

考虑谐波严重程度的长时间尺度谐波责任划分方法

张逸, 郭俊煜, 邵振国

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对现有谐波责任划分方法未考虑不同谐波严重程度下责任所造成的实际影响差异,提出一种考虑谐波严重程度的长时间尺度谐波责任划分方法。考虑谐波数值分布与变化趋势两方面因素划分工况,并计算各工况综合权重量化谐波严重程度;基于典型相关性分析原理筛选长时间尺度数据,并根据谐波责任定义式估算谐波责任;结合上述综合权重获取长时间尺度综合谐波责任划分指标;采用仿真算例与实测数据进行验证,与传统方法相比,所提方法可反映各谐波源在长时间尺度下不同次数谐波造成的累计影响,更适用于谐波精准治理与公平奖惩工作。

关键词:谐波责任划分;谐波严重程度;长时间尺度;谐波变化趋势;工况划分

中图分类号:TM71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202303043

0 引言

随着新能源与电力电子设备的广泛应用,电力系统的谐波污染问题越发严重和复杂。准确量化各用户所发射谐波对电网公共连接点(point of common coupling, PCC)谐波电压的影响,合理划分谐波用户的责任,可以规范谐波用户接入电网行为,并为治理用户谐波问题、制定用户谐波奖惩方案提供理论依据^[1]。

已有谐波责任划分研究主要包括波动量法^[2]、协方差法^[3]、盲源分离法^[4-5]、线性回归法^[6-7]四大类非干预式方法,通过分析背景谐波电压分布情况^[8]或使用数据筛选方法^[9-10]降低背景谐波干扰,再利用谐波电压投影原理计算得到各用户在该时间段内的谐波责任。其中:波动量法与盲源分离法需要输入谐波数据具有相位信息,从现有在线监测系统数据中较难获取;协方差法与线性回归法在有、无相位信息情况下均可进行责任划分计算。上述方法对推进谐波责任准确评估具有重要意义,可以计算得到各采样时间段的一系列责任占比。而电力系统中谐波源用户的谐波责任波动受本身生产工况的影响,在一定程度上体现出日周期性^[11]。且现有责任划分实例数据多依赖人工测试获取,所得数据通常为小时级^[2-4],难以反映各用户完整工况变化特征,需对具有较完整用户用电周期特性的长时间尺度数据进行责任划分。

谐波责任为各谐波源间的相对责任,谐波严重程度为各谐波源造成的绝对影响大小。在长时间尺

度下,用户的谐波特性随运行工况变化,各谐波源责任占比反映的实际谐波影响也随之改变。例如在某谐波源的谐波责任占比相同而谐波严重程度不同时,谐波严重程度较高时段谐波源引起的谐波损耗、发热、振动与导致设备减少的使用寿命将远大于谐波严重程度较低时段。在谐波影响的严重程度变化时,相同责任占比反映的实际谐波影响也随之改变。谐波严重程度主要有谐波数据数值大小与其变化趋势两方面:一方面,数值大小是最基本的严重程度判断指标,如文献[12-13]中均设置阈值定义超标与评估等级;另一方面,谐波时序数据的趋势特性体现了其变化的缓急,分析各谐波源谐波电流与PCC谐波电压趋势特性的关联程度可以反映各用户对PCC造成影响的助增或助减情况。又由于谐波是长期存在的稳态电能质量问题,造成的损失是长期累积的结果^[14],为获得适合的长时间尺度谐波责任指标^[15],应考虑谐波责任随时间变化产生的累计影响,量化谐波严重程度。同时,长时间尺度的累计谐波责任可以减小因谐波发生特性变化而引起的责任变动。

关于谐波责任划分指标的选取方面,文献[16]利用多层次模糊综合评判法解决了各次谐波责任无法统一、电压/电流责任无法统一的问题。在长时间尺度的谐波责任划分指标方面,文献[17]通过计算谐波电压数据与各用户平均有功功率数据的典则相关性来划分谐波责任,但未考虑长时间尺度数据的趋势变化和谐波严重程度的不同。文献[18]以采样时段时长为权重,将各采样时段内的谐波责任进行加权求和得到长时间尺度的责任指标,但将各采样时段责任直接相加,忽略了长时间尺度下各时段谐波严重程度的不同。

为了准确划分各谐波源在长时间尺度下的整体谐波责任,本文提出一种考虑谐波严重程度的长时间尺度谐波责任划分方法。首先,考虑数值分布与

收稿日期:2022-09-20;修回日期:2023-03-14

在线出版日期:2023-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777035)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777035)

变化趋势两方面因素来评估谐波问题的严重程度,划分数值分布工况与变化趋势工况,并构建各谐波源的数值分布、谐波电流超国标、PCC 谐波电压超国标与变化趋势严重程度这4种权重指标;然后,基于电压投影与典型相关性分析原理进行多谐波源责任划分,并结合权重与谐波责任划分结果求得用户的综合谐波责任;最后,通过仿真算例与现场实际案例分析,验证所提方法的有效性。

1 考虑谐波严重程度的综合权重指标

1.1 长时间尺度电能质量监测数据工况划分

1.1.1 基于云模型的数值分布工况划分

实际电网中各谐波源的运行状态随时间变化,不同运行状态造成的实际谐波影响不同,需根据其运行状态进行工况划分。谐波影响情况直接体现在监测数据数值大小上,不同PCC处谐波电压数值量级却有较大差异,导致统一的工况阈值划分标准难以确定。故本文基于云模型方法提取各PCC谐波电压长时间尺度数据分布特征,逐次分析谐波序列各数据点间的相对严重程度。文献[19]中通过云模型进行谐波异常检测,本文借鉴其思路构建谐波电压数据云模型,通过3倍标准差原则将数据从小到大分为不同等级,并以离群数据占比指标 N 划分工况,具体步骤如下。

首先,由于实际测量得到的样本可能并不服从正态分布,样本标准差 S 与正态分布标准差 δ 存在差异,根据 $3S$ 边界确定谐波严重度阈值存在缺陷。故本文通过构建谐波电压数据不确定性云模型避免此问题的发生。通过逆向云发生器提取输入数据期望 E_n 、熵 E_n 与超熵 H_n 这3种特征,使用正向云发生器构建如附录A图A1所示的谐波云。取云模型外边界曲线 μ_1 为基准,根据正态分布的 3δ 准则,按谐波数据分布情况从小到大形成 $(-\infty, \mu-2\delta]$ 、 $(\mu-2\delta, \mu-\delta]$ 、 $(\mu-\delta, \mu+\delta]$ 、 $(\mu+\delta, \mu+2\delta]$ 、 $(\mu+2\delta, +\infty)$ 这5个数据严重度区间,其中 $\mu=E_n$ 、 $\delta=E_n+3H_n$ 。并根据所分严重度区间阈值将输入谐波数据初步划分为多个数值严重度分布工况,判断各工况内数据点主要所属严重度区间,将数据量小于输入数据总数10%的工况并入临近工况中。

