

考虑时序趋势特性的典型场景高压谐波 综合评估方法

景巍巍¹, 付 慧², 程伟添³, 杨 柳⁴, 史明明⁵, 黄 祎³, 欧阳森³

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222004; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 4. 国家电网有限公司, 北京 100031; 5. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要: 针对现有评估指标及方法难以区分典型场景中趋势特性差异较大而 CP95 值相近的谐波曲线, 且甚少考虑数据时序趋势特性, 无法科学合理地表征谐波水平差异的问题, 提出一种考虑时序趋势特性的典型场景高压谐波特性评估方法。首先, 基于双激励理论提取数据序列的时序趋势特性, 建立涵盖时序趋势特性的包括传统谐波指标及时序趋势特性指标在内的高压谐波综合评估指标体系; 然后, 考虑所建立的指标间关联特性, 提出基于序关系分析和 CRITIC 法相结合的典型场景高压谐波综合评估模型; 最后, 算例分析表明所建立的时序趋势特性指标能有效表征数据曲线的时序发展特性, 对多条 CP95 值相近的谐波曲线能有效表征其谐波水平差异。分析结果验证所提方法的合理性和有效性。

关 键 词: 时序趋势; 典型场景; 高压谐波; 双激励; 综合评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.023 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2023)06-0215-10

Comprehensive evaluation method of high-voltage harmonics in typical scenarios considering time series trend characteristics

JING Weiwei¹, FU Hui², CHENG Weitian³, YANG Liu⁴,
SHI Mingming⁵, HUANG Yi³, OUYANG Sen³

(1. Lianyungang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 5. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: In response to the challenge of existing assessment indicators and methods struggling to distinguish harmonic curve differences in typical scenarios where trend characteristics vary significantly and CP95 values are close, rarely considering the time series trend characteristics and incapable of representing the differences scientifically and rationally in harmonic levels, a high-voltage harmonic characteristic assessment approach that takes into account the time series trend characteristics of typical scenarios is proposed. Firstly, based on the dual excitation theory, the temporal trend

收稿日期: 2022-03-20; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5700-202018485A-0-0-00)

通信作者: 程伟添(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量评估研究; E-mail: 729767457@qq.com

characteristics of the data sequence are extracted, and a comprehensive evaluation index system that encompasses traditional harmonic indicators and temporal trend characteristic indicators is established for high-voltage harmonics covering time series trend characteristics. Subsequently, considering the interrelation characteristics among the established indicators, a comprehensive assessment model is presented for high-voltage harmonics in typical scenarios based on the combination of sequential relationship analysis and the CRITIC method. Finally, case analysis validates the rationality and effectiveness of the proposed method. The case analysis indicates that the established time series trend characteristic indicators can effectively characterize the temporal development characteristics of data curves. For multiple harmonic curves with close CP95 values, they can effectively represent the differences in harmonic levels. Finally, the case analysis demonstrates that the established temporal trend characteristic indicators can effectively represent the temporal development characteristics of data curves. For multiple harmonic curves with close CP95 values, the indicators can efficiently characterize the differences in harmonic levels. The analysis results validate the rationality and effectiveness of the proposed method.

Key words: time series trend; typical scenarios; high voltage harmonic; dual incentive; comprehensive evaluation

电网谐波水平严重影响电网和用户设备的运行安全性和经济性。为了实现监测、控制以及治理谐波质量问题,中国现行谐波标准规范(GB/T 14549—1993)选取监测数据的CP95值衡量监测点谐波质量水平^[1-3]。该取值原理简单、便于工程操作,然而该方法实际上忽略了原始数据特性,仅关注于单一数值,导致时序趋势特性差异较大,使得CP95值相近的多条谐波曲线不能表征其谐波水平的差异。现行国标尚未对220 kV以上的谐波问题进行详细分析,但是在高压直流输电换流站、海上风电换流站以及高铁牵引站等220 kV以上的典型场景中谐波问题较为突出^[4-8],因此,有必要对该类典型场景进行科学合理的谐波水平评估。

文献[9-10]考虑了谐波数据间的离散特性,通过聚类和数据筛选方法分离出不同类别的数据簇;文献[10]提出了“综合偏差度”的概念,直观地反映了谐波数据的分布特性及其偏差程度;文献[11-14]讨论了谐波监测数据间以及不同指标间的相关性,结合偏相关分析方法确定了谐波监测数据间的统计规律;文献[15-17]基于模糊数据理论讨论了谐波数据的隶属度特性,将其纳入谐波评估中得到不同等级划分的谐波水平,该方法体现了数据的隶属度特性,能将整体差异较大的谐波数据隶属于不同等级,但对隶属于同一等级且CP95值相似的谐波数据,无法有效地表征谐波质量差异。上述评估方法主要围绕谐波数据的波动性、相关性以及隶属度特性开展了相关研究,尚未考虑数据时序特性体现谐波数据发展趋势的研究。除此以外,现有评估方法

