

陈顺利, 段凯, 谭元刚. 基于 HPLC 的低压台区三相不平衡优化调整方法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4): 108-112.  
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240415

## 基于 HPLC 的低压台区三相不平衡优化调整方法

陈顺利<sup>1</sup>, 段凯<sup>2</sup>, 谭元刚<sup>2</sup>

(1 重庆广汇供电服务有限责任公司 客户服务分公司, 重庆 401100;

2 国网重庆市电力公司营销服务中心, 重庆 401100)

**摘要:** 针对低压台区三相不平衡的问题, 提出了一种基于 HPLC 的低压台区三相不平衡优化调整方法。该方法首先基于 HPLC 模块构建台区相位拓扑图; 根据获取的变压器侧、各主干线、各支路、各计量点的用电负荷数据, 计算各节点及用户终端三相不平衡度; 最后采用模型预测控制方法, 获取兼顾三相不平衡度和换相操作次数最小化的换相调整策略。试点应用表明, 所提方法能在保证换相操作次数较少的情况下, 实现三相负荷相对平衡, 使试点台区线损率由 3.56% 下降至 2.75%。

**关键词:** HPLC 模块; 台区相位拓扑图; 三相不平衡; 换相策略; 模型预测控制

中图分类号: TM933

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)04-0108-05

### A method for optimal adjustment of three-phase unbalance in low-voltage substation area based on HPLC

CHEN Shunli<sup>1</sup>, DUAN Kai<sup>2</sup>, TAN Yuangang<sup>2</sup>

(1 Customer Service Branch of Chongqing Guanghui Power Supply Service Co., Ltd, Chongqing 401100, China;

2 Marketing Service Center, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401100, China)

**Abstract:** In order to reduce line losses by achieving three-phase load balancing in low-voltage substation area, a method for optimizing and adjusting three-phase imbalances in low-voltage substation area based on HPLC is proposed. In this method, the phase topology map of the substation area is first constructed based on the HPLC module, and then the three-phase unbalance degree of each node and user terminal is calculated according to the obtained power load data of the transformer side, each main line, each branch, and each metering point, and finally the MPC method is used to obtain a commutation adjustment strategy that takes into account the three-phase unbalance degree and the minimization of commutation operation times, and the low-voltage substation area is used to carry out three-phase unbalance adjustment based on this method. The pilot application shows that the proposed method can achieve a relatively balanced three-phase load while ensuring a small number of commutation operations, and the line loss rate in the pilot substation area is reduced from 3.56% to 2.75%.

**Key words:** HPLC module; phase topology map of substation area; three-phase unbalance; commutation strategy; model predict control

## 0 引言

低压配电台区<sup>[1]</sup>与用户的生产生活用电密切相关, 由于低压配电台区大多数是以单相供电<sup>[2]</sup>为主, 所以会存在台区三相负荷不平衡<sup>[3-5]</sup>现象, 而三相不平衡往往导致低压台区线损高, 且对电力系统的供电安全、电能质量和经济运行会产生不良影响<sup>[6]</sup>。当前, 随着居民用电设备多元化, 不同类型用户的用电负荷<sup>[7]</sup>差别逐年增大, 导致低压三相不平衡度呈上升趋势<sup>[8]</sup>。传统计量<sup>[9-10]</sup>环境下, 只能

通过单元楼总表计量的分时段用电量来考察单元三相进线间的负荷平衡度, 降损效果有限。利用高速电力线载波通信 (High-speed Power Line Carrier Communication, HPLC) 技术可以识别低压台区电能表相位信息, 且用电数据采集频率可按秒、分钟、小时、日等灵活调整, 适应不同用户的数据采集需求, 有助于开展配网三相不平衡及线损分相治理<sup>[11]</sup>水平, 对提高供电可靠性具有重要意义。