然后,构建离群数据占比指标 N ,筛选离群点以进一步优化数值分布工况。其中,若某一工况中数据序列长度为 m ,不属于此工况对应主要严重度区间的离群数据个数为 l ,则有:

$$N=l/m \quad (1)$$

最后,将各工况划分点逐个移至其临近离群点处,遍历找到能使其两侧工况的离群点总和最少位置,即为所分共 z 个工况的最优划分点。设第

$j(j=1, 2, \dots, z)$ 个工况离群数据为 N_j ,当所分各数值分布工况的离群数据总和 $\sum_{j=1}^z N_j$ 最小时,即为各谐波源谐波电压的最优数值分布工况。

1.1.2 基于分段线性化的变化趋势工况划分

各次谐波数据在不同时段内的趋势上升、下降程度体现了各谐波源对PCC对应次数谐波影响的助增、助减情况。从奖惩角度出发,当不同谐波源产生的谐波影响相近时,其趋势信息可表征造成该影响的快慢,即区分短期高值的突发性问题与长期低值的持续性问题,应对此进行量化并反映在谐波责任中。故分析对应次数谐波电压数据的变化趋势划分工况,并逐工况分析各用户谐波电流对PCC谐波电压的影响情况,以便在此基础上对缓解或加剧PCC谐波问题严重程度的用户进行区分奖惩。

本文采用改进分段线性化(piecewise linear representation, PLR)方法进行工况划分,其是一种寻找时间序列的主要特征点,并将特征点以直线相连的数据处理方法,可通过对数据的压缩、降噪提取时序数据的变化特征。参考文献[20]中的改进PLR方法,以数据到两点连线的垂直距离为依据,循环选择输入数据分段点,并通过判别拟合误差与子段长度对分段优先级进行排序,以提升PLR的效率与效果。各分段点即为变化趋势主要特征点,实现对数据序列的重要趋势信息提取与工况划分,便于后续对所分变化工况中谐波电压与谐波电流的趋势关系进行进一步分析。

通过上述2种工况划分方法从不同角度得到长时间尺度数据的不同工况,并在后续责任划分时以2种不同工况在时间序列上的交集作为分析时的最小工况,以更好地反映数据段局部特征。

1.2 综合考虑谐波严重程度的权重指标

1.2.1 权重指标计算流程

本文提出的考虑谐波严重程度的权重指标计算步骤如下。

步骤1:导入长时间尺度的PCC谐波电压数据与各谐波用户谐波电流数据,通过云模型与 3σ 准则划分数值分布工况,并根据PLR方法划分变化趋势工况,取2种工况时间序列上的交集作为所分析的最小工况。

步骤2:使用模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)计算各谐波源所关注次数谐波在PCC处产生的谐波电压数值分布 a_D 、谐波电流超国标 a_I 、PCC谐波电压超国标 a_U 与变化趋势严重程度 a_T 这4类权重指标间重要程度的一级评判权重 $A=[a_D, a_I, a_U, a_T]$ 。FAHP将模糊数学与层次分析法结合,可以定性、定量地处理决策性问题,本文通

过该方法确定各项指标间的相对权重,FAHP的具体流程见附录B。按照附录B表B1所示的0.1—0.9标度法^[16]将各因素两两相互比较,构建如式(2)所示的各谐波源4类权重指标间重要程度的一级判断矩阵 J_1 。

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过FAHP计算得 J_1 归一化后的特征向量为 $A=[a_D, a_I, a_U, a_T]=[0.200, 0.233, 0.267, 0.300]$ 。

步骤3:针对输入数据总长度为 m 的分析工况,逐工况计算系统侧与第 k 个用户在对应分析工况内 i 时刻反映4个权重指标本身情况的二级评判权重 $B_{k,i}=[b_{D,i}, b_{I,i}, b_{U,i}, b_{T,i}]$,按式(3)计算分析工况整体的二级评判权重 B_k 。

$$B_k = \sum_{i=1}^m B_{k,i} / m \quad (3)$$

步骤4:整合得到数据长度为 m 的分析工况内,系统侧与第 k 个用户在 i 时刻考虑谐波严重程度的综合权重 $W_{k,i}$ 与所有时刻总综合权重 W_k ,如式(4)所示。

$$W_k = \sum_{i=1}^m W_{k,i} / m = \sum_{i=1}^m AB_{k,i}^T / m \quad (4)$$

1.2.2 数值分布权重

首先,基于1.1.1节所划分的谐波数值分布严重度区间,结合表B1将各数值分布区间相互比较,构建如式(5)所示的各区间所对应的模糊互补判断矩阵 J_2 。通过FAHP算得各严重度区间从小到大的权重分别为0.150、0.175、0.200、0.225、0.300。分析总长度为 m 的输入序列中各数据点所属严重度区间情况,逐点取得其数值分布权重指标 $b_D=[b_{D,1}, b_{D,2}, \dots, b_{D,m}]$ 。

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

然后,从数值严重程度角度,根据实际运行经验和管理要求,当PCC处谐波电压含有率或某用户注入PCC的谐波电流超出GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》中的谐波标准限值时,其谐波问题的严重程度将大幅提升。因此,本文提出了用户谐波电流超国标权重指标 b_I 与PCC谐波电压超国标权重指标 b_U 。为避免对数值大小影响进行重复加权,在数据未超国标时权重指标取为0;当数据超出国标时权重取1。逐点取得长度为 m 的输入数据序列的谐波电流超国标权重 $b_I=[b_{I,1}, b_{I,2}, \dots, b_{I,m}]$ 、谐

波电压超国标权重 $b_U=[b_{U,1}, b_{U,2}, \dots, b_{U,m}]$ 。

1.2.3 变化趋势权重

设输入一组长度为 m 的谐波电压数据,根据1.1.2节中的方法划分得到 z 个变化趋势工况,计算第 j 个工况内的谐波电压数据 $U_{PCC,j}$ 与谐波电流数据 I_j 的皮尔森相关系数 ρ_j ,如式(6)所示。

$$\rho_j = \frac{\text{cov}(U_{PCC,j}, I_j)}{\sqrt{D(U_{PCC,j})} \sqrt{D(I_j)}} \quad j=1, 2, \dots, z \quad (6)$$

式中: $\text{cov}(\cdot, \cdot)$ 表示协方差; $D(\cdot)$ 为方差。相关性指标主要关注曲线之间的相似程度,除此因素外,数据本身升降的快慢也是衡量时序数据趋势特征的重要指标。如在谐波电压与谐波电流数据均上升时,其趋势重要性应大于两者均下降的情况。为更合理地提取输入数据序列的趋势特征,本文引入各谐波电流斜率信息对整体相关系数序列进行修正,得到数据变化趋势严重程度指标。

逐一计算最小二乘法计算所划分出的 z 个工况内输入谐波电流数据序列 $I_j=[i_{1,j}, i_{2,j}, \dots, i_{m,j}]$ 的斜率值 k_j ,各谐波电流数据对应时间为 x_i 。

$$k_j = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i i_{i,j} - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m i_{i,j}}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2} \quad (7)$$

