

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220582

基于改进 NSGA-3 和不平衡潮流的配电网相序优化

丁石川¹, 崔康¹, 杭俊¹, 王正风², 鲍海波³

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力有限公司调控中心, 安徽 合肥 230061;
3. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530023)

摘要: 低压配电网存在大量单相负荷, 三相负荷不平衡会造成台区线路损耗增加, 危害电网运行安全。提出一种基于历史数据的用户相序优化方法。使用台区用户的历史电压、电流数据构建台区不平衡潮流模型。针对台区一天内的运行状况建立用户节点电压平均不平衡度最小、台区线路损耗最小和换相次数最小的目标函数。提出含有正态分布交叉算子(normal distribution crossover, NDX)的改进非支配遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-3, NSGA-3), 对用户节点的相序进行优化, 以获得较好的种群分布并减少优化时间。然后从解集中选择最符合条件的一组解作为换相策略。最后以安徽省某配电网台区实际用户数据为例, 验证了所提方法可以有效地降低三相电压不平衡度, 减小线路损耗。

关键词: 相序优化; 台区三相不平衡; NSGA-3; 不平衡潮流计算

Phase sequence optimization of a distribution network based on improved NSGA-3 and unbalanced power flow

DING Shichuan¹, CUI Kang¹, HANG Jun¹, WANG Zhengfeng², BAO Haibo³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Dispatching Center, Hefei 230061, China; 3. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: There are many single-phase loads in the low-voltage distribution network, such that an unbalanced three-phase load will increase the line loss in the substation distribution network and endanger the safety of power grid operation. In this paper, a method of user phase sequence optimization based on historical data is proposed. The historical voltage and current data of users in the distribution network are used to construct the unbalanced power flow model of the distribution network. The objective function of the minimum average voltage imbalance degree of the user node, the minimum line loss and the minimum commutation times in the station area are established according to the operating conditions of the station area within one day. An improved non-dominated sorting genetic algorithm-3(NSGA-3) with a normal distribution crossover (NDX) operator is proposed, and the phase sequence of the user nodes is optimized to obtain a better population distribution and reduce the optimization time. Then the most suitable set of solutions is selected from the solution set as the phase sequence adjustment strategy. Finally, the results validate that the proposed method can effectively reduce the degree of three-phase voltage imbalance and reduce line loss by taking the actual load data of a distribution station area in Anhui Province as an example.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607001, No. 52177027, and No. 52107034).

Key words: phase sequence optimization; three phase unbalance in the substation distribution network; NSGA-3; unbalanced power flow calculation

0 引言

我国农村配电网大多使用的是三相四线制系统,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607001, 52177027, 52107034); 安徽省自然科学基金优秀青年项目资助(2108085Y18); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目资助(gxyqZD2021090)

电力用户分散范围广。由于长时间缺乏有效管理, 电力用户并网不规范, 容易造成三相之间负荷分配不均匀, 并且单相用户在用电时间上存在的差异性也会导致配电网台区在不同时间段上产生电压不平衡问题。三相不平衡配电系统中电压和电流存在较大的负序分量, 导致配网损耗增大、电力设备的运行效率降低。不平衡条件下系统存在零序电流, 过大的零序电流会造成配变故障及相应设备寿命下降,

严重时会引起继电保护装置误动作, 危害系统的安全运行^[1-4]。

目前低压配电网三相不平衡治理方法主要有负荷换相和不平衡负荷补偿。不平衡负荷补偿是在变压器低压侧安装无功补偿装置对不平衡负荷进行调补。不平衡电流补偿投资较大, 只能在一定程度上改善配变的自身问题。负荷换相方法是通过调节低压负荷挂接在三相上的相序, 使得各相负荷量接近, 主要有手工换相和自动换相装置换相两种方法^[5-9]。文献[10]针对人工换相耗时耗力的问题, 提出采用自动换相装置调整用户负荷的相序, 并使用基于向量基因的遗传算法优化换相模型。文献[11]提出使用非支配遗传算法 NSGA-2 优化调整预测输出的负荷, 并使用人工换相的方法调整用户相序。文献[12]提出使用基于模拟结晶算法优化换相模型, 并通过优化多个时间点的不平衡度来确定用户接入的相序。

市面上已经有技术成熟的智能换相开关装置, 换相算法是换相装置的核心。文献[13]提出了基于改进支持向量机超短期负荷预测的台区相序优化方法, 通过预测变压器出口侧电流, 调节换相开关接入的相序。受限于预测模型的精度, 基于预测的相序调节效果有限。文献[14]提出一种基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理方法, 使用负荷关联生成用户关系调整清单。文献[15]提出使用差分进化算法优化不平衡换相模型, 但没有从根本上解决换相时间尺度上的问题。现阶段的调整方式一般有实时调整和按一定周期调整。实时调整的计算量取决于不平衡调节频率, 而调节频率较高会导致计算量过大; 按照一定周期调整可以减轻计算负担, 同时可以根据用户的历史数据制定合理的换相策略。现有算法基本上都是以电流不平衡度等指标作为目标函数, 这只能反映变压器出口侧的不平衡度, 当低压侧不平衡度符合规定时, 台区中某一部分节点不平衡度可能会超过规定值, 所以有必要对台区配电网进行整体潮流计算。

为此, 本文基于用户历史电压和电流数据构建低压配电网三相不平衡潮流计算模型, 使用前推回代法计算系统潮流, 由潮流计算得到各节点不平衡度和线损。提出含有正态分布交叉算子的第三代非支配排序遗传算法(NSGA-3), 减少运算时间和提高解集质量, 并使用该算法优化含有潮流计算的多目标相序优化模型。最后通过算例验证了本文方法的有效性。

