进行无功优化配置计算, 结果如表 1 所示。

表 1 配置结果对比

方法	总容量/Mvar	各单组容量/Mvar	投资成本/万元
1	10.8	3.6+3.6+3.6	24.6
2	11.0	1.4+2.6+7.0	25.0
3	10.9	2.7+4.1+4.1	24.8

需要说明的是,本文无功优化计算得到电容器最优组数为 3 组, 为方便结果对比, 方法 1、2 亦选 3 组。

对比各方法调控复杂度指标, 如表 2 所示。

表 2 调控复杂度对比

方法	投资成本效益比/ (万元·档 <sup>-1</sup> )	调节档位级数比/ (档·组 <sup>-1</sup> )	单组最大 容量比/%
1	6.150	1.333	33.300
2	3.125	2.667	63.636
3	4.133	2.000	37.615

采用九区图控制策略,在变电站典型日无功需求曲线上研究各方法电容器调节灵活性,结果如图 6 和表 3 所示。

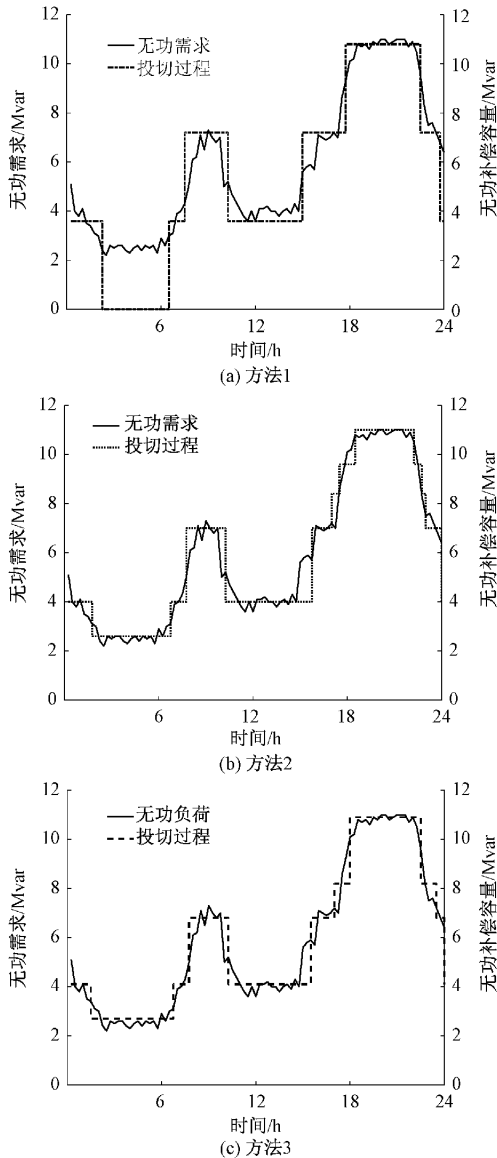


图 6 电容器无功调节效果

需要说明的是,电容器从 4.0 Mvar 投切到 7.0 Mvar,需切除 1.4 Mvar 和 2.6 Mvar 共 2 组电容器,投入 7.0 Mvar 共 1 组电容器,故电容器动作次数记为 3 次,其他情况同理。

根据电容器投切过程,计算各方法在典型日无功需求

曲线上形成的失配面积,结果如表 4 所示。

表 3 电容器投切过程

方法	投切过程/Mvar	总次数/次
1	3.6→0→3.6→7.2→3.6→7.2→10.8 →7.2→3.6	8
2	4.0→2.6→4.0→7.0→4.0→7.0→8.4 →9.6→11.0→9.6→8.4→7.0→4.0	22
3	4.1→2.7→4.1→6.8→4.1→6.8→8.2 →10.9→8.2→6.8→4.1	14

表 4 无功失配面积对比

方法	1	2	3
失配面积/kvar·h	15 366.67	6 233.33	6 433.33

可以看到,在无功配置方案方面,方法 1 为等容分组,方法 2、3 为不等容分组,各方法电容器总容量及投资成本区别不大,但方法 2 明显存在单组容量过大或过小的问题,最大、最小单组容量分别为 7.0 Mvar、1.4 Mvar。