根据式(8)将 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 的角度空间从小到大的均匀映射至 $(0, 1)$, $\theta_j \in (-90^\circ, 90^\circ)$ 为斜率值 k_j 对应角度,得到各工况趋势修正系数 α_j 。

$$\alpha_j = (\theta_j + 90^\circ) / 180^\circ = (\arctan k_j + 90^\circ) / 180^\circ \quad (8)$$

计算输入谐波电流数据在第 j 个工况中的变化趋势严重程度权重 $b_{T,j}$,可得:

$$b_{T,j} = \alpha_j \rho_j \quad (9)$$

最终得到长度为 m 的输入谐波电流数据的变化趋势严重程度权重 b_T ,表示数据序列在一定时间尺度内的变化趋势特征。

$$b_T = [b_{T,1}, b_{T,2}, \dots, b_{T,z}] =$$

$$\left[\underbrace{b_{T,1}, \dots, b_{T,1}}_{\text{窗口1}}, \underbrace{b_{T,2}, \dots, b_{T,2}}_{\text{窗口2}}, \dots, \underbrace{b_{T,z}, \dots, b_{T,z}}_{\text{窗口}z} \right] \quad (10)$$

2 考虑谐波严重程度的长时间尺度责任划分指标

2.1 基于典型相关性分析的数据滑动筛选方法

在电网实际运行时,背景谐波往往是波动的,背景谐波投影并非常数,线性回归计算结果误差较大^[8]。典型相关性分析是在2组多变量数据中选取若干个具有代表性的综合变量(变量的线性组合),

通过综合变量间的相关性反映 2 组数据间的整体相关性,实现了谐波电压与谐波电流间一对多数据分析,结合滑窗思路可快速且全面地筛选出背景谐波电压波动较小的有效数据段。在长时间尺度数据量与数据波动均较大情况下,此方法较现有逐谐波源数据筛选方法^[9]更为适用。

典型相关性分析方法针对给定的 2 组变量 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 、 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ (其中 x_i, y_i 均为 $1 \times m$ 维向量),进行归一化并通过优化方法提取有代表性的 2 个综合变量 X' 和 Y' (X' 和 Y' 均为 $1 \times m$ 维向量),原则为使 X' 和 Y' 的相关性最强,即 X', Y' 为 X, Y 中变量的最优线性组合。

筛选背景谐波电压波动较小的部分,即为筛选综合变量与 PCC 谐波电压相关性较强的部分,可通过计算综合变量 X' 和 Y' 的皮尔森相关系数 r 实现。通常当 2 组数据的相关系数 $r \geq 0.8$ 时,认为这 2 组序列呈强相关性。

由于相关性分析方法的筛选对象为一段数据,为保证数据筛选的准确性与筛选后的数据量,对谐波数据进行滑窗筛选。将各谐波源谐波电流数据与 PCC 谐波电压数据按相同方式截取长度为 t 的分析窗框,逐窗口进行典型相关性分析。设第 j 段数据段的相关系数为 r_j ,当 $r_j \geq r_{th}$ (r_{th} 为相关系数阈值)时,说明第 j 段数据背景谐波电压波动较小,则各谐波源谐波电流与 PCC 谐波电压的第 j 段数据可以用于计算投影系数;否则说明第 j 段数据不可用,舍去。

2.2 本文谐波责任划分整体流程

基于电压叠加投影的谐波责任划分原理已在文献[4-10]中详细介绍,具体流程见附录 C,此处不再赘述。本文针对 PCC 关注谐波次数进行各用户谐波责任量化,得到考虑谐波严重程度的多谐波源责任划分指标,其制定整体流程如图 1 所示。

与综合考虑谐波严重程度的权重指标相同,在所划分的数值分布工况与变化趋势工况基础上,首先对各工况数据进行滑窗典型相关性分析,筛选出工况中背景谐波电压波动较小部分;然后在短时间尺度谐波电压叠加投影责任划分研究的基础上求得第 k 个谐波源用户在数据长度为 m 的分析工况内各时刻的谐波责任 $H_{k,i}$;最后结合综合权重计算结果得到用户 k 在 i 时刻考虑谐波严重程度的动态谐波责任 $F_{k,i}$ 与该分析时间段的总责任指标 F_k ,分别如式 (11)、(12) 所示。

$$F_{k,i} = W_{k,i} H_{k,i} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$F_k = \sum_{i=1}^m F_{k,i} / m \quad (12)$$

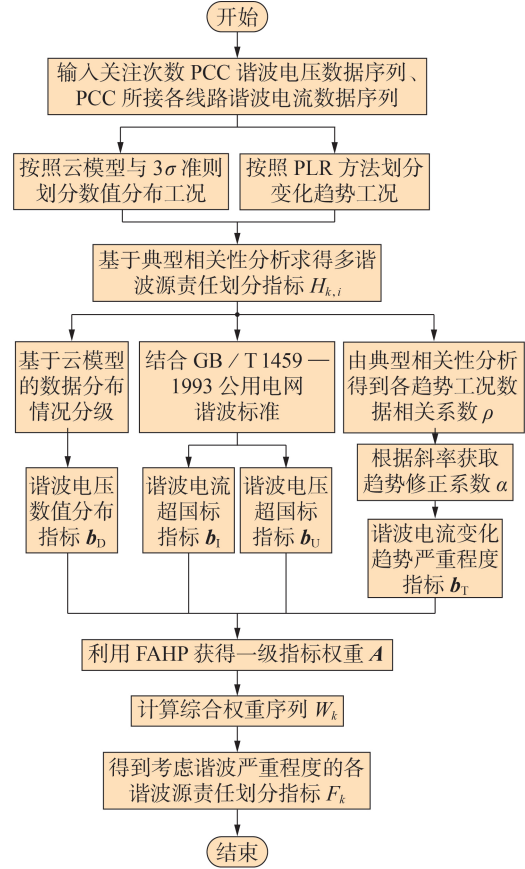


图 1 考虑谐波严重程度的多谐波源责任划分流程图

Fig.1 Flowchart of multi-harmonic source responsibility division considering harmonic severity

3 算例分析

3.1 基于典型相关性分析的数据滑动筛选方法

3.1.1 仿真参数设置

通过仿真算例验证本文方法准确性,基于 PSCAD 进行仿真。以 5 次谐波为例建立如附录 C 图 C1 所示的集中式多谐波源系统诺顿等效电路^[21],设置谐波源个数为 3。系统侧与各谐波源支路参数设置如附录 D 表 D1 所示,其中谐波阻抗为电阻 R 与电抗 L 的串联。各谐波源谐波电流幅值、相位均设置 10% 的正态波动,仿真得到数据间隔为 3 min、总时长为 24 h 的 5 次谐波 95% 概率大值数据,如图 2(a)所示。根据 1.1 节方法得到 PCC 谐波电压与各谐波源谐波电流数据的数值分布工况与变化趋势工况,如图 2(b)所示。图 2(a)中:水平虚线为谐波电压、电流的国标限值;竖点划线为数值分布工况划分点;竖实线为变化趋势工况划分点。以 2 种不同工况在时间序列上的交集(下文中以符号“ $\cap$ ”表示)作为分析时的最小工况。