1 三相潮流建模

1.1 用户负荷功率建模

本文提出的优化换相方法是在已知低压配电网用户相序和网络拓扑结构的基础上进行的, 由于农村用户比较分散, 分布范围也比较广, 因此将换相开关安装在群聚用户的线路入口处, 避免了在每户安装换相开关造成成本上升和管理问题。换相开关需要记录过去一周的用户数据, 包含每天间隔 15 min 的电压和电流时刻数据。用户一天内各时刻电压电流数据选用前一天和前一星期相同星期日的各时刻数据的平均值。分别建立用户电流矩阵 \mathbf{I}_{load} 和电压矩阵 \mathbf{U}_{load} , 如式(1)和式(2)所示。

$$\mathbf{I}_{\text{load}} = \begin{bmatrix} i_{11} & \cdots & i_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ i_{m1} & \cdots & i_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_{\text{load}} = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{I}_{load} 和 \mathbf{U}_{load} 对应元素相乘可以得到用户功率, 如式(3)所示。

$$\mathbf{S}_{mn} = \mathbf{U}_{mn} \mathbf{I}_{mn} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(1)一式(3)中的变量均为有效值, 式中: 矩阵的行表示各时刻的数据, $m = [1, 2, 3, \dots, 96]$; 矩阵的列表示用户节点编号, $n = [1, 2, 3, \dots, 30]$, 且均为实数。在对台区负荷建立潮流模型时, 需要计算负荷的无功功率, 设定所有用户的功率因数 $\varphi = 0.95$, 可以得到用户的有功功率 \mathbf{P}_{mn} 和无功功率 \mathbf{Q}_{mn} , 如式(4)和式(5)所示。

$$\mathbf{P}_{mn} = \mathbf{S}_{mn} \cdot \varphi \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_{mn} = \mathbf{S}_{mn} \cdot \sin(\arccos(\varphi)) \quad (5)$$

1.2 三相潮流建模

不平衡台区配电网由于含有大量不平衡负荷, 不能将三相看作单相的方法来计算潮流。三相不平衡分量可以通过对称分量法分解成正序、负序、零序 3 个对称分量, 对 3 个分量分别进行潮流计算, 最后将 3 个潮流计算的结果叠加。首先需要获取配电网的序分量等值电路, 三相不平衡输电线路在对称分量坐标系中的 π 等值模型^[16-17]如图 1 所示。

由电路理论可以得到

$$\mathbf{Y}_S^{1,2,0} \mathbf{U}_i^{1,2,0} = \mathbf{I}_{ii}^{1,2,0} \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_Z^{1,2,0} (\mathbf{U}_i^{1,2,0} - \mathbf{U}_j^{1,2,0}) = \mathbf{I}_{ij}^{1,2,0} \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_S^{1,2,0} \mathbf{U}_j^{1,2,0} = \mathbf{I}_{jj}^{1,2,0} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{Y}_Z^{1,2,0} = \mathbf{T}_{a,b,c}^{1,2,0} \mathbf{Y}_Z^{a,b,c} (\mathbf{T}_{a,b,c}^{1,2,0})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_S^{1,2,0} = \mathbf{T}_{a,b,c}^{1,2,0} \mathbf{Y}_S^{a,b,c} (\mathbf{T}_{a,b,c}^{1,2,0})^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{a,b,c}^{1,2,0} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{Y}_S^{1,2,0}$ 、 $\mathbf{Y}_Z^{1,2,0}$ 分别为线路序分量下的串、并联导纳矩阵; $\mathbf{U}_i^{1,2,0}$ 、 $\mathbf{U}_j^{1,2,0}$ 为节点电压向量; $\mathbf{I}_{ij}^{1,2,0}$ 、 $\mathbf{I}_{ii}^{1,2,0}$ 为各支路电流向量, 可以得到线路两端的注入电流, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{I}_i^{1,2,0} = \mathbf{I}_{ii}^{1,2,0} + \mathbf{I}_{ij}^{1,2,0} \\ \mathbf{I}_j^{1,2,0} = -\mathbf{I}_{ij}^{1,2,0} + \mathbf{I}_{jj}^{1,2,0} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}_i^{1,2,0}$ 为流入节点的电流; $\mathbf{I}_j^{1,2,0}$ 为流出节点的电流。

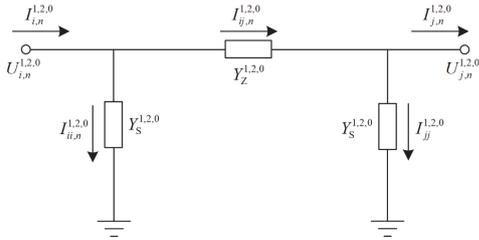


图1 三相不平衡输电线路的序分量 π 等值电路

Fig. 1 π -equivalent circuit of sequence components of three-phase unbalanced transmission line

1.3 不平衡潮流计算

换相开关连接的节点支路负荷都是单相负荷, 可以看成三相负荷星形接法的特殊连接方式, 支路电流可以直接由对称分量法转化成序分量^[18]。对线路建立序分量模型, 生成正序、负序和零序3个序分量网络, 基于前推回代法进行潮流计算, 步骤如下^[19]。

1) 根据给定配电网的线路参数, 分别生成正序、负序、零序的节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 、 \mathbf{Y}_0 。

2) 给定各节点的三序电压初始值 $\mathbf{U}_k^{0,1,2}$, 其中 k 为节点序号, 正序电压幅值为 1.0 p.u., 负序和零序电压幅值为 0。

3) 计算负荷注入节点的电流。

$$\mathbf{I}_{kload,e}^{1,2,0} = \begin{bmatrix} I_{kload,e}^1 \\ I_{kload,e}^2 \\ I_{kload,e}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a,kload,e} \\ I_{b,kload,e} \\ I_{c,kload,e} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$I_{p,kload,e} = \frac{S_p^*}{U_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{U_p^*} \quad (14)$$

式中: α 为旋转因子, $\alpha = e^{j120^\circ}$ 表示向量正方向旋转 120° ; $p = a, b, c$; S_p^* 为节点负荷; e 为迭代次数。