当前, 部分研究机构及专家已经开展了大量相关的研究工作。如: 张辰琪等<sup>[12]</sup>充分考虑配电网三

相不平衡状况下负荷的不确定性影响,采用随机模糊相容性方法,对配电网线路的负荷进行模糊建模,并通过动态改变因子粒子群算法,对目标函数求解获得最优解,实现配电网节能降损。陈家超等<sup>[13]</sup>针对当前负荷换相困难,以及光伏协调控制在三相四线制低压配电网中的适用性问题,提出了基于三相四线制系统节点导纳矩阵的低压配电网三相平衡优化模型。经过建模仿真求解,证明所提方法能有效降低三相不平衡度以及网损。目前分换相开关的相序切换原理过于简单,存在换相过程断电时间长、电压和电流畸变严重等问题,为此赵云龙等<sup>[14]</sup>提出了一种以功率因数校正电路与逆变器电路为基础,由初始阶段、当前相跟踪阶段、切换相跟踪阶段以及换相完成 4 个阶段组成的整体换相方案,实现了换相过程不间断供电,同时改善了电压和电流的畸变问题。为解决配电网中三相负荷不平衡问题,赵波等<sup>[15]</sup>提出一种配变三相不平衡负荷自动均衡控制方法,以降低配变的三相不平衡度。通过仿真模型,验证了控制策略和流程的正确性。

虽然上述方法均在一定程度上实现了三相平衡以及台区线损的降低,但由于大多数未考虑换相成本,且换相策略需兼顾整体台区配网负荷情况,不可能根据不同时间的负荷情况多次调整相位。针对上述问题,本文提出了基于 HPLC 的低压台区三相不平衡优化调整方法。

### 1 整体过程描述

为通过最少换相操作实现三相负荷相对平衡,从而达到低压台区降损最大化的目标,本文构建了基于 HPLC 的低压台区三相不平衡优化调整方法。整体流程如图 1 所示。

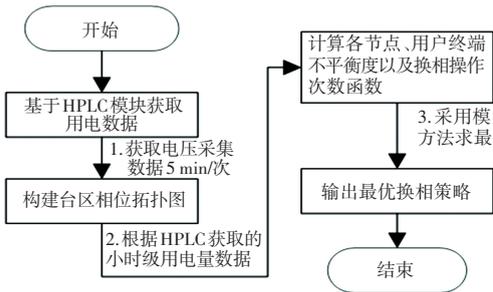


图 1 整体流程

Fig. 1 Overall flow chart

本文首先基于 HPLC 模块获取低压配电小区的历史用电数据,随后构建其台区相位拓扑图<sup>[16]</sup>,接着基于 HPLC 采集的变压器侧、各主干线、各支路、

各计量点的小时级用电量数据(本文以有功功率作为近似负荷值),依据功率数据计算变压器侧、各主干线、各支路的三相负荷不平衡度。另外,将楼内各用户的相位标识量堆叠成决策变量矩阵,用于后续换相操作次数的最小目标函数求解,最后采用模型预测控制策略求出目标函数,即最优换相策略,实现以换相操作次数最少和有效降低线损率为前提的三相负荷平衡优化。

### 2 低压台区三相不平衡优化调整方法

#### 2.1 基于台区相位拓扑构建最小化目标

##### 2.1.1 构建台区相位拓扑图

本文基于电能表已安装 HPLC 模块的居民低压台区小区,构建台区相位拓扑图。为识别各用户接入配电网的相位信息,设定某一时段将 HPLC 模块的电压采集频率定为 5 min/次;采用三相过零时刻测试方法<sup>[17]</sup>即可获取小区内各用户的接入相位信息。小区层配网为三相四线制,结构呈辐射状,终端用户以单相供电方式接入配电网。如图 2 所示:节点 0 为配变二次侧母线,代表根节点;中间分叉节点(节点 1、2)为支路分线,用实心黑点表示;末端(节点 3、4)为单元楼采集点,代表尾节点,用空心圆表示。图中以节点 3 的一个末端为例,展示了该楼某单元的 A、B、C 接相情况,同理其他单元楼采集点接线方式。

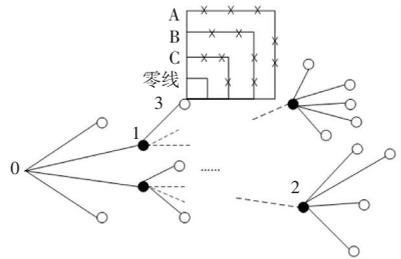


图 2 低压配电台区辐射状结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial structure of low-voltage distribution substation area

在三相不平衡调整期,设定 HPLC 模块的采集数据状态如下:

- (1)集中器采集的变压器二次侧三相负荷值,设置为每小时采集一次数据。
- (2)各单元楼内采集器采集的各相线路首端的负荷,每小时一次。其中的负荷值为同单元同相用户受电功率的加和,不计用户电表之间的损耗。
- (3)每一用户终端处,由智能电能表采集用电负荷,每小时采集一次。

### 2.1.2 调控策略最小化目标

在三相四线制的小区配电网中,定义的不平衡度  $g_k$  以式(1)表示:

$$g_k = \left| \frac{i_k - \bar{I}}{\bar{I}} \right| \times 100\% \quad (k = A, B, C) \quad (1)$$

$$\bar{I} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (2)$$

式中:  $I_A, I_B, I_C$  分别表示  $A, B, C$  三相瞬时电流值,  $\bar{I}$  为三相瞬时平均电流值。

由于台区总功率因数和关口电压不会剧烈波动,各单相功率因数和电压波动范围均在相对小的变化范围内,且低压居民用户无功功率相对较小,故有功功率可较好反映电流变化。在实际三相不平衡调整过程中,将相电压和三相功率因数设定为等值,即:

$$u_A \approx u_B \approx u_C \quad (3)$$

$$\cos\theta_A \approx \cos\theta_B \approx \cos\theta_C \quad (4)$$

式中:  $u_A, u_B, u_C$  表示  $A, B, C$  三相电压有效值,  $\cos\theta_A, \cos\theta_B, \cos\theta_C$  表示  $A, B, C$  三相功率因数。由式(1)~式(4)可得由有功功率计算获取的三相不平衡度  $g_k$ :

$$g_k = \left| \frac{p_k - \bar{p}}{\bar{p}} \right| \times 100\% \quad (k = A, B, C) \quad (5)$$

$$\bar{p} = \frac{P_A + P_B + P_C}{3} \quad (6)$$

式中:  $p_A, p_B, p_C$  三相瞬时功率值,  $\bar{p}$  为三相瞬时平均功率。本文以 HPLC 模块获取小时级采集数据,以日为单位,以月为三相不平衡调整周期,故月度三相不平衡度矩阵  $\mathbf{G}_{\text{Matrix}}$  表示为:

$$\mathbf{G}_{\text{Matrix}} = \begin{bmatrix} g_A^1 & g_B^1 & g_C^1 \\ g_A^2 & g_B^2 & g_C^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_A^j & g_B^j & g_C^j \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $g_A^j, g_B^j$  和  $g_C^j (j = 1, 2, \dots, N) (N = 30)$  分别表示在第  $j$  日的  $A, B, C$  相负荷瞬时不平衡度。

用  $c_{l,f}$  表征 1 号单元楼第  $f$  个用户,  $\alpha_{l,f}$  为该用户接入相应的标识量,将其表示为三维行向量:

$$\alpha_{l,f} = \begin{cases} [1 & 0 & 0], & c_{l,f} \in A \\ [0 & 1 & 0], & c_{l,f} \in B \\ [0 & 0 & 1], & c_{l,f} \in C \end{cases} \quad (8)$$

以节点 3、节点 4 为代表的各单元楼某一小时的三相负荷累积不平衡度为

$$[g_{q,l,A} g_{q,l,B} g_{q,l,C}] = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^{24} g_{q,l,f,i} \alpha_{l,f} \quad (9)$$

式中:  $F$  表示第  $l$  号单元楼共计  $F$  个用户,  $f \in [1, F]$ ;  $g_{q,l,f,i}$  表示第  $q$  条主干线,第  $l$  号单元楼,第  $i$  小时,第  $f$  个用户的负荷瞬时不平衡度;  $g_{q,l,A}$  表示第  $q$  条主干线,第  $l$  号单元楼  $A$  相负荷瞬时不平衡度。  $g_{q,l,B}$  和  $g_{q,l,C}$  同理。

以节点 1、节点 2 为代表的各主干线的三相负荷累积不平衡度为

$$[g_{q,A} g_{q,B} g_{q,C}] = \left[ \sum_{l=1}^L g_{q,l,A} \sum_{l=1}^L g_{q,l,B} \sum_{l=1}^L g_{q,l,C} \right] \quad (10)$$

