

[三相负荷平衡]

基于改进灰狼算法的泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置

文/冯岷生 李荣芳
水发规划设计有限公司

在泵站低压配电系统中，三相负荷平衡是确保系统稳定运行的关键因素，然而，由于泵站负荷的复杂性，传统的三相负荷平衡方法往往难以达到理想的效果。因此，提出基于改进灰狼算法的泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置。首先，基于改进灰狼算法预测泵站低压配电系统的负荷，确保配电系统的安全、可靠和经济运行。其次，构建三相负荷平衡优化模型，以该模型作为目标，对换相开关配置的参数进行调整。最后，制定换相控制策略，降低换相开关的切换频率，完成三相平衡配置参数的调整。实验结果表明：基于改进灰狼算法的泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置能够有效控制三相负荷不平衡的问题，采用改进灰狼算法进行三相负荷平衡优化配置后，泵站低压配电系统的三相负荷不平衡度显著降低。

随着电力系统规模的不断扩大和电力负荷的持续增加，泵站低压配电系统的三相负荷平衡问题日益凸显。三相负荷平衡不仅关系到电力系统的安全稳定运行，还直接影响到电网的线损、变压器的损耗以及用电设备的寿命和效率。特别是在泵站这类电力消耗大户中，三相负荷的平衡性更是至关重要。灰狼算法作为一种模拟灰狼群体行为的智能优化算法，具有全局搜索和局部搜索的优势，在解决复杂优化问题中表现出色。因此，对灰狼算法进行改进，使其更适用于泵站低压配电系统三相负荷平衡的优化配置，具有重要的研究价值和实践意义。文献[1]采用智能用电设备的启动时间作为调控方式，旨在最小化台区三相不平衡度的平均值，利用MIT截断技术来增加设备启动时间的多样性，并结合LX交叉与PM变异方法进行种群的交叉与变异，通过迭代过程寻找最优的设备启动时间，从而减轻三相不平衡问题。文献[2]则基于中性线不平衡度指标对不平衡程度进行分类，结合低压台区三相不

平衡负荷调节的优化模型和自动调节负荷相序的策略，实现三相负荷的有效优化调整。而本文方法将改进后的灰狼算法应用于泵站低压配电系统的三相负荷平衡优化配置中，通过改进灰狼算法的搜索机制和策略，使其能够更有效地处理泵站负荷的复杂性和多变性，从而实现三相负荷的平衡优化。

泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置的设计

1. 基于改进灰狼算法预测泵站低压配电系统的负荷

在泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置中，通过准确的负荷预测^[3]，可以更加科学地确定配电系统的容量、结构以及设备的选型，从而确保配电系统的安全、可靠和经济运行。因此，本文首先通过改进灰狼算法进行泵站低压配电系统负荷的预测。

1) 获取与预测日相近的T日每天24 h的泵站低压配电系统的历史电价与负荷需求信息，作为平衡

调整前的电价与负荷需求基准^[4]，推算预测日的电价与负荷数据，作为平衡调整后的电价与负荷需求结果。

2) 第 q 天 w 时刻的负荷需求变化量 $\Delta f_w(q)$ 的计算公式为

$$\Delta f_w(q) = \begin{bmatrix} \Delta f_w^1 \\ \Delta f_w^2 \\ \dots \\ \Delta f_w^q \end{bmatrix} \quad (1)$$

3) 第 q 天 w 时刻的电价变化率 $\Delta g_w(q)$ 的计算公式为

$$\Delta g_w(q) = \begin{bmatrix} \Delta g_w^1 \\ \Delta g_w^2 \\ \dots \\ \Delta g_w^q \end{bmatrix} \quad (2)$$

4) 第 Q 天 w 时刻的原始用电量与当天中任意时段的电力价格变化率 $\Delta g_w(q)$ 的乘积向量的表达式为

$$f_{w(Q*24)} = \begin{bmatrix} f_w^1 \\ f_w^2 \\ \dots \\ f_w^Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$f_{w,j}^q = \frac{f_{w0}^q (A_j^q - A_{j0}^q)}{A_{j0}^q}, j=1,2,\dots,24 \quad (4)$$