3.1.2 权重指标计算

根据 1.2 节中的方法计算系统侧与各馈线在各工况下的二级评判权重 B_k ,各工况下的计算结果如

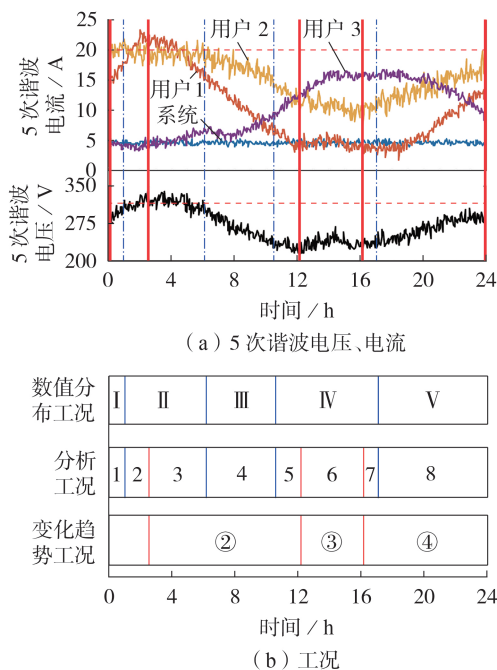


图2 PCC谐波电压与各谐波源谐波电流数据及其工况
Fig.2 PCC harmonic voltage and harmonic current data of each harmonic source and their working conditions

附录D图D1所示。然后利用式(4)计算系统侧与各馈线在各工况下考虑谐波严重程度的综合权重指标,如表1所示。表中: W_0 和 $W_1 \sim W_3$ 分别为系统侧和用户1—3的综合权重指标。

表1 各工况下综合权重 W_k

Table 1 Comprehensive weight W_k under each working condition

工况	工况组成	W_0	W_1	W_2	W_3
1	I ∩ ①	0.190	0.414	0.328	0.063
2	II ∩ ①	0.223	0.645	0.356	0.116
3	II ∩ ②	0.253	0.599	0.495	0.358
4	III ∩ ②	0.163	0.327	0.334	0.304
5	IV ∩ ②	0.165	0.263	0.257	0.337
6	IV ∩ ③	0.217	0.166	0.138	0.300
7	IV ∩ ④	0.154	0.279	0.293	0.343
8	V ∩ ④	0.155	0.336	0.353	0.311
9	0~24 h	0.188	0.360	0.324	0.295

由表1与图D1可知:①工况1—3中,部分PCC谐波电压超国标,导致谐波严重程度较高,使工况1—3的综合权重较其他工况更高;②工况1—4中,用户1与用户2谐波电流部分超标,使两者的综合权重整体高于系统侧与用户3;③工况1—5中,用户1的谐波电流与PCC谐波电压均有较高的相关性,但由于工况3—5中谐波电流有快速下降趋势,其趋势权重较工况1、2降低;④工况4—8中,相关性相近的情况下,用户1在工况4、5的下降趋势权重远小于其在工况7、8的上升趋势权重;⑤工况9为0~24 h内各用户综合权重均值,反映系统侧与各馈线的谐波

严重程度排序为用户1>用户2>用户3>系统侧,与图2(a)中数据情况相符。综上所述,本文所提综合权重可较全面地反映各分析工况内不同用户数值分布和变化趋势对严重程度的影响。

为进一步说明本文综合加权方法的合理性,利用文献[18]中的加权方法以数据时间长度为权重对短时间尺度责任划分结果 $H_{k,i}$ 进行“直接加权”,得到各分析工况的总体谐波责任 H_k ,如附录D图D2(a)所示。利用本文方法进行“综合加权”计算得到的责任指标 F_k 如附录D图D2(b)所示。各工况下系统侧与馈线的责任之和 $\sum_{k=0}^3 H_k$ 均为1,无法反映长时间尺度上各时刻谐波影响的变化,如图D2(a)所示;而图D2(b)中各工况谐波责任之和 $\sum_{k=0}^3 F_k$ 随实际谐波情况改变,例如其在工况2、3中较高,而在工况4—6中较低,与图2中PCC谐波电压的变化趋势相符。将不同工况中用户2的责任指标进行对比可知:工况3中 $H_2=0.358$,小于其在工况4中对应的值0.38;工况3中 $F_2=0.178$,大于工况4中对应的值0.127。这是由于 H_k 体现的各谐波源在各工况内的责任占比,如将其“直接加权”会削弱谐波严重时刻责任,增大谐波较轻微时刻责任;而 F_k 考虑了各时刻谐波的严重程度特征进行加权,可以更客观地反映各谐波源在不同工况下造成的实际影响。

3.1.3 与现有方法对比

将本文方法计算结果与现有文献中的典型方法进行对比,结果如表2所示。表中:方法1采用文献[4-10]中作为“真实责任”进行对比的谐波电压投影责任指标;方法2^[7]为多元线性回归算法;方法3^[9]为考虑背景谐波电压变化的多谐波源责任划分方法;方法4^[18]为多时间尺度的广泛线性复偏最小二乘多谐波源责任划分方法,其采用了“直接加权”思路;方法5^[17]为基于PCC谐波电压与各用户功率数据相关性分析的责任划分方法。为方便对比各方法在长时间尺度的应用情况,将方法1—3计算得到的一系列短时间尺度责任都进行“直接加权”,获得对应的长

表2 各用户总谐波责任指标的仿真结果

Table 2 Simulative results of total harmonic responsibility index of each user

方法	谐波责任指标 / %			
	系统侧	用户1	用户2	用户3
1	25.78	19.44	32.69	22.09
2	21.11	20.31	34.95	23.63
3	26.16	19.03	32.71	22.10
4	25.83	19.43	32.55	21.19
5	23.91	24.11	38.53	13.45
本文直接加权方法	25.79	19.42	32.69	22.10
本文综合加权方法	16.39	23.90	34.27	25.44

时间尺度总谐波责任;并将本文各时刻的谐波责任 $H_{k,i}$ (在划分工况后通过第2章中的典型相关性责任划分方法计算得到)分别通过“直接加权”与“综合加权”得到总谐波责任指标 H_k 与 F_k ,如表2所示。

由表2可知:本文的直接加权方法所得结果较方法3、4更接近方法1所得结果,即本文短时间尺度的责任划分精度较高,为长时间尺度的责任划分奠定了坚实基础;方法2由于未进行数据筛选或工况划分,所得结果偏差较大;方法5数据为PCC谐波电压与各馈线功率,计算原理与其他方法不同,所得结果差异较大。