式中:  $L$  表示某主干线所接的单元楼数量,  $l \in [1, L]$ ;  $q$  表示第  $q$  条主干线节点;  $g_{q,A}$  表示第  $q$  条主干线  $A$  相负荷瞬时不平衡度。  $g_{q,B}$  和  $g_{q,C}$  同理。

则根节点 0 代表的配变二次侧母线的三相负荷累积不平衡度为

$$[g_A g_B g_C] = \left[ \sum_{q=1}^Q g_{q,A} \sum_{q=1}^Q g_{q,B} \sum_{q=1}^Q g_{q,C} \right] \quad (11)$$

式中:  $Q$  表示主干线节点数量,  $q \in [1, Q]$ ;  $g_A$  表示配变二次侧母线  $A$  相的负荷瞬时不平衡度。  $g_B$  和  $g_C$  同理。

由公式(11)获取某一日的配变二次侧母线的三相负荷累积不平衡度,则月度  $A, B, C$  三相负荷平均不平衡度分别为:

$$\begin{cases} G_A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_A^j \\ G_B = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_B^j \\ G_C = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_C^j \end{cases} \quad (12)$$

此外,三相不平衡调整需考虑实际换相操作产生的换相成本。在小区配网中,换相成本最小化可等价于换相操作次数最小化。将各节点及终端的相位标识量  $\alpha$  堆叠成  $3 \times W$  维的决策变量矩阵  $\mathbf{A}$ , 即:

$$\mathbf{A} = [\alpha_{0,0,0}^T, \dots, \alpha_{q,l,f}^T \dots \alpha_{Q,L,F}^T] \quad (13)$$

其中,  $\alpha_{q,l,f}^T$  表示第  $q$  条主干线第  $l$  号单元楼第  $f$  个用户的相位标识量,其中 0 值表示该分支网线的汇总点。如:  $\alpha_{0,0,0}^T$  表示根节点,  $\alpha_{1,0,0}^T$  表示第 1 条主干线节点 1 的相位标识量。

令  $\mathbf{A}_{\text{old}}$  与  $\mathbf{A}_{\text{new}}$  分别表示换相前后的相位标识矩阵,  $W$  表示小区内总计可换相点数量,则三相不平衡调整后总计换相操作次数为

$$d = W - \mathbf{A}_{\text{old}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{new}} \quad (14)$$

## 2.2 基于模型预测控制的调整策略

针对低压台区三相不平衡负荷调控,需尽可能

实现计量点平衡、各支路平衡、主干线平衡和变压器低压出口侧(即配变二次侧母线)平衡。然而,由低压台区拓扑图可知,计量点越靠近变压器低压出口侧,三相不平衡对变压器及线损的影响量越大,故本文以变压器低压出口侧三相不平衡度最小化为目标值,将计量点平衡、各支路平衡和主干线平衡作为换相操作的可选择执行操作空间。由于换相操作执行顺序往往会影响到后续换相操作,故本文采用模型预测控制策略(Model Predict Control, MPC),以三相负荷不平衡度最小化和变相操作次数最小化为目标函数,保证小区的三相负荷尽可能平衡且变相操作次数最少。

将公式(12)计算得到的变压器侧三相负荷累积不平衡度,以及公式(14)三相不平衡调整后总计换相操作次数,作为MPC控制策略的目标值:

$$J_{\min} = \min [\lambda_1(G_a + G_b + G_c) + \lambda_2 d] \quad (15)$$

式中:  $J_{\min}$  为目标函数,  $G_a + G_b + G_c$  为三相负荷累积不平衡度的最小化目标值,  $d$  为换相操作次数目标值,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为三相负荷不平衡度与换相操作设定的调节权重。

为获取最优负荷换相操作序列,根据式(9)~式(11)计算获取各层级的A、B、C相的负荷累积不平衡度,并确定负荷不平衡度的最大相,以负荷不平衡度最大相的负荷来计算负荷待调整量。

设确定的负荷不平衡度最大相为W相,假定调整之后各相负荷能达到平衡的状态为最优调节,则W相需要调整的负荷量  $\Delta p$  为

$$\Delta p = \bar{p}_W - \bar{p} \quad (16)$$

其中  $\bar{p}_W$  为负荷不平衡度最大相的平均功率。

实际中,若W取A相,即A相不平衡度最大(此处以A相为例,若换成B相或者C相,计算过程相同),各相需要调整的负荷量为:

$$\Delta p_A = \Delta p = \bar{p}_A - \bar{p} \quad (17)$$

$$\Delta p_B = -\frac{\bar{p}_C}{\bar{p}_B + \bar{p}_C} \times \Delta p_A \quad (18)$$

$$\Delta p_C = -\frac{\bar{p}_B}{\bar{p}_B + \bar{p}_C} \times \Delta p_A \quad (19)$$

