引用格式:竺炜,黄宁晓,舒慧莹,等.台区三相电压不平衡的主导特征识别及指标构建[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):141-149. **Citation:** ZHU Wei,HUANG Ningxiao, SHU Huiying, et al. Dominant feature identification and index construction of three-phase voltage imbalance in substation area[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(2):141-149.

台区三相电压不平衡的主导特征识别及指标构建

竺 炜,黄宁晓,舒慧莹,胡 捷,唐 明

(长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙410114)

摘 要:配网台区(变压器)数量巨大,三相不平衡现象普遍。由于台区单相负荷的随机性大,三相电压的各相幅值 排序与传统算法的不平衡度都会随时变化。基于采样数据的特征分析,得到各台区三相电压在某时段的主导各相 幅值(即有效值)差异,识别严重不平衡台区,以便人工治理。该方法是平衡成本与效益的可行办法。该文构建了 各台区三相电压的时序矩阵,提出了一种基于奇异值分解的各相幅值差异主导特征分析与指标构建方法。研究结 果表明:最大奇异值对应的子矩阵是原三相电压时序矩阵的绝对主导成分;从左奇异向量可得到主导各相幅值的 排序;由最大奇异值与左奇异向量构建三相主导不平衡度指标。该方法解决了各项幅值排序随时变化的问题,可 以唯一确定任选时段的各相幅值。采用算例验证了该不平衡度指标的主导性、唯一性。基于该指标,通过识别一 人工治理的滚动循环,可提升并保持配网的整体三相平衡水平。该研究具有较好的实用价值。

关键 词:配网台区;三相电压不平衡;主导特征;奇异值分解;不平衡度指标

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.015 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2025)02-0141-09

Dominant feature identification and index construction of three-phase voltage imbalance in substation area

ZHU Wei, HUANG Ningxiao, SHU Huiying, HU Jie, TANG Ming

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: With a large number of power distribution substations (transformers), three-phase imbalance is a commonly observed issue. Due to the high randomness of single-phase loads in the substation area, the amplitude ranking of threephase voltages and the imbalance degree according to the traditional algorithm change constantly. Based on the feature analysis of the sampled data, differences in the dominant phase amplitudes of three-phase voltages in each substation area during a certain period of time are obtained, identifying the severely unbalanced substation area for manual intervention. This serves as a feasible method to balance costs and benefits. A time-series matrix of the three-phase voltages for each substation area is constructed in this paper, and a method for analyzing the dominant features of phase amplitude differences based on singular value decomposition (SVD) and constructing related indexes is proposed. The results show that the submatrix corresponding to the maximum singular value is the absolute dominant component of the original three-phase voltage time-series matrix. The ranking of the dominant phase amplitudes can be obtained from the left singular vector, and the three-phase dominant imbalance index can be constructed using the maximum singular value and the left singular vector. This method addresses the problem of constantly changing phase amplitude ranking and can determine the amplitude of each phase for any selected time period. A test case verifies the dominance and uniqueness of the proposed imbalance indexes. Based on the proposed indexes, through a rolling cycle of identification and manual intervention, the overall three-phase balance of the distribution network can be improved and maintained. The findings offer valuable practical guidance.

Key words: distribution substation area; three-phase voltage imbalance; dominant feature; singular value decomposition; imbalance index

收稿日期:2023-06-24;修回日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金(52077009);湖南省教育厅重点项目(20A013);长沙理工大学研究生实践创新项目(CLSJCX22092) 通讯作者:竺炜(1968一),男,博士,教授,主要从事电力系统稳定分析与控制等方面的研究;E-mail:738660686@qq.com

配网台区(变压器)低压侧的三相电压不平衡 度是评估电能质量的重要指标之一^[1-3]。台区低压 侧存在大量的单相用户。据统计,中国农网地区的 单相负荷的占比超过70%,沿海发达省份的单相负 荷占比甚至可超过90%^[2]。2015年,江西省全省三 相不平衡度未达标台区占该省总台区数的四分之 一;2018年,山东省全省60%以上的台区均存在较 为严重的三相不平衡现象^[4-7]。

近年来,大量家庭光伏发电(总功率小于8 kWp) 与家用电动汽车充电桩的单相接入,加剧了台区三 相不平衡问题^[8-12]。台区低压侧三相负荷不平衡与 电压不平衡这两个问题之间互为因果,影响了10 kV电路侧的三相电压的平衡度。