4) 更新网络中的节点注入电流。

$$\mathbf{I}_{k,e}^{1,2,0} = \sum \mathbf{I}_{kline,e}^{1,2,0} + \sum \mathbf{I}_{kload,e}^{1,2,0} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{I}_{kline,e}^{1,2,0}$ 为配网线路上的序注入电流; $\mathbf{I}_{kload,e}^{1,2,0}$ 为负荷的序注入电流。

5) 更新正序网络中节点 k 的功率。

$$\mathbf{S}_{k,e} = \sum \mathbf{S}_{kline,e} + \sum \mathbf{S}_{kload,e} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{S}_{kline,e}$ 为配网线路上由上一节点注入此节点的功率; $\mathbf{S}_{kload,e}$ 为负荷功率。

6) 计算各支路电压: 正序网络为有源网络, 使用单相潮流前推回代算法计算下一次迭代正序节点电压; 负序和零序网络为无源网络, 使用节点电压方程计算下一次迭代的负序节点电压和零序节点电压。

7) 利用节点已知的正序、负序、零序电压计算出各节点的三相电压, 以第 e 次和第 $e+1$ 次迭代的各相电压差的最大值 ΔU 作为结束迭代的标志。

$$\Delta U = \max |U_{abc}^e - U_{abc}^{e+1}| < \varepsilon \quad (17)$$

式中: U_{abc}^e 为第 e 次迭代的相电压; ε 为迭代运行电压差的最小精度, 当 $\Delta U < \varepsilon$ 时结束迭代, 当 $\Delta U > \varepsilon$, 重复步骤 3) 进行下一次迭代。

2 基于潮流计算的最优换相模型

低压配电网结构复杂, 辐射范围广, 用户数众多, 很难从最末端的电力用户上解决三相不平衡问题。将一些聚集在一起的电力用户视为一个调整对象, 在分支线路上安装换相开关, 可以减少换相开关的数量, 同时也可以降低数据处理的复杂度。公共支路上的负荷变化更能反映某一聚集类用户的用电行为, 因此可以根据已有的用户拓扑结构和换相开关安装的位置建立多目标最优换相数学模型。在考虑降低配电网的三相不平衡度时, 还需要考虑配电网线路损耗和换相开关的动作次数。

2.1 换相目标函数

根据遗传算法设置染色体和种群的结构, 将台区所有换相开关作为一个种群, 每个换相开关所接的相序作为一条染色体, 并对染色体按照式(18)使用实数编码。

$$\begin{cases} K = 1, \text{ 换相开关切换到 A 相} \\ K = 2, \text{ 换相开关切换到 B 相} \\ K = 3, \text{ 换相开关切换到 C 相} \end{cases} \quad (18)$$

一个种群也可以视为一种换相方案, 方便构建

目标函数, 所有的换相开关连接的相序可以视为一个开关向量 \mathbf{K} 。

$$\mathbf{K} = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ \cdots \ K_{30}] \quad (19)$$

本文设置换相开关共 30 个, 所以式(19)中向量元素共 30 个。

目标函数 1: 系统节点电压三相平均不平衡度最小。

以台区变压器低压出口侧的三相电流不平衡度衡量配电网不平衡度, 忽略了台区分支母线的电压不平衡造成的线路损耗增加, 因此需要考虑各节点上的电压不平衡度。根据前文所构建的不平衡潮流模型可以求出系统中每个节点的三相电压, 使用对称分量法把三相不平衡电压分解成正序、负序和零序电压, 由国标电压不平衡度定义可以得到^[20]

$$\varepsilon_k = \frac{U_{k2}}{U_{k1}} \times 100\% \quad (20)$$

式中: ε_k 为节点电压不平衡度; U_{k1} 和 U_{k2} 分别为各分支节点电压的正序和负序分量。为了使换相方案让一天内的不平衡度都保持在较低水平, 需要建立历史数据(前一天和上周同一天内所有时刻)不平衡度平均值最小的目标函数, 如式(21)所示。

$$f_1 = \min \left(\frac{1}{M} \sum \varepsilon_{km} \right) \quad (21)$$

式中: m 为数据记录时刻; M 为 k 和 m 乘积; ε_{km} 为各时刻的节点电压不平衡度。

目标函数 2: 换相开关变化次数最小。

换相开关的寿命是有限的, 需要保证换相时开关动作次数尽可能少。根据换相前后的开关向量计算开关动作次数 K_t , 则最小开关次数目标函数为

$$f_2 = \min \left(\sum K_t \right) \quad (22)$$

目标函数 3: 台区线路损耗最小。

根据前文潮流计算的结果可以得到配电网线路有功损耗, 如式(23)所示。

$$P_{\text{loss}} = \min \left(\sum (P_k - P_{\text{load},k} - P_{k+1}) \right) \quad (23)$$

式中: P_k 为某一节点 k 注入有功功率; $P_{\text{load},k}$ 为该节点的负荷有功功率; P_{k+1} 为节点 k 顺应潮流方向注入下一节点的有功功率。

2.2 约束条件

在执行换相操作时, 每个节点的负荷都会随之改变, 调整负荷较大的节点会影响节点电压, 有可能会超过规定的范围, 因此建立节点电压约束条件, 如式(24)所示。

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max} \quad (24)$$

在多次执行算法时有可能对某一个换相开

关进行多次调整, 为了避免换相开关频繁动作造成寿命快速减少, 需要对每一个换相开关设置连续换相次数约束。根据实际情况设定每台换相开关最高连续换相次数 n , 统计各换相开关 K_i 动作总次数 K_c , 若其中一台连续动作次数超过规定值, 则下一次换相时不对其调整, 继续按照上一次的相序连接负荷。可以得到换相开关动作约束为

$$K_c = \sum K_i \leq n \quad (25)$$

3 基于改进 NSGA-3 的优化

多目标优化是同时使多个目标在给定区域尽可能最佳, 不存在唯一的全局最优解, 非支配遗传算法(NSGA)是解决多目标优化问题的有效方法, NSGA-2 用拥挤距离对同一非支配等级的个体进行选择, 能够较好地保留非劣解。在面对 3 个及 3 个以上的多目标问题时, 拥挤距离的选择方法得到的解在非支配层上分布不均匀, 这样会导致算法陷入局部最优。因此文献[21]提出基于参考点的非支配排序遗传算法(NSGA-3), 通过引入设定的参考点保持种群的多样性。