为满足目标函数,调整后的负荷平衡度必须满足一定的边界条件。设实际调整量为  $\Delta p'$ ,且  $\Delta p'$  取值为  $\Delta p$  附近范围值,则按  $\Delta p'$  调整负荷分布,须满足调整后A、B、C相负荷不平衡度  $G'_A$ 、 $G'_B$ 、 $G'_C$  低于调整前A、B、C相负荷不平衡度  $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$ (假设调整前A相负荷不平衡度最高):

$$\begin{cases} G'_A \leq G_A \\ G'_B \leq G_B \\ G'_C \leq G_C \end{cases} \quad (20)$$

按照上述换相负荷量调整方法获取换相操作调整可执行空间,对低压台区进行  $x$  步换相操作,以使得目标函数最小。为避免换相操作过多导致MPC控制策略难以收敛,故以批次进行调控策略选择,每一批次定义  $x = 10$ ,设每一步都有  $q$  种操作可以执行,则共计获取  $q^x$  组操作序列。每一步的换相操作都根据边界条件筛选出最优的换相操作,从而得到目标函数最小的一组操作序列。将目标函数求解出的最优操作序列,采用滚动优化机制进入最佳配网供电调控状态,从而实现小区三相负荷达到平衡的同时换相次数最少,进而有效减小台区线损。

### 3 实验结果与分析

实验部分以某居民小区为例,对本文所提方法的有效性进行测试。该小区共有供电户496户,其中包括多层建筑8栋(5层),高层建筑2栋(11层)。本算例对该小区2022年11月基于HPLC模块采集的负荷数据为实验基础数据。

#### 3.1 试点实验结果

对该小区的10栋单元楼及用户终端按照本文所提换相策略进行换相操作,优化接入小区的三相馈线的相位对应关系,以单元楼和用户终端的部分换相后的对应关系进行示例,见表1。

表1 部分换相操作后调整结果

Table 1 Optimization results of phase change strategy for some unit buildings

编号	A相接入 馈线相位	B相接入 馈线相位	C相接入 馈线相位
1号楼2单元	B	A	C
4号楼1单元	A	C	B
6号楼1单元2户换相前	0	1	0
6号楼1单元2户换相后	1	0	0

表1中,1号楼2单元表示将单元楼内采集器A相和B相接换;4号楼1单元表示将单元楼内采集器B相和C相接换;6号楼1单元2户在换相前为B相接入配电网,换相操作后改为A相接入配电网。

对该小区进行了2批次共计16次换相操作后,由于三相不平衡是引起低压台区线损的主要原因,故本文以线损值说明本文方法的有效性,如图3所示。

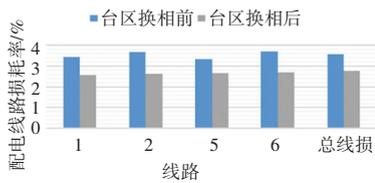


图3 线损对比图

Fig. 3 Line loss comparison chart

由图3可见,小区执行换相调整操作后,各主干线路的线损率明显下降,总线损率也由3.56%下降至2.75%,表明本文所提换相优化策略具有良好的有效性和实用性。

### 3.2 方法性能对比

本文以当前低压台区三相不平衡调整采用的遗传算法<sup>[18]</sup>、人工蜂群<sup>[19]</sup>和粒子群算法<sup>[20]</sup>作为对比调整策略,并基于实验数据获取相序调整方案,然后计算各种方法执行后的台区负荷不平衡度平均值和换相操作调整次数,与本文方法性能进行对比。本文所提方法与其他算法的性能对比结果见表2。