台区低压侧的三相不平衡会引发诸多问题^[13-16]。对于台区变,因三相不平衡而产生的零序 电流,会产生磁滞和涡流损耗,增大铜损和铁损,引 起发热,加速设备的绝缘老化;对于空调等大型三 相负荷,三相不平衡电压的负序分量,对电动机起 到了制动作用,增大功率损耗;对于一般单相负荷, 高相电压容易导致用电设备烧毁;低相电压则会影 响用电设备正常工作。此外,三相不平衡还会导致 综合线损增加^[17-18]。

目前, 解决三相不平衡问题的方法主要有以下4种。

1)装设自动换相装置。根据周期采样即时计 算不平衡度。通过目标函数的设定,根据各时刻的 不平衡度,阈值启动自动换相装置,进行相间负荷 转供^[19-21]。

2)台区低压侧通过相间差异化无功补偿,以平 衡三相电压^[13]。

3)负荷不对称调补。通过并联补偿网络,将三 相不平衡负荷补偿至三相平衡^[22-23]。

4)人工调整。通过加强台区负荷管理,人工调整负荷所属相序,保证三相负荷的均衡性^[24-25]。但低压配网规模大、结构复杂且变化频繁,台区数量 多,三相不平衡度随时变化。若广泛采用自动化硬件装置的办法,则需要相当大的资本投入,其维 护成本也很高,且频繁调整产生的冲击也会影响 380 V线路侧的供电质量。若采用人工方式及时相 间负荷转供,则人力成本高企,难以承受。

综上所述,须根据配网实际情况,平衡成本投 入与不平衡治理的效益。目前,中国配网已具备台 区及用户负荷的实时采样系统与精干的运行管理 队伍。先在已发生过的时间内任选时段(如一天或 一周)的采样数据进行分析,可得到该时段内所有 台区的总体三相不平衡度及各相幅值(即有效值, 下同)排序;然后,从中筛选出严重不平衡台区;最 后,转为人工方式进行相间转供。这不失为满足边 际效益的可行办法。通过时段大数据来评估一筛 查台区与人工治理的循环,虽不能一直保持最佳的 三相平衡,但可降低地区配网的整体不平衡度并提 升供电质量。

该办法的关键问题是,针对时刻变化的三相不 平衡度及各相幅值排序,如何才能得到任选时段内 各台区唯一的总体各相幅值差异。由于某一时段 内台区三相电压的时序数值序列并不总是正相关 的,故平均值法并不适用。本文基于时序矩阵奇异 值分解,研究主导不平衡度分析与相关指标构建方 法,获取各台区在该时段的主导不平衡度及各相幅 值排序,为严重不平衡台区识别及相间负荷转供提 供依据。

1 三相电压不平衡的指标及问题

1.1 当前三相电压不平衡度的指标

对三相电压不平衡状态进行评估是电能质量 评估中的重要一环。目前,常用三相电压不平衡度 对系统内任意时刻的三相不平衡状态进行评估,主 要计算方法可分为以下4类^[26-27]。

1)《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008)的算法。

①《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543— 2008)采用负序与正序分量的比值、零序与正序分量 的比值来计算三相电压不平衡度,其负序电压不平 衡度 $\epsilon_0(t)$ 和零序电压不平衡度 $\epsilon_0(t)$ 计算式分别为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{2}(t) = \frac{U_{2}(t)}{U_{1}(t)} \times 100\% \tag{1}$$

$$\varepsilon_0(t) = \frac{U_0(t)}{U_1(t)} \times 100\%$$
(2)

式(1)、(2)中,t为时间; $U_0(t)$ 、 $U_1(t)$ 、 $U_2(t)$ 分别为 三相电压的零序、正序和负序分量的时间函数。

② 在忽略零序分量(即三相三线制)的前提下, 《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008) 提出了另一种简化算法来计算三相电压不平衡度, 即负序分量占比L(t)。

$$L(t) = \frac{U_{\rm A}^4(t) + U_{\rm B}^4(t) + U_{\rm C}^4(t)}{\left(U_{\rm A}^2(t) + U_{\rm B}^2(t) + U_{\rm C}^2(t)\right)^2}$$
(3)

式中, U_A、U_B、U_C分别为A、B、C三相电压的相电压

有效值。

该负序不平衡度ε₂(t)计算式为

$$\varepsilon_{2}'(t) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L(t)}}{1 + \sqrt{3 - 6L(t)}}} \times 100\% \qquad (4)$$

