

[三相负荷]

配电变压器台区三相负荷不平衡控制方法研究

文/陈云飞 姬亚丽

国网甘肃省电力公司天水供电公司

在实际运行中，由于用户用电行为的不确定性和负荷分布的不均匀性，三相负荷不平衡现象较为普遍，导致配电变压器台区三相不平衡度较高。针对上述问题，提出配电变压器台区三相负荷不平衡控制方法。采集配电变压器台区的负荷数据，通过精细的数据采集技术，获取实时的、全面的负荷信息。基于采集到的数据，综合考虑三相负荷的平衡度以及其他相关因素，建立负荷控制目标函数。对目标函数进行求解，以实现负荷不平衡的有效控制。实验结果表明，该控制方法能够降低三相负荷的不平衡度，实现对配电变压器台区三相不平衡的有效控制。

随着现代社会对电力需求的不断增长，电网的稳定性和可靠性成为电力系统中至关重要的议题。配电变压器台区作为电网的基层单元，其运行状态直接影响着用户侧的电力质量。然而，在实际运行中，配电变压器台区三相负荷不平衡问题时有发生，可能导致电网波动、设备损坏，引发能源浪费和环境污染。三相负荷不平衡是指配电变压器台区中三相电源所承担的负荷不一致，这是由于用户用电习惯、设备布局和供电线路设计等多种因素造成的。长期的三相负荷不平衡影响电力系统的稳定运行，导致设备过热、效率降低，甚至损坏，增加电力系统的维护成本。此外，不平衡的负荷会引发谐波污染，对电网造成进一步的破坏。

针对上述问题，国内外学者和工程师已经进行了广泛的研究和实践。从监测和调整三相负荷，使用智能监控系统，采用无功补偿技术，到优化配电变压器台区的设备配置和加强用户管理，一系列的控制方法和技术手段被提出和应用^[1]。随着电力系统的不断发展和用户需求的日益多样化，配电变压器台区三相负荷不平衡问题仍然面临诸多挑战。如

何在保证电网稳定性的同时，提高供电效率，降低维护成本，减少环境污染，成为当前研究的热点问题。本文深入研究配电变压器台区三相负荷不平衡的控制方法，结合现有技术和实际需求，提出更为有效和可行的解决方案。

采集配电变压器台区负荷数据

为了确保配电变压器台区负荷数据的完整性和准确性，本文提出针对数据采集过程的优化策略以及缺失数据的填补方法。采用电力物联网高速载波技术采集配电变压器台区内负荷数据，使用基于正交频分复用的高速载波HPLC模块，替代原有的窄带载波通信模块，采集用户智能电表与采集器之间的数据^[2]。为确保在恶劣电磁环境下数据的稳定传输，采用RS 485接口技术，将HPLC模块嵌入到采集中继器中，实现对配电变压器台区总表电流数据的准确读取。

针对配电变压器台区负荷数据中可能出现的缺失值问题，提出一种基于回归方程的缺失数据填补方法。考虑到配电变压器台区内电表数量众多且分

布广泛, 尽管通过优化后的数据采集过程能够获取相对完整的数据, 但由于数据传输过程中受到的干扰, 数据中仍存在异常或缺失值。为填补这些缺失值, 采用回归分析方法。在数据处理前, 先通过计算离差的二次方和来确定回归直线, 即寻找一条直线, 使所有数据点与这条直线之间垂直距离的平方和为最小, 回归系数 b 计算公式为

$$b = \frac{\sum_{n=1}^n x_n y_n - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{n=1}^n x_n^2 - n \bar{x}^2} \quad (1)$$

式中, x 和 y 为开始与结束时间点对应的数据值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为开始与结束时间点对应的数据平均值; a 为负荷数据中的缺失端点; n 为数据量, $n \in [1, n_{\max}]$ [3]。

在确定缺失端点 a 的值时, 利用已知的回归系数 b , 结合缺失点前后的实际观测数据, 通过回归方程进行估算

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

由式(2)获取 a , 即处理完成配电台区负荷数据, 采用回归方程预测补偿的方法, 填补缺失的数据点, 保持数据的连续性和一致性, 保证配电变压器台区负荷数据采集的完整性。

建立负荷控制目标函数

为更好地控制配电变压器台区的三相负荷不平衡情况, 提出一种基于负荷相别平衡的控制策略, 通过智能调整和优化配电变压器台区的三相电流分布, 以降低三相不平衡度。为此, 建立一个目标函数, 综合考虑配电变压器台区三相不平衡度和用户负荷接入类型, 实现最佳的负荷控制。

假设变压器出口侧的三相电流有效值分别为 I_a 、 I_b 、 I_c , 则三相平均电流为

$$I_{abc} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (3)$$

三相电流与平均电流的差值为

$$\begin{cases} \Delta I_a = |I_a - I_{abc}| \\ \Delta I_b = |I_b - I_{abc}| \\ \Delta I_c = |I_c - I_{abc}| \end{cases} \quad (4)$$

