

# 基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法

张明泽<sup>1</sup>, 莲文鹏<sup>2</sup>, 艾欣<sup>1</sup>, 胡博伟<sup>2</sup>, 刘博<sup>2</sup>, 刘文彬<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院,  
天津 300072; 3. 国网山东电力科学研究院, 济南 410007)

**摘要:** 分布式新能源在配网中的大规模接入是实现碳中和目标的必要过程, 但由此引发的若干配网稳定性隐患问题需要重视。从庞大的配网数据中快速、有效地筛选出低压配电台区的薄弱环节, 从而进行针对性的优化改造具有重要意义。文中提出了一种基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法, 在众多指标中选取 5+1 项重要指标, 包括 5 项基础指标以及 1 项数据合格率指标, 随后对指标进行标准化处理; 为提高评价方法的合理性, 分别采用基于专家经验的序关系分析法和基于数据差异性的变异系数法, 得到各个指标的主观权重和客观权重; 通过拉格朗日最优乘子法对主观权重和客观权重进行优化, 得到各个指标的综合权重与评价函数, 并根据函数值得到低压配电网的健康状况进行最终评价结果。所提方法采用边缘计算的方式为通信和主站系统缓解计算压力, 通过对淄博市的 8 个低压台区进行评价分析, 结果表明所提方法更具有效性和客观性, 有望在实际系统中实施。

**关键词:** 低压配网; 碳中和; 分布式新能源; 边缘计算; 健康状态评价

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2024.05.014

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2024)05-0091-07

## A health status assessment method for low-voltage distribution network based on edge computing

ZHANG Mingze<sup>1</sup>, LUAN Wenpeng<sup>2</sup>, AI Xin<sup>1</sup>, HU Bowei<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>, LIU Wenbin<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China.  
2. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China.  
3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 410007, China)

**Abstract:** The large-scale integration of renewable distributed generations into the distribution network is a necessary process to achieve carbon neutrality, but the potential stability hazards brought in need to be treated seriously. It is of great significance to effectively screen the weak links in the low-voltage distribution network via data analysis, and carry out targeted optimization and improvement. Therefore, a health status assessment method for low-voltage distribution network based on edge computing is proposed in this paper. In the method, 5+1 indices are selected for the assessment of low-voltage distribution network, which are performed normalization processing before application. The subjective and objective weights of each evaluation index are obtained by the order relation analysis method and the variation coefficient method which simulate the expert knowledge respectively. The subjective weight and objective weight are optimized by Lagrange optimal multiplier method, and the comprehensive weight and evaluation function of each index are obtained. The health status of low-voltage distribution network is reasonably quantified the value of evaluation function. The proposed method is performed by edge computing in the smart terminals on site to relieve computing pressure for communication and main station systems. The evolution and analysis results of 8 low-voltage transformer stations in Zibo City prove the effectiveness and objectiveness of the proposed method, which can be implemented in practical power systems.

**Keywords:** low-voltage distribution network, carbon neutrality, distributed new energy, edge computing, health status assessment

### 0 引言

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(520600230011)

为了助力碳中和目标实现, 以光伏发电、风电

为代表的分布式发电正在逐步成为配网能源的重要组成部分<sup>[1]</sup>。多种电源及高渗透率下分布式发电不确定出力特性影响着配电系统整体可靠性<sup>[2-3]</sup>。因此,为了保证分布式电源大量接入后配电网的电能质量、供电可靠性和资产利用率,需要对配电网的健康状态进行合理评价,筛选出薄弱或者问题台区,以进行针对性的改造<sup>[4-5]</sup>。但我国幅员辽阔,不同地域的低压配电网在规模、结构、设备种类和数量方面差异较大,且运行方式多变,同时低压配网的实时量测系统尚未完备,导致难以统一评估配电网健康状态<sup>[6-7]</sup>。随着近几年智能配变终端的逐步安装普及,通过智能配变终端与低压配电设备的全面交互可实现台区状态全息感知,其为低压配网健康状态评价提供了数据基础。