与直接加权方法相比,本文综合加权方法所得系统侧谐波责任有所降低,各用户责任略有上升,由3.1.2节中的综合权重指标与各时刻责任共同决定。本文所提方法通过划分数值分布工况与变化趋势工况提取并量化各谐波源在不同时刻造成影响的严重程度,得到对各用户长时间尺度谐波责任的总体评价,从理论上考虑了各谐波源责任与实际影响随时间波动的情况,相比其他对比方法将不同时刻实际影响不同的短时责任指标按时间“直接加权”,能更真实地反映系统和各用户谐波对PPC造成的实际影响,所得长时间尺度指标更为客观公正。

3.2 实际算例

本文利用某变电站110 kV母线实际监测数据进行分析,变电站接线示意图如附录D图D3所示。

5次谐波电压、谐波电流监测数据见图3。图中:4-1至4-8分别表示2019年4月1日至4月8日。实测电能质量监测数据包括5次谐波电压与各馈线5次谐波电流的95%概率大值数据,数据间隔为3 min,时长为7 d(2019-04-01T00:00—2019-04-08T00:00),无相位信息。

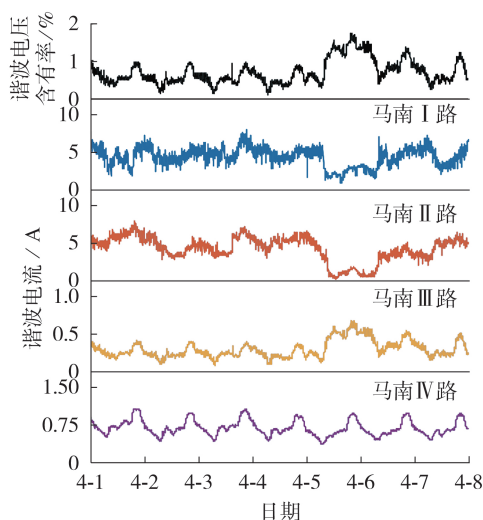


图3 5次谐波电压、谐波电流监测数据

Fig.3 Monitoring data of 5th harmonic voltage and harmonic current

根据现场调查可知,马南 I、II 路的主要负荷为电气化铁路,5次谐波电流发射量远大于其余馈线。而马南 III、IV 路所接主要为居民用户,非线性负荷较少,其谐波电流波形与PCC谐波电压较为接近,主要由PCC谐波电压影响产生。

各馈线总谐波责任指标的计算结果如表3所示,各方案均能在一定程度上反映实际谐波责任信息。由于方法1和方法3划分责任需要相位信息,故将方法2在以下4种数据处理方案下得到的责任指标与本文方法计算结果进行比较:方案1为不筛选数据直接计算责任;方案2为筛选主导波动数据后逐谐波源计算责任^[9];方案3为将数据划分为一系列较短分析时段多次计算责任并根据文献[18]中的“直接加权”思路获得总责任指标;方案4为仅计算PCC谐波电压超标时段(2019年4月5日19:33—22:30)各谐波源责任。

表3 实际算例的总谐波责任指标

Table 3 Overall harmonic responsibility index in practical example

方法	谐波责任指标 / %			
	马南 I 路	马南 II 路	马南 III 路	马南 IV 路
方案1	7.19	8.77	42.38	27.44
方案2	31.25	27.83	22.99	29.33
方案3	19.17	21.60	15.01	17.82
方案4	16.54	17.34	15.75	17.87
本文方法	36.40	39.32	5.97	9.55

根据表3可知:方案1结果与其余方案差距较大,这是由于该方案未进行数据筛选,受数据相关性的影响严重;方案2中,4条馈线责任总和超过100%,这是由于该方案中各馈线谐波责任计算过程相互独立,所得责任仅体现各谐波源分别为主导波动时的情况;方案3中,马南 I、II 路责任略大于马南 III、IV 路,即长时间尺度下电铁支路责任大于其余馈线;方案4中,PCC谐波电压超标时段内马南 I、II 路谐波电流较其他时刻为低谷,马南 III、IV 路谐波电流较其他时刻为高峰,此时各馈线谐波责任相近。可见,在长时间尺度下,马南 I、II 路的谐波责任应远大于其余线路。由于各馈线谐波发射情况随运行工况变化较大,各时刻谐波源的责任占比所反映的实际影响随之改变,“直接加权”淹没了不同分析时段谐波责任的实际影响,方案1—4所得总责任指标只能反映各谐波源在长时间尺度下的部分特征。本文划分工况与典型相关性分析的数据筛选方法降低了谐波电压与谐波电流数据特征对线性回归算法的影响,使谐波电流较小且与背景谐波电压波形较为相近的马南 III、IV 路的长时间尺度责任有所降低,与方案4分析相对应;马南 III 路的谐波责任最小也与方案2主导波动时马南 III 路的谐波责任最小相对应。综上所述,本文方法所得结果较符合实际情况,

具有一定的工程实用价值。

4 结论

本文提出一种综合考虑谐波数据数值分布与变化趋势的长时间尺度谐波责任划分方法,并通过仿真和实例验证了方法的有效性,得到以下结论。

1)谐波是长期存在的稳态电能质量问题,其对电力系统与各用户造成的影响也是持续性的,须计算谐波长时间累计的影响。本文方法得到的长时间尺度谐波责任指标更易被用户接受。