表2 方法性能对比

Table 2 Algorithm performance comparison

方法名称	不平衡度平均值%	换相操作调整次数
本文方法	1.368	16
遗传算法	4.362	25
人工蜂群	2.576	33
粒子群算法	3.680	26

由表2可见,采用遗传算法进行三相不平衡调整后,台区负荷不平衡度平均值最大;粒子群算法和人工蜂群算法获取的换相操作方案,执行后的负荷不平衡度和操作次数均不如本文所述方法。比较可知,本文所提方法在进行低压台区三相不平衡负荷相序调整时,小批量运算可保证方法的收敛性,从而获取较好的三相不平衡度换相方案,在快速性、准确性和稳定性方面均有更好的性能。

## 4 结束语

本文针对低压配电台区存在的三相负荷不平衡问题,提出了一种基于HPLC的低压台区三相不平衡优化调整方法。该方法首先基于HPLC模块的采集数据,生成低压台区相位拓扑图,然后利用HPLC采集变压器侧、各主干线、各支路、各计量点的负荷数据,求取各节点和用户终端的三相不平衡度,最后采用模型预测控制方法获取兼顾三相负荷不平衡度最小化和变相操作次数最小化的相位调节策略。通

过试点小区的算例结果表明:HPLC采集环境下运用换相控制策略调换部分节点及用户的相序,可实现配电台区的三相负荷均衡分配,并有效完成台区的节能降损。

## 参考文献

- [1] 戚成飞,刘岩,毕超然,等.数据驱动的低压配电台区拓扑辨识技术综述[J/OL].电力系统及其自动化学报.DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.001392.
- [2] 李琳玮,黄立毅,倪文斌,等.基于农村用电特性的单相供电应用研究[J].自动化与仪器仪表,2018(6):158-162.
- [3] 黄明欣,唐酿,葛阳,等.考虑平衡三相负荷的低压配电网降损方案[J].广东电力,2022,35(4):39-46.
- [4] 唐会祥,陈文涛,闵子慧,等.考虑三相负荷不平衡的10kV配电网电压损耗计算模型[J].电气自动化,2023,45(6):24-26,30.
- [5] 马志斌,侯哲帆,张瑞雪.基于智能终端和换相开关的台区三相不平衡治理方法研究[J].电网与清洁能源,2023,39(6):39-48,57.
- [6] 覃均生,韦冰.低压配电网三相不平衡治理技术综述[J].电工技术,2022,575(17):50-52.
- [7] 邹晖,李金灿,卢万平.基于多维关联规则的用电负荷智能预测方法[J].电子设计工程,2024,32(5):122-126.
- [8] 孙伟卿,朱聪,薛贵挺.基于储能系统的低压配电网三相不平衡治理方法研究[J].自动化仪表,2022,43(5):75-81,86.
- [9] 李亮波,解金芳,耿睿,等.基于INSGA-II的电能计量器具自动化检定系统期间核查方案研究[J].计量学报,2023,44(8):1248-1255.
- [10] 郑克刚,袁安荣,雷乾,等.基于樽海鞘群优化网络模型的计量装置状态识别方法[J].智能计算机与应用,2023,13(11):215-219.
- [11] 陈旭东,倪静.分相分段法在低压台区线损治理中的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(12):115-116.
- [12] 张辰琪,宋成昊,李洋,等.基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):212-218.
- [13] 陈家超,李钦豪,唐渊,等.考虑光伏选相投切的低压配电网三相平衡优化[J].电力自动化设备,2022,42(4):71-78.
- [14] 赵云龙,车仁飞,张牧辉,等.基于无缝切换技术的三相不平衡换相开关研究与设计[J].电力自动化设备,2022,42(9):176-182.
- [15] 赵波,胡娟,程怡捷,等.一种配变三相负荷不平衡的自动均衡控制方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):41-47.
- [16] 王冲,茅健,郑武.基于自适应阈值的拓扑图像密度单元优化[J].智能计算机与应用,2023,13(10):73-76,82.
- [17] 盛占石,何婷婷,曾丰,等.三相电源过零检测及相序自适应新方法[J].现代科学仪器,2013,149(3):79-82.
- [18] 方恒福,盛万兴,王金丽,等.配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2185-2193.
- [19] 李澄,陆玉军,陈颖,等.三相不平衡下配电变压器损耗计算方法研究[J].机械与电子,2020,38(9):32-36.
- [20] 苏斌,张雅,李程,等.基于粒子群算法的三相不平衡换相策略研究[J].上海节能,2022,408(12):1562-1569.