从过去多年的研究来看,低压配网的健康状态评价方法已从传统的线路结构<sup>[8]</sup>和供电水平<sup>[9]</sup>逐步转向充电桩消纳<sup>[10]</sup>、分布式新能源消纳<sup>[11-12]</sup>以及电能质量综合评价<sup>[13]</sup>等方向,按类别其可分为安全性类、经济性类、可靠性类等。文献[14]从安全性角度分析了用户的用电风险因素,基于物元可拓理论量化评价重要电力用户的用电安全;文献[15]基于同时满足安全性与经济性的角度搜寻总体最优的配电网合环点,提出一种评价配电网合环点的双层方法;文献[16]采用基于熵权法的指标权重,综合安全性、经济性、可靠性的物元可拓模型对配网健康状态进行评价。上述方法需要用户的反馈信息,凭人工经验判断是否进行规划改造,当分析台区的样本数量较多时,人工经验无法进行最优决策,进而无法得到直观的定量评价结果。评价方法的关键在于评价体系的合理建立及各个指标的权重化,文献[17]基于序关系赋权方法确定指标权重建立评价体系;文献[18]以 0-10 标度法确定指标的综合权重为基础,建立低压配电网的综合评价体系;文献[19]基于数据的易获取性原则建立涵盖网架特征及负荷特征的台区特征指标体系,并通过改进型序关系分析法建立台区健康状态评价模型;文献[20]通过建立分层分区的配网分布式状态估计模型,结合加权最小二乘法对配电网进行实时分布式评估。上述方法需要数据中心提供数据计算分析,在评价指标中未考虑数据来源的可靠程度,如低压配网中偏远地区的网络环境对数据质量的影响,而数据质量的好坏直接影响到评价结果的误差的大小。

台区智能配变终端的应用,实现了低压配网的量测和感知,同时具备数据就地计算、存储的优势,无需将海量数据上传至主站,可以提高系统的效率

和经济性。因此,本文提出基于边缘计算的低压配网健康状态评价新方法。首先,遵循指标选择准确、规范、可比的原则,考虑低压配网的经济性、可靠性和安全性因素,且保证指标数据来源真实、可靠,筛选出具有代表性的低压配网状态评价关键指标,包括 5 项健康状态基础指标以及 1 项数据合格率指标,以台区为单位通过边缘计算方法对指标进行处理。具体为,首先进行一致化计算,然后,结合专家经验通过序关系分析法计算关键指标的主观性权重,同时采用变异系数法计算关键指标的客观性权重;主观权重和客观权重能够结合人工标准和数据差异更加合理的反映台区之间的区别;而后,通过拉格朗日最优乘子法计算主观权重与客观权重的综合权重。至此求得低压配网健康状态评价函数,通过评价函数值的大小综合评价各台区的健康状态,并由智能配变终端将结果上传至主站,评价结果可为电力公司提升低压配网的建设、运维、管理水平提供针对性的建议。

## 1 低压侧数据采集

配电网是能源互联网的基础组成,位于其末端的低压配电网具有特殊地位<sup>[21]</sup>。中国有 400 余万个低压台区,如图 1 所示,其低压侧的用电设备、分布式光伏、充电桩和众多用户形成了巨大的感知需求,智能配变终端汇总收集台区侧、低压侧以及用电侧的感知设备数据,可以从中筛选出特定的关键数据用于台区健康状态评价。

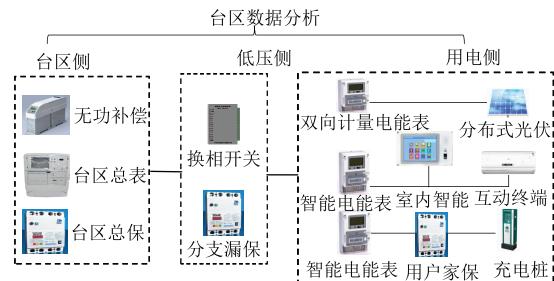


图 1 智能配变终端数据采集

Fig. 1 Data collection in smart distribution terminal

智能配变终端通过宽带载波和微功率无线通信的方式汇总收集的海量设备数据,并在终端处计算分析和存储。相比于将数据上传至主站后计算的传统模式,边缘计算方式可节省通信资源和成本,仅将目标台区数据分析计算后的结果上传<sup>[22]</sup>,实现分布式就地智能,无需主站参与进而提升系统研判效率,提高了社会效益和优质服务水平。