2) 电气与电子工程师协会(institute of electrical and electronics engineers, IEEE)标准算法。

① IEEE std 936-1987使用相电压有效值U_A、 U_B、U_c之间的极差与相电压均值U_{avg}之间的比值 来计算三相电压不平衡度,其电压不平衡度计算方 法I_{PVUR,936}(t)为

$$U_{\rm avg}(t) = \frac{U_{\rm A}(t) + U_{\rm B}(t) + U_{\rm C}(t)}{3}$$
(5)

 $I_{\rm PVUR, 936}(t) = \frac{\max U(t) - \min U(t)}{U_{\rm avg}(t)} \times 100\%$ (6)

式(5)、(6)中, $U(t) = \{U_{A}(t), U_{B}(t), U_{C}(t)\}$

② IEEE std 112-1991 中用相电压有效值 U_A、 U_B、U_c与相电压均值 U_{avg}之间的最大差值来计算 三相电压不平衡度,其电压不平衡度 I_{PVUR,112}(t)计 算方法为

$$U_{\rm avg}(t) = \frac{U_{\rm A}(t) + U_{\rm B}(t) + U_{\rm C}(t)}{3}$$
(7)

$$I_{\rm PVUR,\,112}(t) = \frac{\max \Delta U_{\rm PV}(t)}{U_{\rm avg}(t)} \times 100\%$$
 (8)

式(7)、(8)中, $\Delta U_{PV}(t) = \{ |U_A(t) - U_{avg}(t)|, |U_B(t) - U_{avg}(t)|, |U_C(t) - U_{avg}(t)| \}_{\circ}$

3) 国际大电网委员会(international council on large electric systems, GIGRE)算法。

GIGRE采用线电压来计算三相电压不平衡度,即负序分量占比。其电压不平衡度 *I*_{LVUR,GIGRE}(*t*)计算式为

$$L(t) = \frac{U_{\rm AB}^4(t) + U_{\rm BC}^4(t) + U_{\rm CA}^4(t)}{\left(U_{\rm AB}^2(t) + U_{\rm BC}^2(t) + U_{\rm CA}^2(t)\right)^2}$$
(9)

$$I_{\rm LVUR, GIGRE}(t) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L(t)}}{1 + \sqrt{3 - 6L(t)}}} \times 100\% \quad (10)$$

式(9)、(10)中, U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 分别为AB、BC、CA两相之间的线电压有效值。

4) 美国电器制造商协会(national electrical manufactures association, NEMA)算法。

NEMA采用线电压来计算三相电压不平衡度, 其电压不平衡度 I_{LVUR, NEMA}(t)计算式为

$$U_{\rm avg}(t) = \frac{U_{\rm AB}(t) + U_{\rm BC}(t) + U_{\rm CA}(t)}{3} \quad (11)$$

$$I_{\text{LVUR, NEMA}}(t) = \frac{\max \Delta U_{\text{LV}}(t)}{U_{\text{avg}}(t)} \times 100\% \quad (12)$$

式 (11)、(12) 中, $\Delta U_{LV}(t)$ 为一个包含 $|U_{AB}(t) - U_{avg}(t)|$ 、 $|U_{BC}(t) - U_{avg}(t)|$ 和 $|U_{CA}(t) - U_{avg}(t)|$ 的集合。

综上所述,只有《电能质量 三相电压不平衡》 (GB/T 15543—2008)的算法采用了零序、负序分量 描述三相不平衡度。其目的是通过抑制零序、负序 分量达到三相平衡。在国际上,通常直接分析相电 压、线电压的不平衡度。这些算法的共同点是根据 每个采用时刻数据计算三相不平衡度,且该指标均 不含各相幅值的排序信息。

1.2 现有三相不平衡指标的主要问题

台区低压侧的三相电压时刻在变化,故每个时 刻的不平衡度也在变化,其从高到低的相电压排序 也随时变化,其结果分别如图1、2所示。在图2中, 各时刻的不平衡度计算分别基于式(7)、(8)。



图1 台区低压侧三相电压时序曲线

Figure 1 Three-phase voltage time-series curve of low-voltage side of substation areas





time points on low-voltage side of substation areas

中国的县级供电公司都有成千上万的台区变。 面对数量众多且三相电压随时变化的台区变,基于 任一时刻的不平衡度评估都不具有代表性。而其 各相幅值排序的变化,也导致仅采用某时段不平衡 度的均值评估失去了合理性。这就是现有不平衡 度指标的主要问题。