式中， A_{j0}^q 为第 q 天第 j 时间段参与三相负荷平衡需求之前的电价； f_w^q 为第 q 天参与三相负荷平衡需求之前的功率负载需求与第 q 天全时段的电价变动速率之间的乘积向量； A_j^q 为第 q 天第 j 时间段参与三相负荷平衡需求的可接受电价。

5) 根据三相负荷平衡需求，可知 Q 天第 w 时段参与三相负荷平衡需求变化量 Δf_w^q 的估计值 $\Delta f_w^{q'}$ ，其计算公式为

$$\Delta f_w^{q'} = Z(w, j) \cdot (f_w^q), k=1,2,\dots,24 \quad (5)$$

6) 确定目标函数。在 w 时刻，使三相负荷平衡需求变化量的重构误差达到最小，其计算公式为

$$\min Z = \frac{1}{2Q} \sum_{w=1}^Q \left(\Delta f_w^{q'} - \Delta f_w^q \right)^2 \quad (6)$$

7) 在步骤6)中，使用改进灰狼优化算法来解决目标函数问题，同时配置以下参数^[5]：狼群规模设为 n ，最大迭代次数为 $e_{\max}$ ，方向调整概率为 r_E ，

并且初始化包含24个元素的坐标空间 $I_{w(1*24)}$ 作为狼群的起始位置。

8) 确定群体迭代是否结束的依据是检查是否已达到预设的最大迭代次数 $e_{\max}$ 。若已达到，则执行步骤9)；若未达到，则返回步骤7)并递增迭代次数，直至达到 $e_{\max}$ 。

9) 检查当前时间段 $w>24$ ，若不满足，则跳转回步骤2)，调整下一时刻的负荷需求变化量，并将 $w+1$ 。当 $w>24$ 时，所有步骤结束，输出泵站配电系统实际所需的三相负荷平衡数据。

2. 构建三相负荷平衡优化模型

在实际泵站的低压配电系统中，由于供电负荷种类繁多，密度各异，导致负荷波动性增加^[6]，进而加剧三相不平衡问题。本文选用智能换相开关作为三相负荷平衡配置进行负荷相序调整，可以有效平衡负荷分配，解决三相不平衡现象，同时省去人工换相操作的烦琐和高风险。

采用的换相开关，包两个部分：控制端和操作端。执行端主要传递变相命令，同时管理端和控制端之间利用数据实现信号交流。这两个部分根据交流的信号来进行单相负载的相序，以此达到对供电区域三相不平衡的有效管理。

降低三相不平衡度不仅局限于配电系统的变压器低压侧，还需关注各支路节点的平衡状况。此外，为适配多样化的拓扑结构，低压配电网的拓扑特征也应纳入考量。为此，构建的负荷平衡优化模型中引入了配电网各节点的阻抗因素，以增强目标函数的普适性。据此，构建了以阻抗为基础的三相电流不平衡度目标函数，其计算公式为

$$y = \min \left(\sum_{n=1}^N \frac{x_{1n}}{Z} (\chi_{I2n}^2 + \chi_{I0n}^2) \right) \quad (7)$$

式中， x_{1n} 为根节点到节点 n 之间的阻抗有效值； χ_{I0n} 为零序电流不平衡度； χ_{I2n} 为负序电流不平衡度。

以目标函数为一年内三相不平衡度最小作为该三相负荷平衡优化模型，其计算公式为

$$F = \min \sum_{v=1}^N \left(\sum_{n=1}^N x_{1nv} (\chi_{I2nv}^2 + \chi_{I0nv}^2) \right) \quad (8)$$