## 2 评价指标

合理评价低压配网台区的健康状态应考虑评价指标的普适性、实用性与关键性<sup>[23]</sup>。分布式新能

源接入对配网的影响主要包括可靠性、负载率和电能质量等方面<sup>[24]</sup>。依据供电可靠性评价标准<sup>[25]</sup>与配网规划设计技术导则<sup>[26]</sup>,本文在众多反映低压配网健康状态的基础数据中选取了 5+1 项最具代表性的关键指标,5 项健康状态指标包括供电半径、综合线损率、变压器负载率、用户电压合格率、三相负荷不平衡度,1 项数据合格率指标为感知数据合格率,各指标定义如下。

供电半径( $\eta_1$ )是评价低压配网台区健康状态的基础,可通过智能配变终端采集台区图模定位系统信息,计算台区供电范围的几何中心到边界的平均值。当低压配网供电距离较远时,会导致末端电压波动影响用户的电力设备,所以普遍规定低压配电线线路供电半径在市区不宜大于 300 m,近郊地区不宜大于 500 m,超过范围越大的台区健康状况越不理想。

综合线损率( $\eta_2$ )表示低压配电网的线路损耗功率与总供电功率的比值,其大小表征台区正常运行的经济性状况,当分布式光伏系统在末端接入时,可以有效减小系统的线损。综合线损率计算公式表示为:

$$\eta_2 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (1)$$

式中  $W_1$  和  $W_2$  分别为目标台区的供电总电量和售电总电量。

变压器负载率( $\eta_3$ )指台区变压器的有功功率与额定有功功率的比值。分布式新能源接入系统后,当变压器的运行位于经济曲线区间时,负载率越小则健康状态越优。而当变压器的运行位于经济曲线的上下限时,则分别表示变压器负载过重或变压器容量过大,对应负载率过大或者过小,影响新能源的消纳的同时,也会降低配网的稳定性。

$$\eta_3 = \frac{P_1}{P_0} \quad (2)$$

式中  $P_0$  和  $P_1$  分别为变压器的额定有功功率和实际有功功率。

电压合格率( $\eta_4$ )指累计运行时间内,实际运行电压在允许电压偏差范围内与总的统计时间的比值。分布式电源接入后引起的电源结构、潮流大小和方向、瞬时功率等变化均会引起电压波动,而电压合格率是用户满意度的重要参考,合格率较低将会导致用户频繁出现电器设备启动困难等情况,因此电压合格率达标问题是目前电能质量管理的重点<sup>[27-28]</sup>。

$$\eta_4 = 1 - \frac{T_1}{T_0} \quad (3)$$

式中  $T_1$  为电压越限时间;  $T_0$  为电压检测总时

间,也代表供电总时间。

三相负荷不平衡度( $\eta_5$ )表示累计运行时间内,配台区低压侧出口处最大相负荷与最小相负荷的差,与该时段内三相平均负荷的比值。三相负荷通常有一定偏差,当充电桩的接入功率过大,或者分布不均匀将导致三相电压不平衡,因此三相负荷不平衡度越小则台区健康状态越优。

$$\eta_5 = \frac{3 \max\{P_A, P_B, P_C\} - (P_A + P_B + P_C)}{P_A + P_B + P_C} \quad (4)$$

式中  $P_A, P_B, P_C$  为台区低压侧出口的 A、B、C 相负荷。

感知数据合格率( $\eta_6$ )指统计时间内除去坏数据后的样本数据占统计总数据的比值。智能配变终端采集的数据通常含有坏点、缺点等异常数据,对台区的整体态势感知造成一定误差,当数据质量较差时需要对设备进行改造升级,因此感知数据合格率越高则台区健康状态越优,评价结果越可信。根据垃圾依达准则,感知数据合格率计算公式为:

$$\eta_6 = 1 - \frac{\delta_1}{\delta_0} \quad (5)$$

式中  $\delta_1$  为数据中超过三倍标准差范围的离群点数量;  $\delta_0$  为样本数据总数量。

上述评价指标中,变压器负载率  $\eta_3$  属于区间指标; 用户电压合格率  $\eta_4$  与感知数据合格率  $\eta_6$  属于正向指标; 供电半径  $\eta_1$ 、综合线损率  $\eta_2$ 、三相负荷不平衡度  $\eta_5$  属于逆向指标。因此考虑将指标进行统一逆向化处理,各指标结果越小则台区健康状态越优,同时为了便于计算对各指标进行标准化处理,将各指标归一化至 [0,1] 区间内。

逆向指标  $\eta_1, \eta_2, \eta_5$  归一化公式为:

$$\eta_i^* = \frac{\eta_i - \eta_{i\min}}{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}} \quad (6)$$