3.1 正态分布交叉算子的引入

NSGA-3 中使用模拟二进制交叉算子(simulated binary crossover, SBX)进行交叉操作, 个体按照式(26)产生子代个体^[22-23]。

$$\begin{cases} c_{1,i} = \frac{[(1+\beta)x_{1,i} + (1-\beta)x_{1,i}]}{2} \\ c_{2,i} = \frac{[(1-\beta)x_{2,i} + (1+\beta)x_{2,i}]}{2} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq n \quad (26)$$

式中: $x_{1,i}$ 和 $x_{2,i}$ 为父代个体; $c_{1,i}$ 和 $c_{2,i}$ 为子代个体; β 为随机变量, 每一个体都按照式(27)生成。

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & u \leq 0.5 \\ [(2(1-u))^{\frac{1}{\eta+1}}], & u > 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

式中: u 为均匀分布于区间(0,1)上的随机数; η 为交叉参数, 为一常数。因 SBX 在空间上的搜索范围有限, 会出现局部最优, 所以现将 NDX 引入到交叉操作中。将随机数 β 替换成 $1.481|N(0,1)|$, 如式(28)所示。

$$\begin{cases} c_{1/2,i} = \frac{(x_{1,i} + x_{2,i})}{2} \pm 1.481 \cdot \frac{(x_{1,i} - x_{2,i})}{2} \cdot |N(0,1)|, & u \leq 0.5 \\ c_{1/2,i} = \frac{(x_{1,i} + x_{2,i})}{2} \mp 1.481 \cdot \frac{(x_{1,i} - x_{2,i})}{2} \cdot |N(0,1)|, & u > 0.5 \end{cases} \quad (28)$$

在交叉算子中引入正态分布,仍然和 SBX 具有相同的空间开发能力,同时能够跳出局部最优,搜索空间更加广阔,能够保证 Pareto 解集分布广泛,提高解集的质量。

3.2 多目标开关相序优化流程

本文提出的改进 NSGA-3 的多目标开关相序优化流程如图 2 所示,具体描述如下。

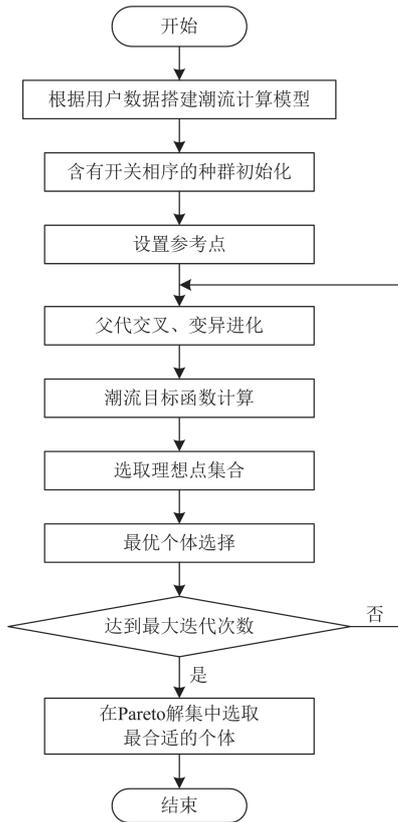


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flowchart

1) 搭建台区配电网模型: 将电压电流历史数据进行数据清洗, 求出换相开关所在节点的有功和无功功率, 按照潮流计算初始化设定台区模型结构和参数。

2) 种群初始化: 将换相开关按照所在的相位设置开关向量, 并将开关向量按照实数形式编码得到 $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ 。一个开关向量代表一个种群, 控制变量 k_n 代表一个个体, 多个开关向量组成种群。

3) 设置参考点: 根据目标函数的个数和种群数量设置参考点。

4) 父代遗传进化: 使用 NDX 和多项式变异算子对初始化种群或前一次迭代产生的父代种群进行操作, 得到新的种群 A , 再将父代种群和种群 A 混合, 得到两倍于种群规模 N 的种群 B 。

5) 目标函数计算: 根据搭建的不平衡潮流模型计算目标函数值, 对种群进行非支配排序, 将种群 B 中优先级高的 L 层非支配层个体(种群数量 $< N$) 直接保留到下一代。在其余的非支配层中使用关联参考点的方法选择其余个体, 并与优先级高的非支配层个体组成 N 规模的种群。

6) 选取理想点集合: 首先计算各目标函数中每一个目标维度上的最小值, 得到的每个目标函数的最小值的集合即为理想点集合, 根据每个点的目标函数值算出对应坐标轴上的坐标值, 将目标函数值和理想点集合作差, 并除以两者的截距进行归一化。

7) 最优个体选择: 划分相应的参考点, 构建参考点向量并找到距离每个种群个体最近的参考点。将前 L 层个体和相关联的参考点共同组成一个规模为 N 的种群^[23-25]。