式中， N 为配电系统的节点总数； χ_{I0n} 为第 n 个节点在第 v 时刻的零序电流不平衡度； χ_{I2nv} 为第 n 个节点在第 v 时刻的负序电流不平衡度。

通过上述步骤，完成对该三相负荷平衡优化模

型的建立，并以该模型作为目标，对换相开关配置的参数进行调整，进而完成三相负荷平衡优化配置的设计。

3. 调整三相平衡配置参数

为提升换相开关的耐用性，必须考虑换相次数对其造成的影响。因此，在制订换相管理策略过程中，就必须力求减少换相开关的转换次数，以便延长其使用时间和降低设备的波动。在换相过程中，要确定智能换相开关的动作次数尽可能减少，而具体的开关调整次数也可通过换相前后开关相序状态相量 $H_p(v)$ 的变化来决定。 $H_p(v)=\{(1,0,0)^T,(0,1,0)^T,(0,0,1)^T\}$ 分别代表了换相开关与ABC三相相接，则使换相开关动作次数最少，即

$$s_e = \min \sum_{v=1}^N \sum_{p=1}^P \varepsilon_p(v) \tag{9}$$

式中， P 为配电系统单相用户总数； $\varepsilon_p(v)$ 为第 p 个用户在第 v 时刻换相开关动作次数。

当 $H_p(v)=H_p(v+1)$ 时，表示换相开关没有动作， $\varepsilon_p(v)=0$ 。

当 $H_p(v) \neq H_p(v+1)$ 时，表示换相开关动作， $\varepsilon_p(v)=1$ 。

在调整换相开关配置问题时，主要考虑的是治理效果和使用寿命，而非开关的数量。因为在实际应用中，换相开关的安装数量通常由现场采购情况决定，即数量在配置前已确定，只需要配置好最优的安装位置即可。统计各负荷在周期内的换相次数，并按此进行排序，以确定哪些负荷频繁参与换相。然后，根据泵站配电系统治理所需的换相开关数量，从排序结果中从上至下选择相应数量的负荷作为换相开关的安装对象。

实验测试与分析

1. 实验准备

随着电力负荷的持续增加，泵站低压配电系统的三相负荷不平衡问题日益凸显。三相不平衡不仅影响供电系统的电能质量，还可能导致设备损坏和能耗增加。因此，为验证本文设计的基于改进灰狼算法的泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置的可行性，现进行实验测试。本次测试以A市的一处泵站的低压配电系统为实际实验对象，基于此，本次实验现搭建一仿真测试平台用于该泵站配电系统负荷平衡的测试，各项技术参数见表1。

表1 实验参数

配置	参数
操作系统	Windows 7、Windows Server 2016 及以上版本
内存	8 GB
硬盘容量	40 GB
处理器	Intel 或 AMD x86-64 处理器
显卡	OpenGL 3.3 和 1 GB 显存
编程工具	MATLAB