区间指标  $\eta_3$  逆向化和归一化计算公式为:

$$\eta_i^* = \frac{|\eta_{i\text{mid}} - \eta_i|}{\max\{|\eta_{i\text{mid}} - \eta_i|\}} \quad (7)$$

式中  $\eta_{i\text{mid}}$  表示指标  $\eta_i$  区间的中点值。

正向指标  $\eta_4, \eta_6$  逆向化和归一化计算公式为:

$$\eta_i^* = \frac{\eta_{i\max} - \eta_i}{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}} \quad (8)$$

式中  $\eta_{i\max}, \eta_{i\min}$  分别表示对应指标  $\eta_i$  的最大值和最小值。

### 3 健康状态评价方法

本文选取了 5+1 项关键指标来评价低压配网中各个台区的健康状态,以台区为单位汇总智能配变终端采集的数据,通过终端边缘计算的方式对数据进行计算分析。具体为,数据预处理后,分别采用序关系分析法和变异系数法得到各评价指标的主观权重和

客观权重,通过拉格朗日最优乘子法得到各指标的综合权重,最终得到健康状态评价函数并将函数值上传至云主站,根据评价函数值的大小综合评价各台区的健康状态。

合理评价台区健康状态需要灵活考虑现场实际情况,对于不同台区,各评价指标的实际重要性可能有所不同,合理对待才能做出适宜的针对性决策<sup>[29-32]</sup>。序关系法基于层次分析法改进而来,克服了层次分析法决策结果单一固定与权重计算量较大的缺点,无需计算判断矩阵和一致性分析,可以模拟专家经验,因此可满足台区健康状态评价指标的主观权重计算需要。下面简要介绍序关系分析法的计算步骤。

(1) 对指标的序关系进行主观排序:根据台区健康状态评价指标的重要程度进行排序,结合专家主观意愿将  $m$  个指标按重要性关系排序为  $\eta_1 > \eta_2 > \dots > \eta_m$ 。

(2) 对相邻指标的相对重要性程度进行主观赋值:结合专家经验将评价指标  $\eta_{k-1}$  与  $\eta_k$  的重要程度之比  $r_k$  的理性判断为:

$$r_k = \eta_{k-1} / \eta_k \quad (9)$$

(3) 指标权重  $w_k$  的计算:专家给出理性  $r_k$  赋值后,指标权重  $w_k$  为:

$$w_k = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i)^{-1} \quad (10)$$

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (11)$$

区别于评价指标的主观权重,客观权重依据指标的实际值,通过真实数据的数学计算分析得出,反映指标数据之间的实际情况。变异系数法也称作信息量权重法,其思想在于利用数据的变异系数进行权重赋值,反映出指标实际值差异越大,则被评价单位的差距越大。因此变异系数的大小反映其携带的信息量的大小,表示权重的大小。各项指标的变异系数公式如下:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{\bar{x}_n} \quad (12)$$

式中  $\varepsilon_n$  是第  $n$  项指标的变异系数; $\sigma_n$  是第  $n$  项指标的标准差; $\bar{x}_n$  是第  $n$  项指标的均值。

指标的客观权重为:

$$s_n = \frac{\varepsilon_n}{\sum_{n=1}^m \varepsilon_n} \quad (13)$$

序关系分析法依据专家经验独立判断各个指标的重要程度,然后对指标权重进行综合计算,属于结合主观性的计算方法,但结果中缺少指标数据的差异性对权重重要性影响的考虑。变异系数法根据变化差异较大的指标权重较大,变化差异较小

的指标权重较小,基于指标的统计学规律确定其重要程度,方法本质属于客观赋权法,能够客观的反应指标数据的变化信息,体现出完全客观的权重赋值,但无法体现专家对不同属性指标的重视程度,导致赋权结果会与实际重要程度相差较大。因此,综合序数关系分析与变异系数法的方法,使各指标的权重更加合理客观,既反映了专家的经验的同时,也考虑了指标本身的信息。综合赋权通过计算主观权重  $w_i$  和客观权重  $s_j$ ,得到综合权重  $Z_i$ :

$$Z_i = \frac{w_i s_j}{\sum_{i=1}^n w_i s_j}, \quad i = j \quad (14)$$

根据最小化信息熵原理,令综合权重  $Z_i$  的结果与主观权重  $w_i$  和客观权重  $s_j$  尽可能接近,即:

$$\min E = \sum_{i=1}^n Z_i (\ln \frac{Z_i}{w_i}) + \sum_{j=1}^n Z_i (\ln \frac{Z_i}{s_j}), \quad i = j \quad (15)$$