8) 迭代次数: 判断是否达到最大迭代次数, 若未达到迭代次数, 则重复步骤 4)–7)。

9) Pareto 解集处理: 计算所有 Pareto 解集的目标函数值, 每个个体按照平均不平衡度最小、开关次数最小的顺序选择个体作为最终换相方案。

4 实例分析

本文选用安徽省某农村配电台区 2020 年 8 月 18 日—8 月 31 日的数据作为本模型的案例分析。台区内共有 167 户居民, 全部为单相用户。经过分析变压器出口侧的电压数据, 该配电台区长期处于三相不平衡状态, 电流不平衡度普遍在 20% 左右, 增加了配变的负担和线路损耗, 严重危害台区运行安全。本案例共设置 30 个换相开关, 以一天作为换相周期可以减少换相成本并延长换相开关的使用寿命, 在换相节点下连接多个用户负荷减小了调整每家用户相序的复杂性, 提高了换相开关工作的稳定性。根据台区拓扑结构, 在多个用户聚集的线路入户端安装换相开关, 以控制所接用户挂接的相序。聚集类用户之间的线路较短, 为了便于计算, 忽略了接在同一个换相开关下各用户之间的线损。

4.1 用户数据处理

换相开关每隔 15 min 记录一次线路上的电压和电流, 选择过去 7 天的数据作为历史数据。原始数据因为各种原因会有很多缺失值和异常值, 利用三倍标准差剔除异常值, 应先检测数据的均值和标准差, 如式(29)和式(30)所示。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_m \quad (29)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (x_m - \mu)^2} \quad (30)$$

式中: N 为历史数据个数; x_m 为电压或电流数据。将处于 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 以外的点视为异常值, 使用线性插值的方法对剔除的异常值和缺失值进行填补。补全后的数据按照前文所述方法得到每个换相节点的有功功率和无功功率。并计算前一天和前一星期相

同星期日各时刻的平均值, 以反映过去的用电情况。

示例台区共有换相节点 30 个, 简化台区拓扑结构如图 3 所示。已知每个节点的有功和无功功率, 共有 30 条线路, 在每次优化相序前均已知各换相开关的初始相序。

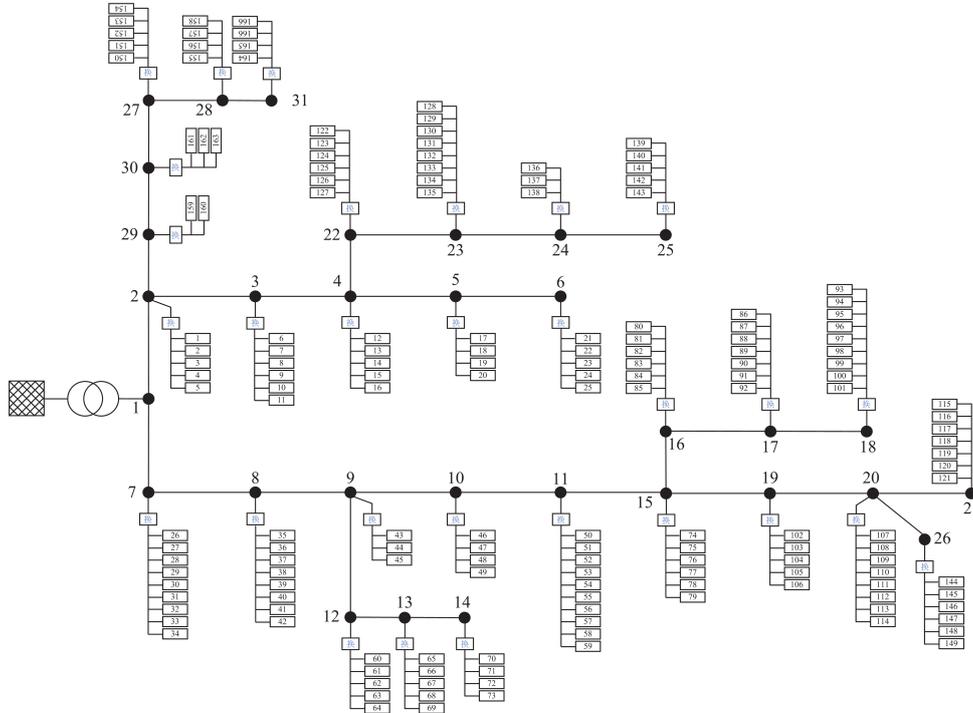


图 3 配电台区拓扑示意图

Fig. 3 Topology diagram of distribution station area

4.2 多目标优化算法的对比

为了验证含有 NDX 的 NSGA-3 算法的有效性, 本文选取了改进的 NSGA-3、NSGA-3、NSGA-2 算法, 对各算法运行 3 种标准测试系列问题(deb-thiele-laumanns-zitzler, DTLZ)的结果进行比较。3 种算法参数设置: 变异概率为 0.1, 交叉概率为 0.8, 种群大小设置为 150, 迭代次数共 100 次。本文实验环境为: Windows 10, Intel corei7-9700 CPU, 主频 3.00GHz, 编程语言为 Python3.7。

评价算法的性能指标包括超体积(hypervolume, HV)、分布性指标 Spacing 和反世代距离(inverted generational distance, IGD), 其中 HV 是评判获得的非支配解集与参照点围成的目标空间中区域的体

积, HV 可测量算法的逼近、分布以及延展性能, 值越大, 算法的综合性能越好; Spacing 度量每个解到其他解的最小距离的标准差, 值越小, 所得 Pareto 前沿中优化解分布越均匀; IGD 通过计算在真实 Pareto 前沿面上的点到算法得到的个体集合之间最小距离的和, 来评价算法的收敛性能和分布性能, 值越小, 算法的收敛性能和分布性能越好^[26]。如表 1 所示, 每种算法优化 10 次, 对各算法的评估指标取平均值。改进 NSGA-3 的 3 种评价指标都优于其他两种算法, 因为参考点的选择会对种群的分布有影响, 所以没有加入 NDX 的 NSGA-3 种群分布会比含有 NDX 的算法差一点。因而改进的算法在种群分布和多样性上有明显的优势。