2)不同谐波严重程度下各谐波源造成的实际影响不同,本文所提方法量化了谐波严重程度,得到不同严重程度下的实际影响责任,更利于公平合理的谐波奖惩方案制定。

3)本文方法所需数据可由现有电能质量监测系统直接获取,有效挖掘谐波长期在线监测数据价值,具备工程实用性。

4)下一步研究将综合考虑电网、不同类型用户各自受谐波实际影响程度以制定合理的经济性指标,以进一步获得能使各方认可接受的责任划分指标。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 丁同,陈红坤,吴斌,等.多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(1):19-30.
DING Tong, CHEN Hongkun, WU Bin, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30.
- [2] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等.基于主导波动量筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2010,30(4):22-27.
GONG Hualin, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 22-27.
- [3] 吴雅玥,徐方维,张伟骏,等.基于修正独立随机矢量的系统侧谐波阻抗估计[J].电力系统自动化,2019,43(20):146-152.
WU Yayue, XU Fangwei, ZHANG Weijun, et al. System-side harmonic impedance estimation based on modified independent random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 146-152.
- [4] 罗杰,符玲,臧天磊,等.基于联合对角化法与数据筛选的谐波责任划分[J].电力自动化设备,2018,38(11):79-84.
LUO Jie, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic responsibility determination based on JADE and data filtering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 79-84.
- [5] 林顺富,颜昕昱,钟良亮,等.基于子带分量分解与独立分量分析的系统谐波阻抗估计方法[J].电力自动化设备,2021,41(1):179-190.
LIN Shunfu, YAN Xinyu, ZHONG Liangliang, et al. System harmonic impedance estimation method based on sub-band component decomposition and independent component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 179-190.
- [6] 张巍,杨洪耕.基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(6):50-53.
ZHANG Wei, YANG Honggeng. A method for assessing harmonic emission level based on binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 50-53.
- [7] MAZIN H E, XU W, HUANG B. Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1187-1195.
- [8] 华回春,刘哲,韩博,等.谐波责任统计特征计算方法[J].中国电机工程学报,2016,36(11):2959-2965.
HUA Huichun, LIU Zhe, HAN Bo, et al. Calculation method for the harmonic contribution statistical characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2959-2965.
- [9] 王瑜,臧天磊,符玲,等.考虑背景谐波电压变化的多谐波源谐波责任划分[J].电力系统自动化,2015,39(18):55-61.
WANG Yu, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. Harmonic contribution partition of multiple harmonic sources considering background harmonic voltage fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 55-61.
- [10] 孟思雨,肖先勇,张逸,等.基于有效数据段选取的多谐波源责任划分方法[J].电网技术,2017,41(6):2006-2011.
MENG Siyu, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. A valid data selection method in estimating harmonic impact of individual loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2006-2011.
- [11] 刘乾易,李勇,郭松,等.大功率电解整流系统背景谐波建模及谐波责任评估[J].中国科学:技术科学,2019,49(5):602-610.
LIU Qianyi, LI Yong, GUO Song, et al. Background harmonic modeling and harmonic contribution assessment for large-power industrial supply system[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(5): 602-610.
- [12] 国家技术监督局.电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [13] 林才华,张逸,邵振国,等.基于模糊DEA的长时间尺度电能质量综合评估[J].高电压技术,2021,47(5):1751-1761.
LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Comprehensive evaluation of power quality on long-time scale based on fuzzy DEA[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1751-1761.
- [14] ZHANG Yi, WANG Youran, GUO Junyu, et al. A method for responsibility division of multi-harmonic sources based on canonical correlation analysis[J]. Symmetry, 2021, 13(8): 1451.
- [15] 刘子腾,徐永海,陶顺.新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J].电力自动化设备,2020,40(11):203-213.
LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun, et al. Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 203-213.
- [16] 刘子腾,徐永海,雷达,等.基于多层次模糊综合评判的谐波综合责任评估指标[J].电测与仪表,2021,58(3):1-8.
LIU Ziteng, XU Yonghai, LEI Da, et al. Harmonic comprehensive responsibility index based on multiple fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 1-8.
- [17] 张逸,王攸然,刘航,等.基于监测数据相关性分析的用户谐波责任划分方法[J].电力系统自动化,2020,44(2):189-197.
ZHANG Yi, WANG Youran, LIU Hang, et al. Determination method of user harmonic responsibility based on correlation analysis of monitoring data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 189-197.
- [18] SUN Yuayuan, LI Shurong, XU Qingshen, et al. Harmonic contribution evaluation based on the distribution-level PMUs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 909-919.
- [19] 余南华,李兰芳,王玲,等.基于云模型的谐波电流异常检测

- [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4395-4401.
- YU Nanhua, LI Lanfang, WANG Ling, et al. Abnormal detection for harmonic currents based on cloud model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4395-4401.
- [20] 张逸, 姚文旭, 王康, 等. 考虑时序趋势分析的周期性谐波异常识别[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1117-1125.
- ZHANG Yi, YAO Wenxu, WANG Kang, et al. Periodic harmonic anomaly recognition considering time series trend analysis[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1117-1125.
- [21] 孙媛媛, 李佳奇, 尹志明. 基于实测数据的集中式多谐波源责任评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2164-2171.
- SUN Yuanyuan, LI Jiaqi, YIN Zhiming. Quantifying harmonic

impacts for concentrated multiple harmonic sources using actual data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2164-2171.

作者简介:

张逸(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电能质量、主动配电网及电力数据分析(E-mail: zhangyi@fzu.edu.cn);

郭俊煜(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制技术(E-mail: 1771067564@qq.com)。

(编辑 任思思)

Long-time scale harmonic responsibility division method considering harmonic severity

ZHANG Yi, GUO Junyu, SHAO Zhenguo

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In view of the existing harmonic responsibility division methods do not consider the actual impact difference caused by different harmonic severity, a long-time scale harmonic responsibility division method considering the harmonic severity is proposed. The harmonic value distribution and trend are considered to divide the working conditions, and the comprehensive weight of each working condition is calculated to quantify the harmonic severity. The long-time scale data are screened based on the principle of canonical correlation analysis, and the harmonic responsibility is estimated according to the definition of harmonic responsibility. The long-time scale comprehensive harmonic responsibility division index is obtained by combining the above comprehensive weights. Simulation examples and measured data are used to verify the proposed method. Compared with the traditional method, the proposed method can reflect the cumulative influence of different harmonic sources in a long-time scale, and is more suitable for accurate harmonic control and fair reward and punishment.

Key words: harmonic responsibility division; harmonic severity; long-time scale; harmonic trend; working condition division

附录 A 云模型构建

首先通过逆向云发生器提取输入数据的期望 E_x 、熵 E_n 与超熵 H_e 三类数字特征，之后使用正向云发生器构建云，下述为其流程：

1) 计算输入数据 q 个元素均值 $\bar{X} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i$ ，一阶样本绝对中心矩为 $B_1 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q |x_i - \bar{X}|$ ，样本方差为 $S^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (x_i - \bar{X})^2$ 。

2) 由 1) 可算输入数据的期望为 $E_x = \bar{X}$ ；熵 $E_n = \sqrt{\pi/2} \times B_1$ ；超熵为 $H_e = \alpha \sqrt{S^2 - E_n^2}$ 。 μ_1 、 μ_2 为云滴的包络线，其中的 μ_1 取值区间为 $[E_x - 3(E_n + 3H_e), E_x + 3(E_n + 3H_e)]$ ， μ_2 取值区间为 $[E_x - 3(E_n - 3H_e), E_x + 3(E_n - 3H_e)]$ 。

$$\mu_1 = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n + 3H_e)^2}\right) \quad (A1)$$

$$\mu_2 = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n - 3H_e)^2}\right) \quad (A2)$$