对于数据特性差异较大而CP95值相近的多条谐波数据曲线无法实现有效区分。综上可知,现有文献评估方法大多以CP95值为核心进行传统谐波指标量化评估,未将谐波数据的时序趋势特性纳入谐波评估中,其对数据时序趋势特性差异较大而水平相似的谐波曲线难以区分,不能科学合理地表征其谐波水平差异。

综上所述,本文提出一种考虑时序趋势特性的高压谐波综合评估方法,计及谐波数据的总体变化趋势以弥补现有方法仅考虑单一静态CP95值的不足。首先,建立涵盖时序趋势特性的谐波综合评估指标体系,并通过双激励理论提取谐波数据序列的时序趋势特性;然后,鉴于现有评估体系尚无涉及时序趋势指标且所建立的2类指标间存在相关性,提出基于序关系分析法和客观权重赋权法(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)相结合的典型场景高压谐波综合评估模型;最后,通过算例分析验证本文方法的合理性和有效性,证明所建立的谐波指标和综合评估模型可有效鉴别多条CP95值相近、时序趋势差异较大的谐波数据曲线,从而表征其谐波水平差异。

1 考虑时序的谐波电压数据特征分析

1.1 现行国标CP95值的缺陷

考虑谐波数据的波动性,对于数据CP95值,现行标准定义:对于监测点采集的谐波测量数据,应取其采样间隔内各相中实测数据最大的95%置信

概率作为评估谐波水平的数据基础。为便于实际应用,95% 概率值可依据下述方法近似选取:将实测谐波数据按降序排列,舍弃前序 5% 大值,取剩余实测数值中的最大值^[13]。

电压总谐波畸变率衡量了畸变波形中各谐波含量的有效值,常用于描述电压的谐波畸变。本文以监测点电压总谐波畸变率曲线为研究对象,以苏州地区高压直流输电换流站的 4 个重要监测点实测谐波数据曲线为例,其谐波数据的时序波动变化通常遵循类似于典型场景运行工况的特殊模式,该变化蕴含着系统中非线性负荷的规律特性,如图 1 所示;将图 1 按 95% 概率标准对谐波数据进行排序,提取 CP95 值,如图 2 所示。

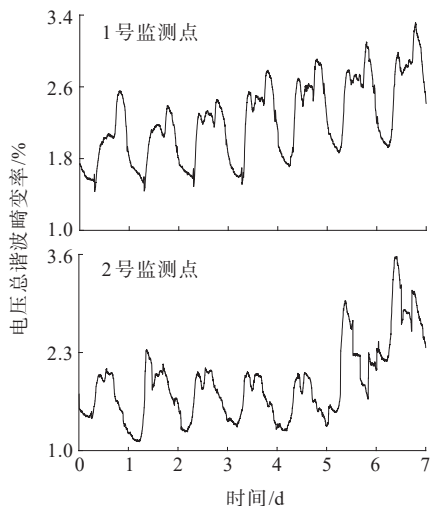


图 1 监测点实测谐波数据曲线

Figure 1 Measured harmonic data curve at monitoring point

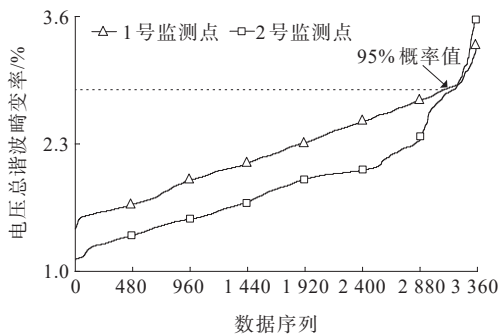


图 2 谐波数据的 CP95 值

Figure 2 CP95 values of harmonic data

由图 1 可知,各监测点的谐波数据曲线都具有独特的时序趋势特性,1 号监测点实测谐波数据曲线呈线性递增,2 号监测点类似于指数递增;由图 2

可知,1、2 号监测点数据曲线具有相同 CP95 值。

在谐波水平评估方面,当对数据时序趋势特性差异较大而 CP95 值相近的多谐波监测点数据组进行谐波质量水平评估时,若仅单一考虑静态的谐波数据 CP95 值,则所得到的谐波综合评估值属于相同等级水平,这样无法体现谐波数据的时序趋势特性、表征其谐波质量水平的差异,导致评估结果不科学、不合理。

综上所述,95% 概率取值方式忽略了实测数据的一致性与连续性,无法科学合理地评估谐波质量水平,无法有效区分时序趋势特性差异较大而 CP95 值相近的谐波数据曲线,不能进一步表征其谐波水平差异。