表 1 不同算法的性能比较

Table 1 Performance comparison of different algorithms

性能指标	NSGA-3(NDX)			NSGA-3			NSGA-2		
	DTLZ1	DTLZ4	DTLZ7	DTLZ1	DTLZ4	DTLZ7	DTLZ1	DTLZ4	DTLZ7
IGD	0.014 155	0.060 26	0.037 135	0.108 386	0.204 407	0.037 421	0.232 98	0.216 254	0.037 576
HV	0.852 431	0.551 562	0.293 443	0.852 112	0.507 729	0.289 267	0.843 166	0.479 084	0.292 989
Spacing	0.002 002	0.059 177	0.031 671	0.023 518	0.054 431	0.033 79	0.046 679	0.045 683	0.035 869

4.3 实例优化结果分析

建立前文所述不平衡优化模型，并使用含有 NDX 的 NSGA-3 和其他两种算法对模型优化，3 种算法在运行时的参数相同，每种算法对本算例各运行 20 次，对算法运行的时间进行统计，绘制出如图 4 所示的箱线图。图中，本文提出的算法运行时间的中位数在 3 个算法中是最少的，其中矩形框所示的 50% 的时间分布也是最低的，因此 NDX 能减少算法运算的时间。

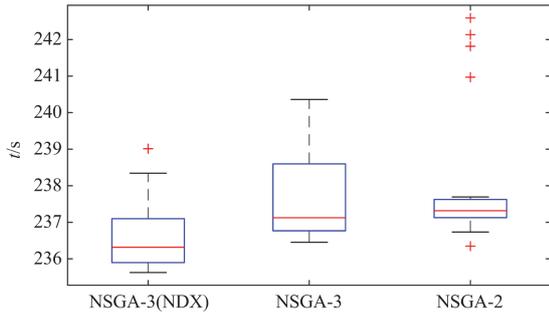


图 4 算法运行时间箱线图

Fig. 4 Boxplot of algorithm running time

得到最终优化结果的 Pareto 解如图 5 所示，NSGA-3(NDX) 的解集空间更广泛，获得的 Pareto 面更接近原点。

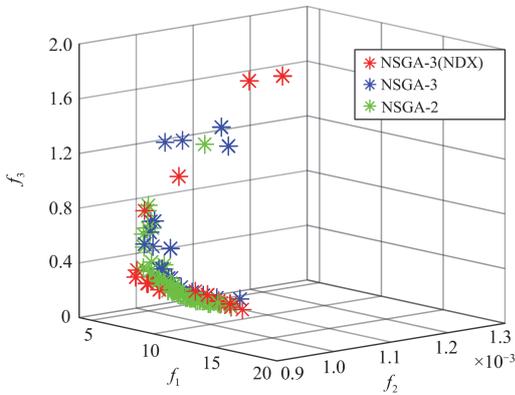


图 5 不同算法下的 Pareto 解

Fig. 5 Pareto solutions for different algorithms

图 5 中每一个坐标点代表一个解，并不是每一个 Pareto 解集中的解都是可以作为最终换相方案，需要从解集中选取一个折衷的解作为最终的换相方案。根据换相日前一天不平衡度最大时刻的电网运行数据，对解集中所有解计算节点不平衡度的平均值和换相次数，绘制两个目标函数值的散点图，如图 6 所示，选择解集中与原点距离最小的解作为最终换相方案。

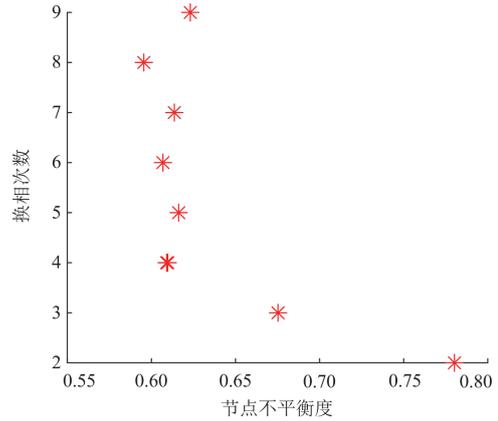


图 6 Pareto 解在前一天下目标函数值的散点图

Fig. 6 Objective function value of the Pareto solution on the previous day

对于不平衡度计算，通常以电流不平衡度代替电压不平衡度，即使用变压器出口侧电流不平衡度来表征^[27]。

$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\text{av}}}{I_{\text{av}}} \times 100\% \quad (31)$$

式中： δ 为电流不平衡度； I_{\max} 为变压器出口侧三相电流最大值； I_{av} 为三相电流平均值。

本文提出的方法考虑了配电网的潮流分布，通过计算潮流得到各换相节点的三相电压，既能得到变压器出口侧电压不平衡度，又能得到各换相节点的不平衡度，使整个台区的不平衡度都处于较低的水平。根据这两种计算方法使用改进的 NSGA-3 算法对负荷相序进行优化。在每种计算方法下，各优化 20 次，累计每次优化的相序解集，并统计由解集计算得到的线损、换相次数和不平衡度分布，如图 7 所示。

图 7 中，两种计算方法获得了相近的换相次数分布。在电压不平衡度和线损的箱线图中，考虑潮流的计算方法的分布低于考虑电流不平衡度的计算方法，且前者的分布较为集中。因此，考虑台区潮流分布，能够降低整个台区的不平衡度，减少线路损耗。

GB/T15543—2008《电能质量三相电压不平衡》规定：三相不平衡度标准可按时间取值，日累计不平衡度大于 2% 的时间不超过 72 min，且每 30 min 大于 2% 的时间不超过 5 min^[28]。图 8 表示换相后一天不平衡度变化，与考虑电流不平衡度的普通计算方法相比，本文提出的方法可长时间改善配电系统的三相不平衡度，单相用户经过相序调整，台区不平衡度有了明显的下降。晚上用户用电量较大，用