因此,现有三相不平衡指标无法表征任选时段

内各台区的总体各相幅值差异。但获取该信息则 是筛查严重不平衡台区与人工治理的前提。

2 台区三相时序电压主导特征提取

2.1 时序矩阵的构建及奇异值分解

以某典型日为所选时段,基于各台区低压侧的 三相电压采样数据,构建各台区的时序电压矩阵。 对该矩阵进行奇异值分解,分析该典型日各台区三 相电压的相间时序特征。

设某10kV线路的台区序号为*j*,日采样次数为 *n*,则该台区二次侧三相电压的时序矩阵*U*,为

$$U_{j} = \begin{bmatrix} U_{jA1} & U_{jA2} & \cdots & U_{jAi} & \cdots & U_{jAn} \\ U_{jB1} & U_{jB2} & \cdots & U_{jBi} & \cdots & U_{jBn} \\ U_{jC1} & U_{jC2} & \cdots & U_{jCi} & \cdots & U_{jCn} \end{bmatrix}$$
(13)

式中, U_{jAi} 、 U_{jBi} 、 U_{jCi} 分别为j号台区二次侧A、B、C 三相电压在i时刻的电压有效值大小。

式(13)所示的时序矩阵U,可分解为

 $U_{j} = \sigma_{1j} w_{1j} v_{1j}^{H} + \sigma_{2j} w_{2j} v_{2j}^{H} + \sigma_{3j} w_{3j} v_{3j}^{H}$ (14) 式中,正实数 σ_{ij} 为矩阵 U_{j} 的奇异值,i = 1, 2, 3, 且 $\sigma_{1j} \ge \sigma_{2j} \ge \sigma_{3j}$; 向量 $w_{ij} = (w_{ij,1}, w_{ij,2}, w_{ij,3})^{T}, v_{i} =$ $(v_{ij,1}, v_{ij,2}, \dots, v_{ij,n})^{T}$ 分别为奇异值 σ_{ij} 对应的左、右奇 异向量。

则 $\sigma_{ij} w_{ij} v_{ij}$ 可进一步展开为

$$\sigma_{ij}\boldsymbol{w}_{ij}\boldsymbol{v}_{ij}^{\mathrm{H}} = \sigma_{ij} \begin{bmatrix} w_{ij,1} \\ w_{ij,2} \\ w_{ij,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ij,1} & v_{ij,2} & \cdots & v_{ij,n} \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过奇异值分解,将台区三相电压的时序矩阵 U_j 分解为3个不同时序特征与其幅值特征的子矩阵 $\sigma_{1j} w_{1j} v_{1j}^{\text{H}}, \sigma_{2j} w_{2j} v_{2j}^{\text{H}} \models \sigma_{3j} w_{3j} v_{3j}^{\text{H}}$ 。

2.2 台区电压各相幅值差异的主导特征提取

式(14)中的子矩阵 $\sigma_{ij}w_{ij}v_{ij}$, *i*=1,2,3,其行向 量之间是线性相关的,即这些行向量具有相同的时 序特征;其列向量之间也是线性相关的,即这些列 向量也具有相同的幅值差异特征。奇异值 σ_{ij} 的大 小对应着各子矩阵的权重大小。

奇异值 σ_{ij} 实际上是原矩阵数据在相应坐标轴 上的方差。 σ_{ij} 值越大,该数据在该坐标轴上离散程 度越大,可获取的信息量越多。由于奇异值具有 $\sigma_{1j} \ge \sigma_{2j} \ge \sigma_{3j}$ 的衰减特性,故 $\sigma_{1j} w_{1j} v_{1j}^{H}$ 为台区三相电 压时序矩阵 U_i 的主导成分。

令子矩阵 $\sigma_{ij}w_{ij}v_{ij}$ 的权重 δ_{ij} 为

$$\delta_{ij} = \sigma_{ij}^2 / \sum_{ij=1}^3 \sigma_{ij}^2, i = 1, 2, 3$$
 (16)

由式(16)可知, δ_{1j} 越大,其对应的主导矩阵 $\sigma_{1j}w_{1j}v_{1j}^{H}$ 在 U_{j} 中的主导性越大,该子矩阵越能近似代表时序矩阵 U_{jo}

在主导矩阵 $\sigma_{1j}w_{1j}v_{1j}^{H}$ 中,右奇异向量 v_{1j} 表征该 台区三相电压在典型日的主导时序特征;而 $\sigma_{1j}w_{1j}$ 则表征相间电压差异的主导幅值特征。