综合权重系数可通过拉格朗日最优乘子法将约束优化问题转化为无约束优化问题,计算公式为:

$$Z_i = \frac{(w_i s_j)^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^n (w_i s_j)^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

$Z_n$  为第  $n$  个指标的综合权重,因此得到各台区健康状态评价函数向量为:

$$Y = \eta W \quad (17)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_{11} & \cdots & \eta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{m1} & \cdots & \eta_{mn} \end{pmatrix} \quad (18)$$

其中,  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$ ,  $Y_m$  为第  $m$  个低压配网台区健康状态评价函数; $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)^T$ ,  $\eta_{mn}$  为第  $m$  个台区第  $n$  个指标。

评价函数  $Y$  的值对应各个低压配网台区健康度,台区状态进行评价的结果参照表 1。

表 1 台区健康状态评价结果参考表

Tab. 1 Reference for health status evaluation results of stations

评价函数值	健康度评价结果
[0—0.25]	优
[0.25—0.5]	良
[0.5—0.75]	及格

#### 4 算例分析

为了检验所提评价方法的合理性,选取山东淄博市配电物联网后台系统中的 8 个低压台区数据,记为台区 1—8。已知专家结合现场实际情况将 5+1 个关键评价指标按重要性由高到低的顺序排序,

结果如表 2 所示;利用式(6)~式(8)对各项指标归一化结果如表 3 所示。

表 2 关键评价指标排序结果

Tab. 2 Key evaluation indices ranking results

各项指标编号	各项指标名称
$\eta_1$	用户电压合格率
$\eta_2$	三相负荷不平衡度
$\eta_3$	综合线损率
$\eta_4$	变压器负载率
$\eta_5$	感知数据合格率
$\eta_6$	供电半径

表 3 关键评价指标排序结果

Tab. 3 Ranking results of key evaluation indices

低压配	预处理后各项指标					
	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$\eta_5$	$\eta_6$
台区 1	0.008 4	0.016 5	0.000 0	0.174 8	0.258 6	0.000 0
台区 2	0.111 7	0.127 8	0.094 6	0.230 3	0.000 0	0.145 8
台区 3	0.226 7	0.786 2	0.454 4	0.190 2	0.234 0	0.344 2
台区 4	0.000 0	0.000 0	0.164 9	0.120 7	0.305 9	0.089 7
台区 5	0.247 9	1.000 0	0.014 5	0.113 4	0.183 6	0.167 1
台区 6	0.144 6	0.065 6	0.068 1	0.246 3	0.231 4	0.104 8
台区 7	0.064 3	0.191 1	0.157 3	0.239 4	0.354 2	0.170 2
台区 8	1.000 0	0.103 6	1.000 0	0.017 8	0.016 4	1.000 0

表 2 中关键指标的排序对应专家经验对各个指标重要性的判断,然后通过式(9)对相邻指标的相对重要性程度进行赋值,最终通过式(10)和式(11)计算各个关键指标的主观权重。限于篇幅,客观权重与综合权重的计算方法分别参考式(13)和式(16),计算结果参考表 4,台区健康状态评价结果参考表 5。

表 4 关键评价指标归一化结果

Tab. 4 Normalized results of key evaluation indices

权重	各项指标					
	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$\eta_5$	$\eta_6$
主观	0.163 4	0.126 5	0.194 1	0.096 8	0.213 5	0.205 7
客观	0.203 3	0.091 8	0.154 4	0.252 2	0.208 0	0.090 3
综合	0.187 2	0.120 4	0.167 9	0.183 1	0.209 7	0.131 7
AHP	0.099 7	0.207 0	0.242 8	0.217 4	0.094 5	0.138 6

表 5 台区健康状态评价结果对比

Tab. 5 Comparison of health status evaluation results in stations

低压台区	本文方法		AHP	
	评价函数值	健康状态	评价函数值	健康状态
台区 1	0.219 5	优	0.206 4	优
台区 2	0.237 1	优	0.243 1	优
台区 3	0.383 2	良	0.395 4	良
台区 4	0.185 3	优	0.178 7	优
台区 5	0.460 8	良	0.584 7	及格
台区 6	0.232 2	优	0.238 1	优
台区 7	0.203 6	优	0.245 0	优
台区 8	0.706 9	及格	0.804 5	差