最小化三相电流的不平衡度, 即实现降低三相电流与平均电流之间的差值的最小化。为实现这一目标, 关注负荷终端的机械开关的使用寿命和动作次数因素, 尽量减少换相开关的动作次数, 动作次

数可表示为

$$c = \sum_{i=1}^m \gamma_i \quad (5)$$

式中, m 为配电变压器台区负荷终端的个数; γ_i 为当前负荷终端的动作次数, 在系统的初始状态下, $\gamma_i=0$, 为配电变压器台区所有负荷终端尚未进行任何换相切换操作, 在实际运行过程中, 当负荷终端执行换相切换操作时, $\gamma_i=0$ 的值就会增加1 [4]。

由此可以建立三相负荷控制的目标函数为

$$J = \min \{ (\Delta I_{\max}), (Y) \} \quad (6)$$

要找到目标函数 J 的最小值, 同时满足三相不平衡度最小和终端用户的换相次数最小。

求解目标函数实现负荷不平衡控制

求解目标函数可以看作是多目标优化问题, 其中有两个主要的优化目标: 一是确保三相之间的负载尽可能平衡; 二是尽量减少终端用户所需的换相次数。由于目标函数 J 的复杂性往往源于各种实际负荷状况的多样性, 需要采集大量的数据来全面反映负荷的特性, 数据丰富性同时带来了处理和分析的难度。更有效地处理这些数据采用模糊C均值聚类算法来对负荷进行聚类分析, 将复杂的负荷状况划分为若干个具有代表性的类别, 针对每个类别分别进行优化, 从而找到使目标函数 J 取得最小值的三相负荷控制策略 [5]。

收集并记录某一时刻一系列终端数据, 并将这些数据整合为一个数据集 $X = \{x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n\}$, 集合包含了从 x'_1 到 x'_n 的多个数据点, 每个数据点 x'_i 是由四个特征指标 $[T, I, P, \lambda]$ 构成的多维矢量, 四个特征指标分别是时间 T 、当前终端负荷电流大小 I 、当前所接入的相别 P 以及配电变压器台区负荷终端的换相次数 λ [6]。为消除不同特征指标数量级对数据分析的影响, 对原始数据进行归一化处理

$$x_{ij} = \frac{x'_{ij} - x'_{\min,j}}{x'_{\max,j} - x'_{\min,j}} \quad (7)$$

式中, $x'_{\max,j}$ 为第 j 列中的最大值; $x'_{\min,j}$ 为第 j 列中的最小值, 利用极值将原始数据中的每个元素转换为归一化后的新元素 x_{ij} , 其值范围在0~1之间。

处理后的数据, 作为负荷聚类分析的负荷数据样本。采用模糊C均值聚类算法对这些负荷数据样本进行聚类分析, 基于样本内部的特征指标, 将负

荷数据样本划分为 C 类 ($2 < C < n$)，通过隶属度的方式对样本进行分类，定义其隶属度矩阵 $U=\{u_{ij}\}$ 和聚类中心矩阵 $V=\{v_i\}$ ，其中，隶属度矩阵 U 中的元素 u_{ij} 表示第 j 个样本点属于第 i 类的隶属度，聚类中心矩阵 V 中的元素 v_i 代表第 i 类的聚类中心在第 j 个特征指标上的值^[7]。

评估聚类效果根据模糊 C 均值算法建立目标函数

$$\begin{cases} J_m(U,V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2(x_j, v_i) \\ d_{ij}(x_j, v_i) = \|x_j - v_i\| = \left[\sum_{i=1}^c (x_j, v_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中， d_{ij} 为样本 x_j 到 v_i 的距离。

利用模糊 C 均值聚类算法进行迭代优化的过程，算法反复更新隶属度矩阵 U 和聚类中心矩阵 V ，直到找到使目标函数 J_m 取得最小值时最佳的负荷控制分类结果。

经过模糊 C 均值聚类算法的处理，将配电变压器台区负荷数据划分为 C 类，确保同一类负荷模式的负载能够均衡地分配到三相之中，进一步降低不平衡度，实现相别之间的平衡，完成配电变压器台区三相负荷不平衡控制。

实验

1. 实验准备

验证本文所提的控制方法在实际应用中的正确性和有效性，采用IEEE33节点配电网模型，在此基础上进行了针对性的改进。原始的IEEE33节点配电网模型是一个经典的配电网络模型，具有典型的放射状结构，适用于模拟和分析配电系统的各种运行状况。由于配电变压器台区具有其独特的电气特性和运行要求，对模型进行了改进，更好地反映配电变压器台区的实际情况。结构图如图1所示。