3 主导不平衡度指标构建及严重不 平衡台区识别

3.1 三相时序电压的主导不平衡度指标构建

根据式(14)、(16),可得到台区三相电压时序 矩阵 U_j 的主导成分 $\sigma_{1j}w_{1j}v_{1j}$,以此来对三相电压时 序矩阵 U_j 进行不平衡分析。故三相时序电压序列 U_A 、 U_B 、 U_C 的主导序列 U_{Adm} 、 U_{Bdm} 、 U_{Cdm} 分别为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{\text{Adm}} \\ \boldsymbol{U}_{\text{Bdm}} \\ \boldsymbol{U}_{\text{Cdm}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\sigma}_{1j} \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{1j,1} \\ \boldsymbol{w}_{2j,1} \\ \boldsymbol{w}_{3j,1} \end{bmatrix} \boldsymbol{v}_{1j}^{\text{H}}$$
(17)

根据式(7)、(8)、(17),构建某典型日的台区时 序三相电压的主导不平衡度指标,即

$$I_{\rm PVUR,\,dm} = \frac{\Delta U^{\rm max}}{U_{\rm avg}} \times 100\%$$
(18)

其中,

$$U_{\rm avg} = \frac{U_{\rm Adm} + U_{\rm Bdm} + U_{\rm Cdm}}{3}$$
(19)
$$\Delta U_{\rm dm}^{\rm max} =$$

$$\max\left(|U_{\text{Adm}} - U_{\text{avg}}|, |U_{\text{Bdm}} - U_{\text{avg}}|, |U_{\text{Cdm}} - U_{\text{avg}}|\right)$$
(20)

$$\begin{cases}
U_{Adm} = |\sigma_1 w_{11,1}| \\
U_{Bdm} = |\sigma_1 w_{21,1}| \\
U_{Cdm} = |\sigma_1 w_{31,1}|
\end{cases}$$
(21)

式(18)~(21)中, $I_{PVUR,dm}$ 为时序三相电压的主导不 平衡度; U_{Adm} 、 U_{Bdm} 、 U_{Cdm} 分别为典型日的台区低压 侧A、B、C三相电压的主导幅值; U_{avg} 为它们的平均 值; ΔU_{dm}^{max} 为各相电压主导幅值与平均值的最大 偏差。

3.2 基于主导不平衡度的严重不平衡台区识别

基于 σ₁ w₁向量的台区三相电压不平衡分析,可 避免相电压随机波动的不利影响,得到典型日各台 区唯一的三相主导(即总体)不平衡度。

故可根据式(18)的指标 *I*_{PVUR,dm},对某典型日配 网的所有台区三相电压的主导不平衡度进行排序。 *I*_{PVUR,dm}值越大的台区,其三相电压主导不平衡程度 越大。也可设定 *I*_{PVUR,dm} 阈值,检查超出阈值的严重 不平衡台区,将其作为治理目标,进行负荷转供,以 提高三相电压的平衡度。该流程如图3所示。



图3 台区三相电压不平衡治理流程



4 算例分析

1) 某线路台区的三相电压及不平衡度的变化。
 本文以湖南省某地市电网公司的一条10kV线
 路为实例,其线路拓扑如图4所示。





Figure 4 10 kV power line topology

在图4中,该线路台区共8个,基于电网大数据 平台,取某典型日的24个整点数据,8个台区的低压 侧三相电压如图5所示。从图5中可以看出,各台 区三相电压变化且随机性大,各相幅值排序也会变 化。根据式(7)、(8),采用不同时刻的三相电压不 平衡度的变化如图6所示。

从图6中可以看出,传统三相不平衡度指标值 随时间变化,且该传统方法无法描述各相幅值排序 的变化。

2) 台区三相电压时序矩阵的主导特征分析。

根据式(14),对8个台区低压侧的三相电压时 序矩阵U_j进行奇异值分解,得到的奇异值大小及主 导阵权重,结果见表1。

由表1可知,时序矩阵 U_j 的第一个奇异值 σ_{1j} 远 大于其他2个奇异值。由权重值 δ_1 可知, $\sigma_{1j}w_{1j}v_{1j}^H$ 是 U_j 的绝对主导矩阵,其时序曲线如图7所示。

在图 7 中,主导三相电压曲线的幅值取决于 $\sigma_{1j} \boldsymbol{w}_{1j}; 波动特征取决于 \boldsymbol{v}_{1j}^{\text{H}}; 各相幅值排序取决于 \boldsymbol{w}_{1j}$ 中的元素大小排序,其排序结果见表 2。该结果也 与图 6的结果相吻合。