为进一步说明所提方法的合理性,增加一组层

次分析法(AHP)的评价结果对比。AHP 是决策分析复杂问题的常见方法,通过 AHP 得到各指标的权重计算结果以及健康状态评价结果如表 4 和 5 所示。

由表 5 的结果对比可知,参与健康状态评价的 8 个台区中,采用本文方法的多数台区健康状态优,而台区 3 和 5 的健康状态良,台区 8 的健康状态及格,未出现健康度极差的台区。

结合表 4 和表 5,在健康状态优的台区中,台区 1 的供电半径和线损率最优,台区 2 的感知数据合格率最优,台区 4 的三相不平衡度和用户电压合格率最优,其他台区的各类指标基本相似。台区 3 因三相不平衡度较差,但其他指标平均较为良好,所以健康状态为良;台区 5 的用户电压合格率良好,略低于台区 3,但其他指标均优于台区 3,考虑到用户电压合格率的重要性,所以拉低了台区 5 的整体评价得分,结果合理且符合预期。台区 8 的供电半径、综合线损率和用户电压合格率均为及格,究其原因是因供电半径较大,导致线损率高于其他台区,当用电高峰时会出现电压不合格的用户,需提高应对分布式新能源的接入设备的配置水平,所以台区 8 的健康状态仅为及格。

通过与 AHP 方法的对比结果可知,AHP 方法将台区 5 的评价结果考虑的过于悲观,虽然台区 5 的用户电压合格率得分(0.247 9)略差于同为健康状态良的台区 3(0.226 7),但其他指标均要略优于台区 3,如综合线损率台区 5(0.014 5)优于台区 3(0.454 4),变压器负载率台区 5(0.113 4)优于台区 3(0.190 2),感知数据合格率台区 5(0.183 6)优于台区 3(0.234 0),供电半径台区 5(0.167 1)优于台区 3(0.344 2)。因此 AHP 仅给出及格的评价结果略显苛刻。同理,对于台区 8 的评价结果同样过于悲观,台区 8 的三相负荷不平衡度得分(0.103 6)、变压器负载率得分(0.017 8)、感知数据合格率得分(0.016 4)均属同类较优水平,AHP 方法仍未考虑台区 5 和台区 8 的良性得分指标,仅给出较差的评价结果。进一步分析参与健康评价的 8 个台区得分结果,感知数据合格率基本为良,由此证明低压感知的数据中常有缺点与坏点的情况存在,影响对台区的某些精准分析与决策,因此需要供电公司提升对低压侧感知数据的管理。

## 5 结语

配电网的多电源化发展影响配电系统整体可靠性,35 kV 及以上的配网对于分布新能源的消纳能力要远大于 10 kV 及以下的配网。为保障分布式新能源在配网末端接入后的安全稳定运行,本文提出一种低压配网健康状态评价方法,具备以下优势:

基于智能配变终端的全息感知技术与边缘计

算方式提升系统效率的同时降低总体成本,通过5+1项关键指标数据:供电半径、用户电压合格率、三相负荷不平衡度、综合线损率和变压器负载率,感知数据合格率建立了指标体系,该指标体系涵盖5项健康状态关键指标,且额外考虑了对采集数据合格率的考核。

智能配变终端对指标数据进行一致化处理后,结合各个指标的主观和客观权重系数,利用拉格朗日最优乘子法计算得到各台区健康状态评价结果。通过淄博市的某处低压配网的实例分析验证了该方法的有效性和客观性,依据与AHP方法结果的对比表明了本文的方法更加客观合理,可以有效提高低压配电网的筛选效率,支持我国配电网能源转型的建设。

各个指标的评价得分客观且明确,当台区总体健康状态评价结果较差时可以对照各指标评分结果对薄弱项进行重点关注,向上可为台区管理者提供了决策辅助,向下可对台区管理者形成监督。因此本文所提的台区健康评价方法相较于传统的独立分析方法更具有前瞻性与客观性,更具现实意义。