在该平台中模拟出此泵站的IEEE33节点配电系统，以此作为算例，拓扑结构如图1所示。

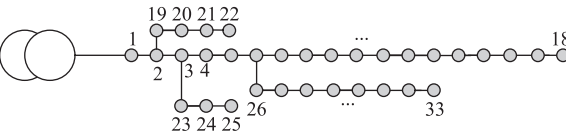


图1 IEEE33节点配电系统拓扑结构

图1中各节点通过三相四线制且不对称的线路相连，用以仿真低压配电网区域，假设配电变压器低压侧的三相电压平衡，且系统额定电压设定为10 kV。

实验步骤：

1) 基于泵站低压配电系统的实际情况，在MATLAB/Simulink软件中，建立泵站低压配电系统的仿真模型（见图1）。

2) 利用数据采集与监测设备，实时采集泵站低压配电系统的三相负荷数据，并对采集到的数据进行预处理，包括数据清洗、数据转换和数据归一化等。

3) 将预处理后的数据分别输入到改进灰狼算法程序与文献[1]、文献[2]方法程序中，运行三种算法，得到三组三相负荷平衡优化配置方案。

4) 将优化后的三组配置方案应用到仿真模型中，进行仿真验证，分析仿真结果，评估各方案的效果，以三相电流的平衡性为例。

2. 实验结果与分析

基于上述实验准备，三种方法的三相电流平衡性测试结果见表2~表4。

表2 本文方法测试结果

时间	A相电流/A	B相电流/A	C相电流/A
1:00	248.11	248.02	247.95
2:00	48.37	48.51	49.01
3:00	125.68	125.19	124.82
4:00	157.20	156.84	157.73
5:00	210.59	211.30	210.46
6:00	187.42	187.65	186.84

表3 方法1测试结果

时间	A相电流/A	B相电流/A	C相电流/A
1:00	248.05	241.39	256.67
2:00	48.48	45.20	42.03
3:00	125.80	129.45	110.84
4:00	157.21	152.96	153.10
5:00	210.73	218.51	205.68
6:00	187.04	210.72	184.25

表4 方法2测试结果

时间	A相电流/A	B相电流/A	C相电流/A
1:00	248.56	226.48	204.52
2:00	48.12	31.96	45.70
3:00	125.04	113.79	158.43
4:00	157.86	124.05	137.48
5:00	210.47	229.61	274.69
6:00	187.39	204.73	184.15

根据上述测试结果可以看出，本文设计的基于改进灰狼算法的泵站低压配电系统三相负荷平衡优化配置能够有效控制三相负荷不平衡的问题，采用改进灰狼算法进行三相负荷平衡优化配置后，泵站低压配电系统的三相负荷不平衡度显著降低，将ABC三相电流控制在相近范围内。因此，可以证明该配置适用于实际工程中，满足配电系统的适时性要求。同时，电压质量得到改善，系统的损耗也相应减少。此外，与其余两种优化算法相比，改进灰狼算法具有更快的收敛速度和更高的搜索准确度，从而能够更快地找到最优解。

结束语

通过引入改进的灰狼算法，解决传统三相负荷平衡方法中存在的收敛速度慢、全局搜索能力不足等缺陷，从而提升泵站低压配电系统的运行效率和稳定性。研究过程中，对泵站低压配电系统的三相负荷特性进行详细分析，明确负荷不平衡对系统运行负面影响。随后，介绍灰狼算法的基本原理，并

指出其在处理复杂优化问题时的潜在优势。在此基础上，提出针对灰狼算法的改进措施，包括优化搜索策略、增强局部搜索能力等，以更好地适应三相负荷平衡优化配置的需求。实验结果表明，采用改进灰狼算法进行三相负荷平衡优化配置，能够显著降低泵站低压配电系统的负荷不平衡度，提高电压质量和功率因数，从而改善系统的整体运行性能。此外，该算法还表现出良好的收敛性和鲁棒性，为泵站低压配电系统的优化运行提供一种新的有效方法。同时，也将关注泵站低压配电系统的其他关键技术问题，如故障预测与诊断、能效管理等，以推动泵站电力系统的智能化和可持续发展。**EA**

(收稿日期：2024-11-26)

参考文献

[1] 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.

[2] 陈军,王强,李发道,等.配网低压台区三相不平衡负荷优化调节的研究[J].江西电力职业技术学院学报,2021,34(3):5-7.

[3] 胡志强,叶远誉,俞林刚,等.主动负荷参与的低压台区三相负荷不平衡自动均衡方法[J].中国电力,2024,57(2):49-54.

[4] 李炳希,唐圣发,刘明昊,等.低压台区三相负荷不平衡综合治理方法研究[J].造纸装备及材料,2024,53(1):99-103.

[5] 黎臻,刘修理,王勇,等.配电网三相负荷不平衡快速调整技术研究与应用[J].农村电气化,2023(4):78-82.

[6] 张小红,翟正兴.基于动态规划的多机电传动系统负荷平衡控制方法[J].中国新技术新产品,2024(10):11-13.