电时间比较分散, 不平衡度会稍微高一点。不平衡度降低之后, 台区线损也随之降低, 如图 9 所示。

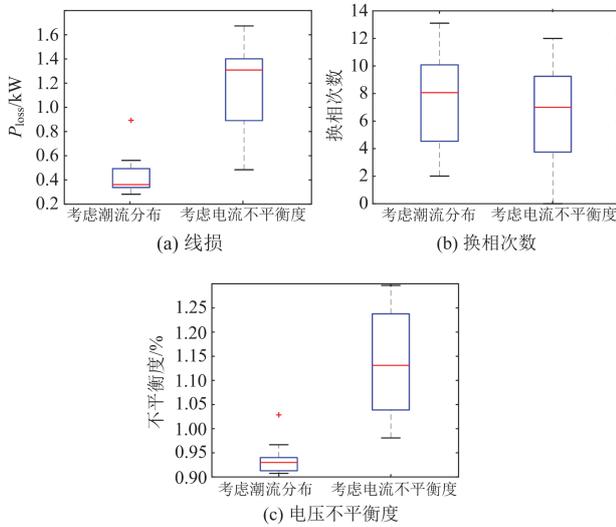


图 7 两种计算方法下线损、换相次数和电压不平衡度

Fig. 7 Line loss, commutation times and voltage unbalance degree under two calculation methods

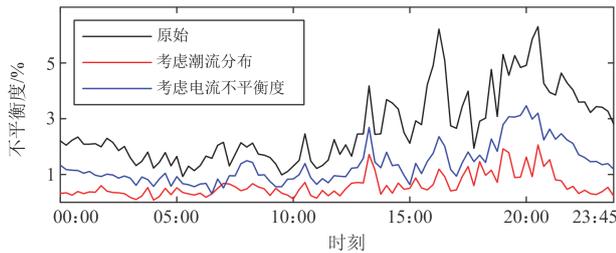


图 8 两种不平衡度计算方式的对比

Fig. 8 Comparison of the two methods of calculating the unbalance degree

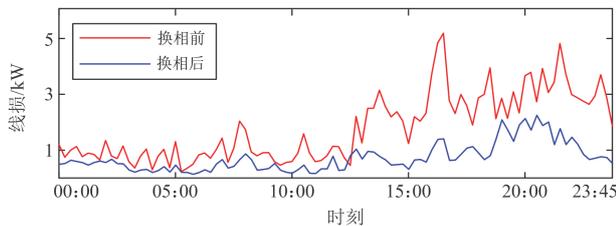


图 9 换相前后的线损变化

Fig. 9 Change of line loss before and after phase sequence adjustment

改变配电网用户挂接相序的同时, 还可以改善配网的节点电压分布。图 10 中优化前节点电压波动剧烈, 配电线路的末端节点电压下降程度较大, 超过了规定的标准, 换相后, 节点电压稳定性有所改善, 末端节点电压均在规定的范围之内。

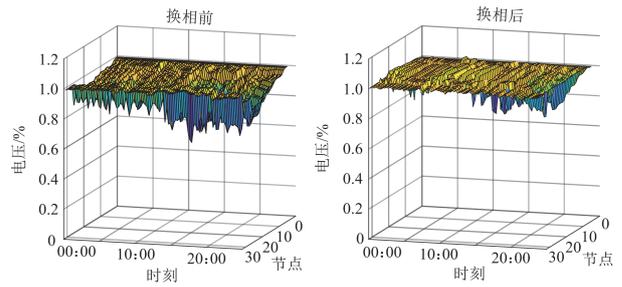


图 10 换相前后的电压分布

Fig. 10 Voltage distribution before and after phase sequence adjustment

5 结论

本文提出了改进 NSGA-3 算法和考虑潮流计算的不平衡度计算方法, 通过实际配电台区数据说明了本文方法的有效性, 得到如下结论:

1) 使用配电网三相不平衡潮流计算得到的不平衡度与利用简单的电流计算的不平衡度相比较, 考虑了电压相位和幅值, 更能反映配电网的运行状态。不平衡潮流计算同时考虑了负荷相间转移造成的配电网潮流重新分配。

2) 基于历史数据构建的三相不平衡换相优化模型使用改进的 NSGA-3 算法优化, 引入的 NDX 可以提高种群分布的多样性, 使得算法能够在解空间中搜索到更优解。

3) 以一天作为换相周期可以减少换相成本和延长换相开关的使用寿命, 在换相节点下连接多个用户负荷减小了调整每家用户相序的复杂性, 提高了换相开关工作的稳定性。

当下, 光伏发电及风能在农村配电网中逐渐普及, 单相分布式能源的接入会改变潮流分布, 影响本文方法的应用效果, 下一步会考虑接入新能源发电及储能系统的配电网不平衡相序优化策略。

参考文献

- [1] 孙峰洲. 含高比例分布式新能源的柔性配电网优化运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
SUN Fengzhou. Research on optimal operation for flexible distribution networks with high proportion of distributed renewable energy sources[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [2] 刘科研, 贾东梨, 王薇嘉, 等. 考虑分布式光伏电源接入模式的低压配电网不平衡线损计算方法[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 129-138.
LIU Keyan, JIA Dongli, WANG Weijia, et al. Calculation method of unbalanced line loss in low-voltage distribution network considering the access mode of distributed