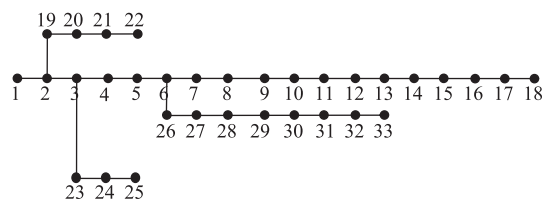


图1 IEEE33节点拓扑图

该拓扑模型是一个由33个节点构成的低压配电网模型，其中节点1为初始节点，代表着变压器

的出线端。除了节点1外，其余每个节点都带有负荷，这些负荷模拟了实际的用户用电情况，整个网络的电压等级为0.4 kV。在不显著增加装置成本的前提下实现有效的负荷控制，模型中随机选择12个单相负荷点作为执行单元的安装位置，节点分别是4,8,11,17,18,19,20,21,24,27,31和32。在这些节点上安装执行单元，实现对相应负荷的直接控制和调整。线路阻抗参照表见表1。

表1 线路阻抗

序号	线径	R/(Ω/km)
(1)	10	1.83
(2)	35	0.524
(3)	50	0.366
(4)	150	0.122
(5)	185	0.099

由于在换相前的初始状态下，配电变压器台区的三相负荷分布极不平衡，系统网损功率相对较高，不平衡负荷对系统效率造成了显著影响。使用本文方法对比进行实验控制，在实验过程中，当发现三相负荷不平衡时，逐步调整而不是一次性大幅调整来平衡负荷，减少实验过程中可能出现的电气冲击和潜在风险。

2. 实验结果及分析

本实验使用本文换相操作来改善配电变压器台区三相负荷不平衡的情况，监测不同时刻的电流数据来评估控制方法的有效性。换相后各指标信息结果见表2。

表2 换相后各指标信息结果

指标参数	时刻1		时刻2		时刻3	
	换相前	换相后	换相前	换相后	换相前	换相后
A相电流/A	486.7	322.5	430.4	323.3	521.6	368.8
B相电流/A	272.1	322.3	306.3	323.2	316.7	368.9
C相电流/A	208.6	322.6	233	323.5	268.5	369.1
三相不平衡度(%)	50.93	0.041	33.11	0.052	41.38	0.045

从表2数据看出，换相前三相电流存在较大的不平衡度，A相、B相和C相的电流值相差较大。特别是在时刻1和时刻3，三相不平衡度分别达到了50.93%和41.38%，表明此时配电变压器台区的三相负荷严重不平衡。经过换相操作后，三相电流的不平衡度得到了显著的改善。在时刻1、时刻2和时刻3的换相后，三相不平衡度分别降低至0.041%、

0.052%和0.045%，几乎达到了完全平衡的状态。表明换相操作对于改善配电变压器台区三相负荷不平衡问题是有效的。从电流数值上看，换相后A相、B相和C相的电流值更加接近，进一步验证了控制方法的有效性。综上所述，换相操作可以显著改善配电变压器台区三相负荷不平衡的情况，降低不平衡度并优化电流分布，在实际应用中具有较好的效果和可行性。

结束语

本文对配电变压器台区三相负荷不平衡控制方法进行了深入研究和探讨。综合分析现有技术和实际应用情况，提出一系列针对性的控制措施，有效地平衡配电变压器台区的三相负荷，提高电网的稳定性和效率，减少能源浪费和环境污染。但本文有一些不足之处，某些特定场景下的三相负荷不平衡问题，可能需要更加精细化的解决方案。实际应用中还需要考虑成本、技术可行性以及运维管理等方面的因素。未来，将继续关注配电变压器台区三相负荷不平衡控制技术的发展趋势，致力于探索更为高效、智能和环保的控制方法。EA

(收稿日期：2024-03-12)

参考文献

- [1] 王翔,王婧.基于智能选相开关的低压配电网台区负荷不平衡控制技术研究[J].电气技术与经济,2023(3):40-42.
- [2] 高俊.低压三相负荷不平衡治理控制策略[J].冶金与材料,2022,14(1):163-164.
- [3] 赵波,胡娟,程怡捷,等.一种配电变压器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.
- [4] 刘国伟,杨永,陈童.含分布式光伏的配电变压器台区三相不平衡动态控制策略[J].自动化技术与应用,2021,40(7):81-85+124.
- [5] 蒋一萌,王哲旭,毕重盈,等.结合负荷预测的三相不平衡智能调节技术[J].电工材料,2021(2):21-23+27.
- [6] 李娟,杜博.智能化建筑电气低压配电负荷平衡控制方法[J].计算机仿真,2021,38(4):73-77.
- [7] 丁一,张磐,王旭东,等.基于网络拓扑识别的负荷平衡控制策略研究[J].南开大学学报(自然科学版),2021,54(1):95-103.