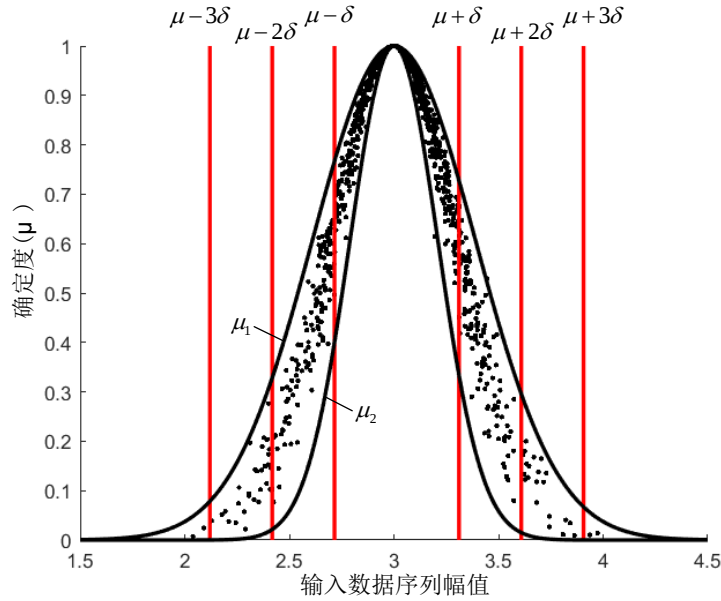


图 A1 谐波云模型与数据分级

Fig.A1 Harmonic cloud model and data grading

附录 B 主观模糊层次分析法

通过 FAHP 计算 p 个指标对应权重，首先由各元素构建模糊互补判断矩阵 J ：

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & \cdots & J_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{p1} & \cdots & J_{pp} \end{bmatrix} \quad (B1)$$

式中： J_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, p$) 为模糊互补判断矩阵元素。

表 B1 主观模糊层次分析法 “0.1-0.9 标度”
Table B1 Subjective fuzzy analytic hierarchy process "0.1-0.9 Scale"

标度	因素 i 对因素 j 的相对重要性
0.5	同样重要性
0.6	稍微重要
0.7	明显重要
0.8	非常重要

计算模糊互补判断矩阵 J 的权重向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_p)^T$ ，其中第 i 个指标的权重值 W_i 即为：

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^p J_{ij} + \frac{p-1}{2}}{p(p-1)}, (i=1, 2, \dots, p) \quad (B2)$$

设矩阵 $A = (a_{i,j})_{p \times p}$ 和 $B = (b_{i,j})_{p \times p}$ 均为模糊互补判断矩阵，构建 A 与 B 间的相容性指标：

$$I(A, B) = \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p |a_{ij} + b_{ij} - 1| \quad (B3)$$

提取判断矩阵 J 的特征矩阵：

$$W^* = \left(\frac{W_i}{W_i + W_j} \right)_{p \times p} \quad (B4)$$

当输入矩阵 J 与其特征矩阵的相容性指标 $I(J, W^*)$ ，当 $I(J, W^*) \leq T$ 时认为矩阵满足一致性。 T 越小表示模糊判断矩阵的一致性要求越高，通常取 $T = 0.1$ 。

附录 C 基于电压叠加投影的谐波责任划分指标

传统单谐波源责任划分一般将系统侧与用户侧分别进行诺顿等效，以划分两侧谐波责任。同理可建立具有 n 个谐波源的多谐波源系统第 h 次谐波的等值电路，如图 C1 所示。

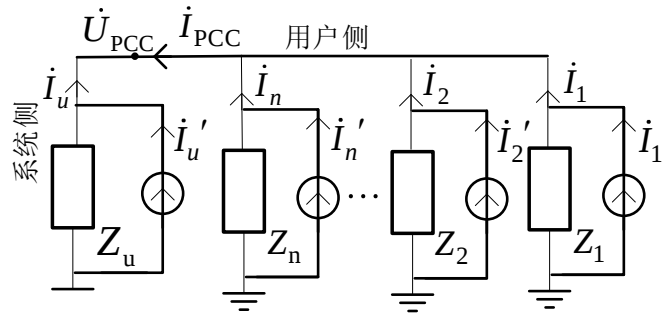


图 C1 多谐波源等效电路
Fig.C1 Multi-harmonic source equivalent circuit

图 C1 中 $\dot{U}_{PCC}$ 和 $\dot{I}_{PCC}$ 分别是 PCC 处的谐波电压和谐波电流； $\dot{i}'_u, Z_u, \dot{i}_u$ 与 $\dot{i}'_k, Z_k, \dot{i}_k$ ($k=1, 2, \dots, n$) 分别表示系统侧与用户侧第 k 个用户的等效谐波电流、等效谐波阻抗和支路谐波电流。根据叠加定理，PCC 谐波电压 $\dot{U}_{PCC}$ 可表示为^[21]：

$$\dot{U}_{PCC} = \sum_{k=1}^n \dot{U}_k + \dot{U}_0 = \sum_{k=1}^n Z'_k \dot{i}_k + \dot{U}_0 \quad (C1)$$

$\dot{U}_k$ 为第 k 个用户在 PCC 处产生的谐波电压； Z'_k 为除支路 k 外的等效谐波阻抗； $\dot{U}_0$ 为背景谐波电压，包括系统谐波电压和用户侧非主要谐波源。设主要谐波源用户数量为 3 ($n=3$)，每个用户产生的

谐波电压与 PCC 处谐波电压间的矢量关系如图 C2 所示。

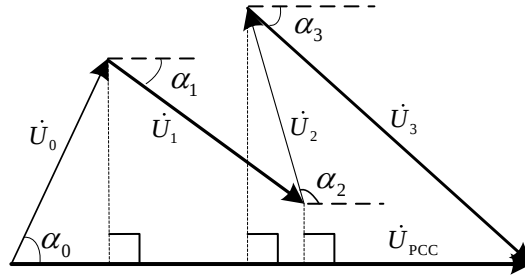


图 C2 第 h 次谐波电压矢量叠加图

Fig.C2 h -th harmonic voltage vector superposition diagram

将第 k 个谐波源用户在数据长度为 m 的分析时段内各时刻的谐波责任 $H_{k,i}$ 定义为 $\dot{U}_{k,i}$ 在 $\dot{U}_{PCC,i}$ 上投影

与 $\dot{U}_{PCC,i}$ 的幅值之比，引入投影系数 h_k ：

$$H_{k,i} = \frac{|\dot{U}_{k,i}| \cos \alpha_{k,i}}{|\dot{U}_{PCC,i}|} = \frac{|\dot{I}_{k,i}| |Z'_k| \cos \alpha_k}{|\dot{U}_{PCC,i}|} \quad (C2)$$

$$= \frac{|\dot{I}_{k,i}| h_k}{|\dot{U}_{PCC,i}|}, (i = 1, 2, 3 \dots, m)$$

$$h_k = |Z'_k| \cos \alpha_k \quad (C3)$$

α_k 为 $\dot{U}_{PCC,i}$ 与 $\dot{U}_k$ 的夹角。同时，由式(C1)与图 C2 投影关系可得：

$$\begin{aligned} |\dot{U}_{PCC,i}| &= \sum_{k=1}^n |\dot{U}_{k,i}| \cos \alpha_k + |\dot{U}_0| \cos \alpha_0 \\ &= \sum_{k=1}^n |\dot{I}_{k,i}| |Z'_k| \cos \alpha_k + |\dot{U}_0| \cos \alpha_0 \\ &= \sum_{k=1}^n h_k |\dot{I}_{k,i}| + |\dot{U}_0| \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (C4)$$