Figure 5 Time-series curves of three-phase voltage in substation areas

表1 各台区三相电压时序矩阵的奇异值及主导阵权重

Fable 1	Singular	values	and o	lominant	matrix	weights	of three-

phase voltage time-series matrix in substation areas

台区	σ_{1j}	σ_{2j}	σ_{3j}	δ_{1j}
1	1 957.08	47.21	37.86	99.90
2	1 958.63	28.33	22.24	99.97
3	1 951.94	39.29	33.96	99.93
4	1 949.17	38.25	23.87	99.95
5	1 948.26	22.48	14.21	99.98
6	1 950.05	51.99	27.52	99.91
7	1 948.06	32.58	25.10	99.96
8	1 949.45	47.67	32.32	99.91







从图 5、7 中可以看出,在任选时段内,随机波动的台区三相时序电压通过奇异值分解,得到的三相 主导成分是线性相关的,各相幅值差异特征(即比值)是唯一的,故主导不平衡度及各相幅值排序也 是唯一的。

3) 三相时序电压不平衡度及不平衡台区识别证。

根据表 1、2 中的 σ_{1j} 、 $| w_{11,1} |$ 、 $| w_{21,1} |$ 、 $| w_{31,1} |$,由式(18)~(21),可得各台区三相电压的当日主导不 平衡度 $I_{PVUR,dm}$ 。

在图 5 中,时变不平衡度的当日平均值 I_{PVUR,avg}与前者的对比结果如图 8 所示。从图 8 中可看出,



Figure 7 Time-series curves of dominant matrix of three-phase voltage in substation areas

表2 各台主导各相幅值排序的取决因素



台区	$igwedge w_{11,j}$	$oldsymbol{w}_{21,j}$	$ w_{31,j} $	各相幅值由大 到小排序
1	0.579 8	0.584 2	0.568 0	B-A-C
2	0.580 1	0.613 9	0.535 4	B-A-C
3	$0.565\ 1$	0.581 8	0.584 9	C-B-A
4	0.575 0	0.573 7	0.583 3	С-А-В
5	0.577 9	0.572 9	0.581 2	С-А-В
6	0.588 0	0.563 4	0.580 4	А-С-В
7	0.578 6	0.565 5	0.587 7	C-A-B
8	0.598 9	0.5827	0.549 4	A-B-C



图8 台区主导不平衡度与平均不平衡度对比



各台区的主导 *I*_{PVUR,dm} 与平均 *I*_{PVUR,avg} 的差异是台区 的三相幅值排序当日变化与不同导致的。传统故 不平衡度的均值 *I*_{PVUR,avg} 无实际意义。

由于奇异值分解后的主导矩阵σ₁, w₁, v₁^H包含恒 定的各相幅值差异特征,故某时段的台区主导不平 衡度指标 I_{PVUR,dm}是唯一的,可提供不平衡台区治理 的主导关键信息。

根据国标《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008),设定 *I*_{PVUR.dm} 阈值为2%。从图8中 可看出,台区2、8、6、3的不平衡度均不达标,这些台 区均为三相时序电压严重不平衡台区,需进行人工 负荷转供治理。

5 结语

为获取严重不平衡台区识别及治理的关键信息,本文基于各台区三相电压的时序矩阵的奇异值 分解,得到了任选时段内各台区电压的各相幅值差 异及排序的唯一主导特征,据此构建了主导不平衡 度指标。研究表明:

1) 分解得到的子矩阵 $\sigma_{1j}w_{1j}v_{1j}^{H}$,其权重占比 $\delta_{1j} > 99\%$,可表征原三相时序矩阵的主导特征。

 2)向量σ_{1j}w_{1j}可表征该时段内台区三相电压的 主导各相幅值差异及排序。

3)由σ_{1j}w_{1j}可构建主导三相电压不平衡度指标
 *I*_{PVUR,dm},该指标在任选时段内是唯一的。

台区三相电压随机变化,保持巨量台区的三相 实时平衡,设备与人工投入均成本巨大。根据本文 方法,可得到任选时段的各台区各相幅值差异的唯 一主导特征,以识别严重不平衡台区并进行人工转 供,维持一段时间的基本平衡。通过识别评估与人 工治理的滚动循环,不断实施精准不平衡治理,提 升并保持配网的整体三相平衡水平。该研究具有 较大的实用价值。

参考文献:

- [1] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理 关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.
 KANG Peng,GUO Wei,HUANG Weigang, et al. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(24):1-12.
- [2] 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 distribution area[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9):2185-2193.