在调控复杂度方面,各方法各有优劣,方法 1 投资效益比最高,但其调节档位级数比和单组容量最大比最低。方法 2 与方法 1 相反。方法 3 各项指标居中。

在无功调节效果方面,方法 2 最优,能够紧随变电站无功需求变化调节电容器容量。方法 1 效果最差,无功失配面积达到了 15 366.67 kvar·h,远超其他方法,甚至出现系统有无功需求,补偿容量却为 0 的情况,这是因为若投入则会引起严重的过补偿。方法 3 调节效果与方法 2 类似,无功失配面积区别很小,电容器无功调节能力基本能够满足变电站无功调节需求。

在电容器投切过程方面,方法 1 总次数最少,仅 8 次。方法 2 设备动作次数最多。方法 3 居中。

由此说明,方法 1 策略简单,但电容器无功调节能力较差;方法 2 能够提供灵活的无功调控方式,但设备动作频繁;方法 3 综合性能更优,避免设备频繁投切的同时,具有良好的无功调节能力。

### 4 结 论

本文提出的一种协调电容器灵活度和复杂度矛盾的变电站无功优化配置方法,兼顾了常规不等容分组法的优缺点。仿真案例表明,本文方法能够较好的完成变电站无功调控任务,具有很好的实用价值。

在变电站无功需求概率分布曲线上进行无功优化计算,考虑了负荷波动性;最优覆盖计算得到的最小无功失配面积保证了设备的灵活性;考虑了电容器调控复杂度指标,能够避免设备运行时频繁投切的问题。但是,进一步的,如何在配置时综合考虑电容器和动态无功补偿装置协调补偿的问题,有待深入研究。

## 参考文献

- [1] 任泓宇,王主丁,张永斌,等. 计及技术标准的高压配网无功优化规划[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1463-1473.
- [2] 刘冰倩,吴涵,黄建业,等. 考虑有功-无功协同优化的风场、光伏电站储能系统容量配置研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 82-89.
- [3] 赵吉祥. 考虑调控复杂度的110 kV变电站无功优化配置研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2020.
- [4] 张国澎,郑钰麒,郑征,等. 含混合储能直流微电网混合势函数建模及稳定性分析[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 38-48.
- [5] XU B, ZHANG G Y, LI K, et al. Publisher correction: Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1).
- [6] 杨海跃,高建宇,王虎,等. 针对台区网损和电压偏差测量的ICOA算法实现[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 33-40.
- [7] 段国泉,戚庆茹,吴军,等. 基于改进最优覆盖法的智能变电站无功优化配置[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 20-25.
- [8] 赵吉祥,李丹,廖攀峰,等. 基于无功超调率指标的变电站无功优化配置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 45-51.
- [9] 曹姗,耿光飞,彭宏. 基于曲线分段-聚类法的变电站并联补偿容量不等分组问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 86-91.
- [10] 季玉琦,耿光飞. 变电站并联补偿容量不等分组方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 90-94.
- [11] 蒋正华,刘俊勇,许立雄,等. 基于无功补偿约束区间的变电站电容器优化分组方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 72-77,89.
- [12] 林广明. 基于“准无级”调节的无功优化规划方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [13] 龙子琦,李丹,赵吉祥,等. 基于改进最优覆盖法的变电站无功补偿不等容分组优化配置[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 4.
- [14] 田浩,王可庆,俞斌,等. 考虑多类型负荷及风光不确定性的配电网优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 144-150.
- [15] 李培英. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(6): 38-44.
- [16] LIN Z C, TIAN Q D, MEI P, et al. Multi-objective collaborative optimal dispatching method for active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2495(1).
- [17] XIA G L, BI Y P, WANG C Y. Optimization design of passive residual heat removal system based on improved genetic algorithm [J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 189.

## 作者简介

赵吉祥, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统无功优化。

E-mail: 1427167261@qq.com

宋新新, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子及电气传动。

E-mail: 81781559@qq.com

潘志远, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程及自动化。

E-mail: z. y. pan@qq.com