通过偏最小二乘回归方法求解式(C3)得到 h_k ，代入式(C2)即可求得各谐波源谐波责任。引入投影系数在避免向量方程的求解的同时，也简化了责任划分流程。

附录 D

表 D1 系统侧与各谐波源参数
Table D1 Multi-harmonic source data

谐波源	R/Ω	L/H	谐波源	R/Ω	L/H
系统侧 ($k=0$)	2	0.002	用户 2 ($k=2$)	6	0.010
用户 1 ($k=1$)	10	0.020	用户 3 ($k=3$)	8	0.016

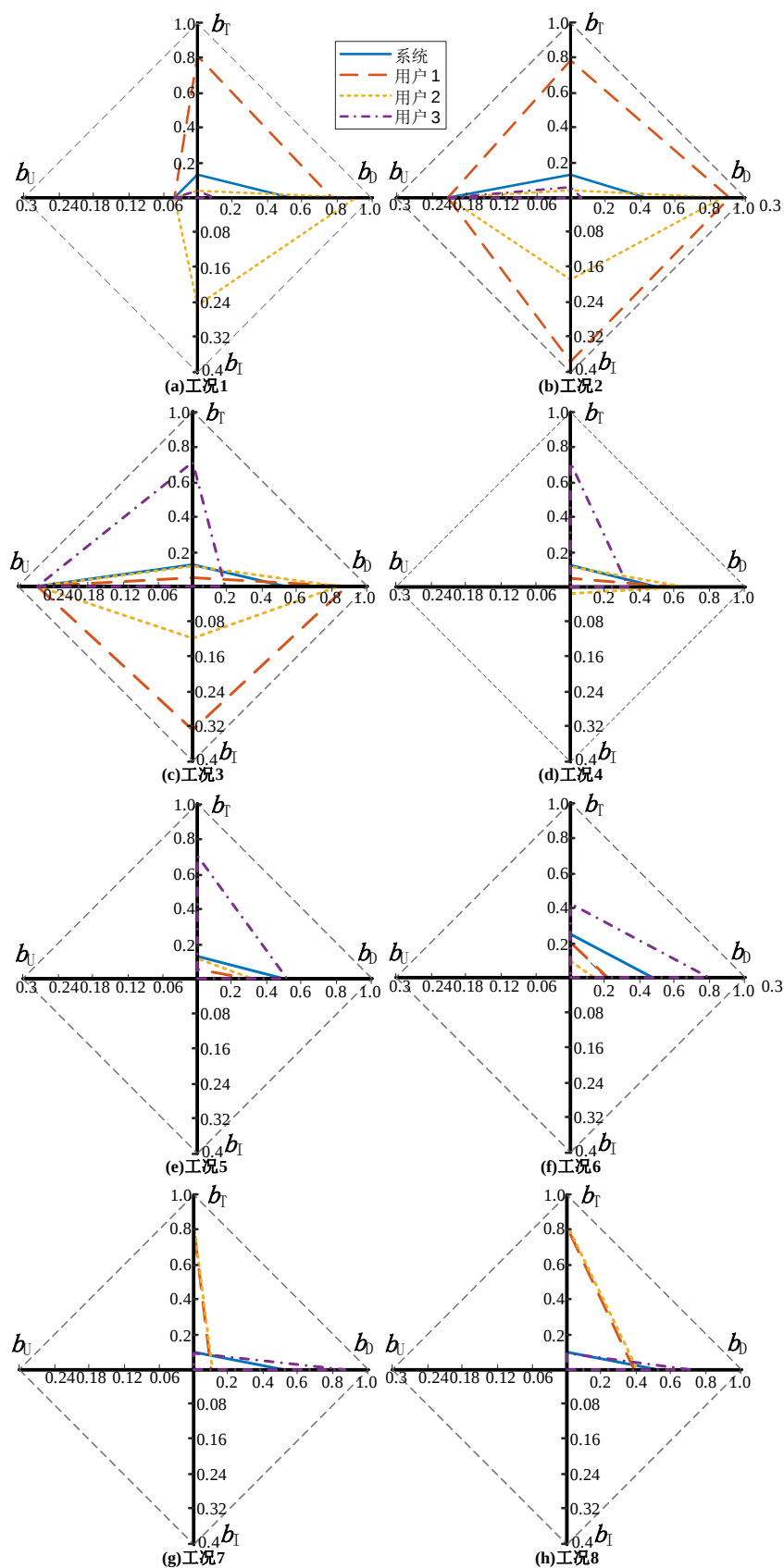


图 D1 各工况中各线路权重对比雷达图

Fig.D1 Radar diagram of weight comparison of each line in each working condition

图中： b_D 为各谐波源作用在 PCC 产生的谐波电压的数值分布权重； b_I 、 b_U 分别为谐波电流超国标权

重与谐波电压超国标权重； b_T 为各谐波源谐波电流变化趋势严重程度权重，将各权重指标均值于雷达图中展示。

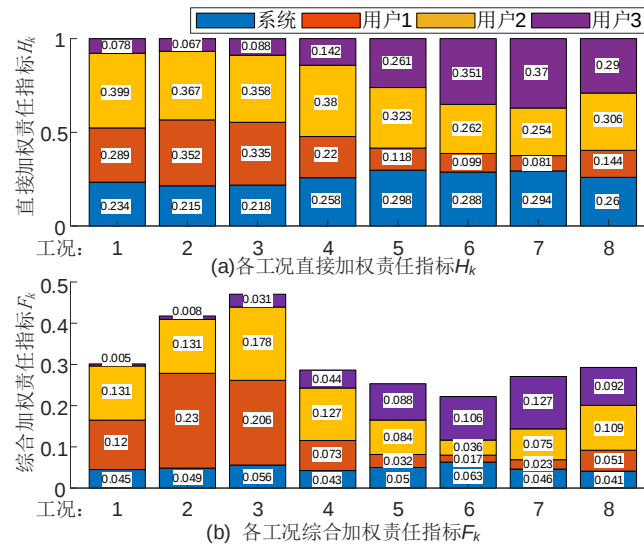


图 D2 各工况下谐波责任划分结果对比

Fig. D2 Comparison of harmonic responsibility division results under various working conditions

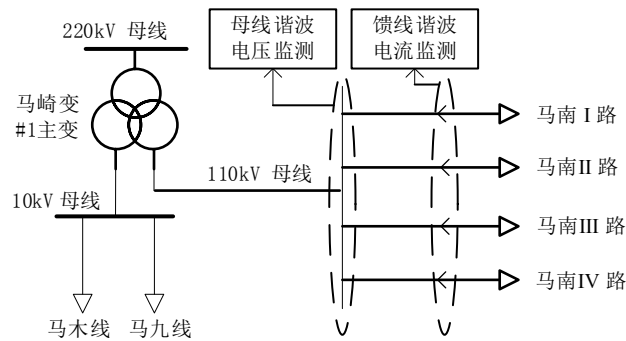


图 D3 变电站接线示意图

Fig.D3 Wiring diagram of substation