 [3] 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(17):50-52.
 QIN Junsheng, WEI Bing. Survey of three-phase unbalance treatment technology in low-voltage distribution network[J]. Electric Engineering, 2022(17): 50-52.

- [4] 肖白,赵雪纯,董光德.电能质量综合评估方法综述与展望[J].发电技术,2024,45(4):716-733.
 XIAO Bai, ZHAO Xuechun, DONG Guangde. Summary and prospect of comprehensive evaluation methods of power quality[J]. Power Generation Technology, 2024, 45 (4):716-733.
- [5] 张程彬,崔明建,张梓枭,等.考虑攻击偏好的三相不平 衡配电系统分布式 FDIA 检测[J].电力系统保护与控 制,2024,52(24):109-119.
 ZHANG Chengbin,CUI Mingjian,ZHANG Zixiao, et al. Distributed FDIA detection for three-phase unbalanced distribution systems considering attack preferences[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 109-119.
- [6] 陈申宇,陈维,刘起蕊,等.基于序优化的配电网负荷三相不平衡优化策略研究[J].智慧电力,2024,52(3): 102-109.

CHEN Shenyu, CHEN Wei, LIU Qirui, et al. Three-phase unbalance optimization strategy for Distribution Network Load Based on Order Optimization Algorithm [J].Smart Power,2024,52(3):102-109.

 [7] 高僮,刘大勇,郭莉,等.长春地区配电网三相不平衡现状分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2014,15(4): 47-49+65.

GAO Tong, LIU Dayong, GUO Li, et al. The analysis to three-phase imbalanced situation in distribution network

of Changchun Area[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 15(4): 47-49+65.

[8] 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.

CHEN Jiachao,LI Qinhao,TANG Yuan,et al. Three-phase balance optimization of low-voltage distribution network considering photovoltaic phase selection and switching [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 71-78.

[9] 郑在涛,叶保璇,钟康骅,等.基于预测滚动的有源低压 配电网三相不平衡治理方法[J].电网与清洁能源,2023, 39(1):29-36.

ZHENG Zaitao, YE Baoxuan, ZHONG Kanghua, et al. A predictive rolling-based three-phase unbalance management method of low-voltage active distribution network[J].Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 29-36.

- [10] RAZIQ H, BATOOL M, RIAZ S, et al. Power quality improvement of a distribution system integrating a large scale solar farm using hybrid modular multilevel converter with ZSV control[J]. Ain Shams Engineering Journal,2023,14(7):102218.
- [11] 陈璐,王璨,胡昊,等.三相不平衡配网下电动汽车有序充电控制策略[J].电气传动,2022,52(11):42-50.
 CHEN Lu, WANG Can, HU Hao, et al. Orderly charging control strategy for electric vehicles in three-phase unbalanced distribution network[J]. Electric Drive, 2022, 52(11):42-50.
- [12] 卢宇,吴小丹,雷家兴,等.电网不平衡工况下模块化多电平矩阵变换器控制策略[J].电力工程技术,2023,42
 (4):195-205.

LU Yu, WU Xiaodan, LEI Jiaxing, et al. Control strategy of the modular multilevel matrix converter under unbalanced grid condition[J].Electric Power Engineering Technology,2023,42(4):195-205.

[13] 杨云龙,王凤清.配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J].电网技术,2004,28(8): 73-76.

YANG Yunlong, WANG Fengqing. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution transformer and countermeasures[J]. Power System Technology,2004,28(8):73-76.

[14] 郭陆,张广东,刘康,等.750 kV变压器电压不平衡两 相补偿快速计算方法[J].高压电器,2023,59(1):102-108.

GUO Lu, ZHANG Guangdong, LIU Kang, et al. Fast calculation method of two-phase compensation for voltage unbalance of 750 kV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1):102-108.

 [15] 姚伟,刘彦彦,于振江.三相不平衡对配电变压器效率影
 响数学建模与分析[J].电力系统及其自动化学报,2023, 35(10):140-147.
 YAO Wei, LIU Yanyan, YU Zhenjiang. Mathematical

modeling and analysis of effect of three-phase unbalance on distribution transformer efficiency[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35(10):140-147.

 [16] 谢荣斌,杜帆,程湘,等.三相不平衡及谐波对三相四线 低压配电网线损的影响[J].电力系统保护与控制,2020, 48(21):22-30.

XIE Rongbin, DU Fan, CHENG Xiang, et al. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 22-30.