- photovoltaic generation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 129-138.
- [3] 范荻, 皇甫成, 王丰, 等. 基于 MIT-LXPM 改进遗传算法的配电网时间序列三相不平衡优化调控策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 9-16.
FAN Di, HUANGFU Cheng, WANG Feng, et al. Optimal regulation strategy of three-phase imbalance in time series of distribution network based on MIT-LXPM improved genetic algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 9-16.
- [4] 邓成江, 李海锋, 曾德辉, 等. 含逆变型分布式电源的不平衡配电网短路电流计算方法研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 39-46.
DENG Chengjiang, LI Haifeng, ZENG Dehui, et al. Calculation method of short-circuit current in unbalanced distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 39-46.
- [5] 程湘, 田昊, 周群, 等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 48-55.
CHENG Xiang, TIAN Hao, ZHOU Qun, et al. Control strategy of intelligent commutation switch considering phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 48-55.
- [6] 赖纪东, 徐洁洁, 苏建徽, 等. 微网逆变器不平衡电压协调补偿边界分析与计算[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 127-136.
LAI Jidong, XU Jiejie, SU Jianhui, et al. Analysis and calculation of coordinated compensation boundary for unbalanced voltage of microgrid inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 127-136.
- [7] MA Kang, FANG Lurui, KONG Wangwei. Review of distribution network phase unbalance: scale, causes, consequences, solutions, and future research directions[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 479-488.
- [8] 陈恒, 王鹏玮, 徐丙垠, 等. 配电线路自适应相序识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 53-64.
CHEN Heng, WANG Pengwei, XU Bingyin, et al. Adaptive phase sequence identification method for distribution lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 53-64.
- [9] GASTALVER-RUBIO A, ROMERO-RAMOS E, MAZA-ORTEGA J M. Improving the performance of low voltage networks by an optimized unbalance operation of three-phase distributed generators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 177504-177516.
- [10] 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.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in the distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [11] 韩平平, 潘薇, 张楠, 等. 基于负荷预测和非支配排序遗传算法的人工相序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 71-78.
HAN Pingping, PAN Wei, ZHANG Nan, et al. Optimization method for artificial phase sequence based on load forecasting and non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 71-78.
- [12] 彭春华, 陈首昆, 于蓉. 基于模拟结晶算法的长效三相平衡优化换相策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3760-3767.
PENG Chunhua, CHEN Shoukun, YU Rong. An optimal phase swapping strategy for long-term three-phase balancing using a novel simulated crystallizing algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3760-3767.
- [13] 唐捷, 杨银, 刘斯亮, 等. 基于改进 SVM 与 NSGA-III 的台区相序在线优化方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 50-58.
TANG Jie, YANG Yin, LIU Siliang, et al. On-line optimization method for phase sequence in station area based on improved support vector machine and non-dominant sorting genetic algorithm-III[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 50-58.
- [14] 唐冬来, 郝建维, 刘荣刚, 等. 基于动态规划的配电台区三相负荷不平衡治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 58-66.
TANG Donglai, HAO Jianwei, LIU Ronggang, et al. Control method of three phase load imbalance in a distribution station area based on dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 58-66.
- [15] 赵云龙, 车仁飞, 陈家辉. 基于差分进化算法的配电网智能换相策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 107-113.
ZHAO Yunlong, CHE Renfei, CHEN Jiahui. Intelligent commutation system of distribution network based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 107-113.
- [16] 何禹清, 彭建春. 基于序电流注入模型的三相潮流计算方法[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 7-11.
HE Yuqing, PENG Jianchun. Three phase power flow solution based on node injection sequence currents[J]. Electric Power, 2008, 41(3): 7-11.
- [17] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2016, 44(3): 15-23.
- LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.
- [18] 薛世伟, 贾清泉, 张珂欣, 等. 用电数据驱动的低压配电网负荷随机建模及不平衡评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 143-153.
- XUE Shiwei, JIA Qingquan, ZHANG Kexin, et al. Electricity-consumption-data-driven stochastic modeling and unbalance assessment of load in low-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 143-153.
- [19] 董雷, 郭新志, 陈乃仕, 等. 应用改进序分量法的主动配电网不平衡潮流计算[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2113-2119.
- DONG Lei, GUO Xinzhi, CHEN Naishi, et al. Calculation of unbalanced power flow in active distribution networks based on improved sequence components[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2113-2119.
- [20] 龙云波, 张曦, 徐永海, 等. 不平衡电压下 IGBT 串联 STATCOM 稳定运行范围确定及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 158-166.
- LONG Yunbo, ZHANG Xi, XU Yonghai, et al. Determination and application of stable operation range of series-connected STATCOM with IGBT under unbalance voltage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 158-166.
- [21] 安友军, 陈晓慧. 近似支配的 NSGA-III 算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 系统工程学报, 2021, 36(3): 416-432.
- AN Youjun, CHEN Xiaohui. Approximate dominance NSGA-III algorithm for solving flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Systems Engineering, 2021, 36(3): 416-432.
- [22] 张敏, 罗文坚, 王煦法. 一种基于正态分布交叉的 ϵ -MOEA[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 305-314.
- ZHANG Min, LUO Wenjian, WANG Xufa. A normal distribution crossover for ϵ -MOEA[J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 305-314.
- [23] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5405-5411.
- JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405-5411.
- [24] QIAN Jie, LONG Hongyu, LONG Yi, et al. Improved NSGA-III algorithm and BP fuel-cost prediction network for many-objective optimal power flow problems[J]. IAENG International Journal of Applied Mathematics, 2021, 51.
- [25] AI Yongle, DU Mingzhu, PAN Zhihang, et al. The optimization of reactive power for distribution network with PV generation based on NSGA-III[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(3): 193-200.
- [26] 李晓辉, 高铎, 杨晰, 等. 不同支配关系的 NSGA-III 算法在机器人制造单元调度问题中的应用[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(2): 279-284.
- LI Xiaohui, GAO Duo, YANG Xi, et al. Application of NSGA-III algorithm based on different dominance relations in robotic cell scheduling problem[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(2): 279-284.
- [27] 艾精文, 张华赢, 汪清, 等. 基于有效值的台区电流不平衡度计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 30-36.
- AI Jingwen, ZHANG Huaying, WANG Qing, et al. Study on calculation method of unbalanced factor based on RMS of fundamental current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 30-36.
- [28] 武汉国测科技股份有限公司, 中国电力科学研究院, 中机生产力促进中心, 等. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

收稿日期: 2022-04-23; 修回日期: 2022-10-11

作者简介:

丁石川(1980—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为综合能源; E-mail: dsc@ahu.edu.cn

崔康(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电能质量; E-mail: 1287573818@qq.com

杭俊(1987—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电机及其驱动、电能质量. E-mail: jun_hang511@163.com

(编辑 周金梅)