### 参 考 文 献

- [1] 曹敬,金玉龙,郑涛,等.计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):155-166.  
CAO Jing, JIN Yulong, ZHENG Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation clusters [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 155-166.
- [2] 张涛,霍然,刘景,等.基于柔性互联技术的含高渗透率新能源配电网多目标优化运行[J].智慧电力,2021,49(9):1-7,55.  
ZHANG Tao, HUO Ran, LIU Jing, et al. Multi-objective optimal operation of distribution network with high penetration of new energy based on flexible interconnection technology [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 1-7, 55.
- [3] 郭国栋,徐倩雯,龚雁峰.考虑需求响应的互联交直流混合微电网的分布式经济调度模型[J].电测与仪表,2023,60(5):116-125,153.  
GUO Guodong, XU Qianwen, GONG Yanfeng. A distributed economic dispatching model for networked hybrid AC/DC microgrids considering demand response [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 116-125, 153.
- [4] 孙黎霞,王中一,戴洪,等.计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):64-74.  
SUN Lixia, WANG Zhongyi, DAI Hong, et al. The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 64-74.
- [5] 孙钰茗,郭成,方正云.基于Edgex Foundry的配电网无功电压云边协同控制方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(21):126-135.  
SUN Yuming, GUO Cheng, FANG Zhengyun. Cloud edge collaboration control of reactive power and voltage in a distribution network based on Edgex Foundry [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 126-135.
- [6] 佟曦,侯朗博,孙昊,等.高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J].智慧电力,2023,51(10):31-37,102.  
TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization of distribution networks with high proportion of PV and EVs [J]. Smart Power, 2023, 51(10): 31-37, 102.
- [7] 吉兴全,刘小虎,张玉敏,等.基于WGPR的三相不平衡配电网鲁棒状态估计方法[J].智慧电力,2023,51(11):61-68.  
JI Xingquan, LIU Xiaohu, ZHANG Yumin, et al. Robust state estimation method for three-phase unbalanced distribution network based on WGPR [J]. Smart Power, 2023, 51(11): 61-68.
- [8] 潘锋,张宇俊,周敏.一种基于接线模式的中压配电网综合评价方法[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):19-21,35.  
PAN Feng, ZHANg Yujun, ZHOU Min. A comprehensive evaluation hierarchy for MV distribution network based on connection modes [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 19-21, 35.
- [9] 徐志飞.中压配电网供电能力评价体系研究及应用[D].北京:华北电力大学,2013.  
XU Zhifei. The research and application of the medium voltage distribution network power supply ability evaluation system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [10] 张祥文,江星星,王龙,等.配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):14-20.  
ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [11] NIJHUIS M, GIBESCU M, COBBEN J F G. Assessment of the impacts of the renewable energy and ICT driven energy transition on distribution networks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1003-1014.
- [12] 查鹏程,甘雅丽,高海祐,等.电动汽车充电站接入配电网的电能质量评估[J].电测与仪表,2022,59(6):69-75.  
CHA Pengcheng, GAN Yali, GAO Haiyou, et al. Quality assessment of electric vehicle charging stations accessing distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 69-75.
- [13] 朱自伟,黄彪,裘昕月,等.基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度[J].太阳能学报,2022,43(5):90-97.  
ZHU Ziwei, HUANG Biao, QIU Xinyue, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on suppressing wind and photovoltaic power fluctuation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 90-97.
- [14] 赵建立,周雯娟,郑庆荣,等.基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估[J].电力系统保护与控制,2015,43(23):71-77.  
ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan, ZHENG Qingrong, et al. Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 71-77.
- [15] 冯欣桦,黎洪光,郑欣,等.计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):30-37.

- FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [16] 邓健, 王壮壮, 袁在忍, 等. 基于物元可拓模型的光伏发电综合效益评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 117-125.
- DENG Jian, WANG Zhuangzhuang, YUAN Zairen, et al. Comprehensive benefit evaluation of photovoltaic power generation based on matter element extension model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 117-125.
- [17] 欧阳森, 陈欣晖, 耿红杰. 基于功效系数法的低压配网台区电压特性评估[J]. 华南理工大学学报, 2015, 43(8): 35-40.
- OUYANG Sen, CHEN Xinhui, GENG Hongjie. Evaluation of voltage characteristics of low-voltage distribution network based on efficacy coefficient method[J]. Journal of South China University of Technology, 2015, 43(8): 35-40.
- [18] 曹阳, 孟晗辉, 赵力, 等. 基于层次分析法的新农村低压配电网综合评估方法[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 68-72.
- CAO Yang, MENG Hanhui, ZHAO Li, et al. A comprehensive evaluation method of new rural low-voltage distribution networks based on analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 68-72.
- [19] 欧阳森, 杨家豪, 耿红杰, 等. 面向台区管理的台区状态综合评价方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 187-192, 207.
- OUAYNG Sen, YANG Jiaohao, GENG Hongjie, et al. Comprehensive evaluation method of transformer area state oriented to transformer area management and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 187-192, 207.
- [20] 黄哲洙, 金鹏, 王洋, 等. 含光伏发电的配电网分布式状态估计方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 167-178.
- HUANG Zhezhu, JIN Peng, WANG Yang, et al. Distributed state estimation for distribution network with photovoltaic power generation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 167-178.
- [21] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108-3116.
- LV Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3116.
- [22] 栾文鹏, 吕军, 徐丙垠. 新型配电系统智能感知、分析与优化运行[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 201-202.
- LUAN Wenpeng, LV Jun, XU Bingyin. Intelligent perception, analysis and optimization of new power distribution system[J]. Global Energy Internet, 2022, 5(3): 201-202.
- [23] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 31-78.
- [24] 尚黎杰, 蔺红. 分布式电采暖负荷参与系统经济调度策略[J]. 太阳能学报, 2023, 43(8): 352-359.
- SHANG Lijie, LIN Hong. Economic dispatch strategy of distributed electric heating load participation system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 43(8): 352-359.
- [25] DL/T 836-2012, 供电系统用户供电可靠性评价规程[S].
- [26] DL/T 5729-2016, 配电网规划设计技术导则[S].
- [27] 王海云, 于希娟, 张雨璇, 等. 大型城市电网下分布式光伏承载力评估分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 260-264.
- WANG Haiyun, YU Xijuan, ZHANG Yuxuan, et al. Evaluation and analysis of distributed photovoltaic carrying capacity in large urban power grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(6): 260-264.
- [28] 刘蕊, 吴奎华, 冯亮, 等. 含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 189-197.
- LIU Rui, WU Kuihua, FENG Liang, et al. Voltage partition coordinated optimization control of active distribution network of high penetration distributed PVs[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 189-197.
- [29] 陈晨, 闫向阳, 齐桓若, 等. 基于 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 97-108.
- CHEN Chen, YAN Xiangyang, QI Huanruo, et al. An evaluation method of a roof photovoltaic access distribution network based on the weight of FAHP-improvement CRITIC combination[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 97-108.
- [30] 刘智超, 吐松江·卡日, 马小晶, 等. 基于云相似度与证据融合的电力变压器状态评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 79-90.
- LIU Zhichao, TUSONGJIANG · Kari, MA Xiaojing, et al. Condition assessment method for power transformers based on cloud similarity and evidence fusion[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 79-90.
- [31] 王小雷, 宋耐超, 史雷敏, 等. 基于边缘计算的台区状态综合评价方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 132-138.
- WANG Xiaolei, SONG Naichao, SHI Leimin, et al. Comprehensive evaluation method of transformer area status based on edge computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 132-138.
- [32] 林跃欢, 黄彦璐, 田兵, 等. 配电网低电压治理方案动态评价方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 74-80.
- LIN Yuehuan, HUANG Yanlu, TIAN Bing, et al. Research on dynamic evaluation method of low-voltage governance scheme in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 74-80.

## 作者简介:



张明泽(1991—),男,通信作者,博士研究生,从事配电物联网关键技术、配电网故障诊断等研究。  
Email: 1172101058@ncepu.edu.cn

栾文鹏(1966—)男,博士生导师,教授,从事电力数据分析、电力负荷监测、物联网技术应用等研究。Email: wenpeng.luan@tju.edu.cn

艾欣(1964—),男,博士生导师,教授,从事电力系统分析与控制、新能源电力系统特性与多源互补等研究。Email: aixin@ncepu.edu.cn

胡博伟(2000—),男,硕士研究生,从事智能配电系统建模与分析研究。Email: hubowei@tju.edu.cn

刘博(1988—),男,博士,讲师,从事非侵入式电力负荷监测与分解、配用电大数据分析与应用等研究。Email: liubo@tju.edu.cn

刘文彬(1985—),男,从事配电网故障诊断等研究。  
Email: 17615800860@163.com

收稿日期:2024-01-04; 修回日期:2024-02-18

(王克祥 编发)