- [17] 郝思鹏,蔡欣灵,张仰飞,等.三相不平衡与线损的量化 分析[J].电网技术,2021,45(4):1547-1552.
 HAO Sipeng, CAI Xinling, ZHANG Yangfei, et al. Quantitative analysis between three-phase unbalance and line losses[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1547-1552.
- [18] 谭煌,于海波,刘婧,等.基于三相不平衡网络能量流的 高比例新型源荷配电台区碳排放流计算[J].供用电, 2024,41(7):55-62+83.

TAN Huang, YU Haibo, LIU Jing, et al. Carbon emission flow calculation for high proportion new source-load distribution station area based on three-phase unbalanced network energy flow[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7):55-62+83.

[19] 李家桥,王国帮,张明乐,等.面向台区三相不平衡治理的自动换相装置选址定容规划[J].电力系统自动化, 2022,46(19):62-69.

LI Jiaqiao, WANG Guobang, ZHANG Mingle, et al. Siting and sizing planning of automatic commutation device for three-phase unbalance mitigation in distribution station area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19):62-69.

[20] 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.

HU Zhiqiang, YE Yuanyu, YU Lingang, et al. Active load participation in automatic balancing of three-phase load imbalance in low-voltage substation areas[J]. Electric Power, 2024, 57(2):49-54.

[21] 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.

ZHAO Bo, HU Juan, CHENG Yijie, et al. An automatic balancing control method on unbalanced three-phase

loads of distribution transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):41-47.

[22] 王茂海,孙元章.通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷 补偿中的应用[J].中国电机工程学报,2003,23(11): 56-59.

WANG Maohai, SUN Yuanzhang. Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 56-59.

 [23] 李英量, 白博旭, 朱琦, 等. 基于电动汽车充电站的不平衡 配电网自愈及优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 37-46.

LI Yingliang, BAI Boxu, ZHU Qi, et al. Self-healing and optimal operation of unbalanced distribution network based on electric vehicle charging station[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6):37-46.

[24] 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.

[25] 王思韡,刘型志,宣妹,等.基于线损等效的视在功率和 功率因数计算方法研究[J].电测与仪表,2024,61(9): 65-70.

WANG Siwei, LIU Xingzhi, XUAN Shu, et al. Research on apparent power and power factor calculation methods based on line loss equivalence[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(9):65-70.

- [26] 周林,张有玉,刘强,等.三相不平衡度算法的比较研究
 [J].华东电力,2010,38(2):210-215.
 ZHOU Lin, ZHANG Youyu, LIU Qiang, et al. Comparative study of three-phase unbalance algorithm
 [J].East China Electric Power,2010,38(2):210-215.
- [27] 朱明星,李开金.低压配电网三相不平衡度计算方法与应用[J].电测与仪表,2019,56(2):41-46.
 ZHU Mingxing, LI Kaijin. Calculation method and application of three-phase unbalance in low voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(2):41-46.

- (上接第130页 Continued from page 130)
- [27] FAHIM S R, SARKER Y, SARKER S K, et al. Self attention convolutional neural network with time series imaging based feature extraction for transmission line fault detection and classification[J]. Electric Power Systems Research,2020,187:106437.
- [28] 郑炜,林瑞全,王俊,等.基于GAF与卷积神经网络的电能质量扰动分类[J].电力系统保护与控制,2021,49(11): 97-104.

ZHENG Wei, LIN Ruiquan, WANG Jun, et al. Power quality disturbance classification based on GAF and a convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control,2021,49(11):97-104.

 [29] 赵妍,孙延,聂永辉.基于格拉姆角差场和迁移残差网络的 HVDC线路故障识别[J].电力建设,2024,45(8):118-127.
 ZHAO Yan, SUN Yan, NIE Yonghui. HVDC line fault identification based on the gram angle difference field and transfer residual network[J]. Electric Power Construction,2024,45(8):118-127.

[30] 贺才郡,李开成,杨王旺,等.基于双通道GAF和深度残 差网络的电能质量复合扰动识别[J].电网技术,2023,47 (1):369-379.

HE Caijun, LI Kaicheng, YANG Wangwang, et al. Power quality compound disturbance identification based on dual channel GAF and depth residual network[J]. Power System Technology,2023,47(1):369-379.

- [31] MIYAZAKI R, WANG T C, USUDA T S. Simplification of the gram matrix eigenvalue problem for quadrature amplitude modulation signals[J].Entropy,2022,24(4):544-562.
- [32] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2016:770-778.