1.2 基于实测数据的高压谐波电压典型曲线

典型实测谐波数据曲线如图 3 所示,通过分析实测谐波数据曲线的趋势特性并结合实际运行环境,可知在长时间尺度下,由于运行工况、负荷波动以及外界因素等方面的影响,谐波数据曲线可具有多种时序趋势特性。

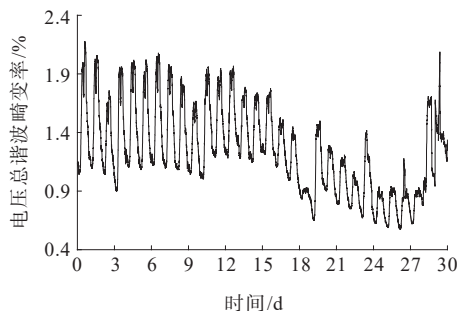
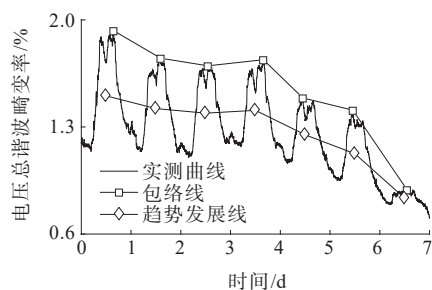


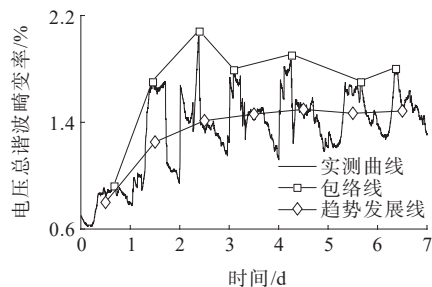
图 3 典型实测谐波数据曲线

Figure 3 Typical measured harmonic data curve

在此基础上,为避免数据量过大、曲线压缩过度导致部分时序趋势特性被掩盖,本文通过包络线和以算术平均值为核心的趋势发展曲线,对整体趋势截取特定时段曲线进行分析,如图 4 所示,可知实测谐波数据曲线的时序趋势以非线性特征为主,表现为递增和递减 2 种基本形式。谐波数据的时序趋势体现了谐波水平随着时间变化的趋势波动。为得到更为科学合理的谐波评估结果,有必要考虑谐波数据的时序特性,结合时序趋势特性对谐波数据进行综合评估,弥补传统谐波评估方法中仅考虑单一静态 CP95 值的不足。



(a) 指数递减



(b) 指数递增

图4 实测谐波数据曲线趋势分析

Figure 4 Trend analysis of measured harmonic data curves

1.3 基本时序特性类型

谐波曲线具有多种不同的时序趋势特性,时序趋势特性间也存在着较大的差异。基于实测谐波数据分析,本文将谐波曲线内具体时序趋势特性分为3大类,形成6种不同形式的基本时序曲线,并总结时序特性的主要成因,如表1所示。

表1 基本时序特性分析

Table 1 Analysis of basic time series characteristics

| 基本类型 | 基本形式 | 主要成因 |
|------|------|--------------------|
| 线性类 | 递增 | 系统中谐波问题未能有效解决,且随着 |
| | 递减 | 谐波源功率增加,谐波水平持续恶化 |
| 指数类 | 递增 | 在系统正常运行工作中,由于负荷剧烈波 |
| | 递减 | 动、运行工况改变以及气象因素等影响 |
| 对数类 | 递增 | 因素造成谐波源功率激增,导致谐波 |
| | 递减 | 水平从某一时刻起开始急剧变化 |

时序趋势特征体现了数据的当前水平和历史水平,能够提供更加全面的参考信息,利用数据的时序趋势特征可对谐波水平相近的谐波曲线进行有效区分,完善其对谐波水平差异的表征。对数据时序特性的表征主要分为2类:①引入时间概念进行原方法改造;②利用时序立体数据表进行信息集结,其中后者方法更能充分利用时序信息^[18]。本文采用基于双激励控制线的信息集结算法提取实测

谐波数据的时序趋势特征,构建涵盖时序特性的谐波评估指标体系,通过谐波综合评估模型实现更加科学合理的谐波水平评估。

2 基于双激励理论的时序特征提取方法

2.1 双激励控制线的原理

基于双激励控制线的时序特征提取方法,其特点是通过引入2条激励直线,对位于正激励直线以上的数据曲线部分进行适度“奖励”,对位于负激励直线以下的数据曲线部分进行适度“惩罚”。通过建立对时序趋势波动的奖惩机制,实现对数据时序信息集中处理^[19],具体操作如下。

首先,假设评估对象集为 $\{O_i\}(i=1, 2, \dots, m)$,双激励控制线一般以直线形式表达:

$$y - y_0^{\pm} = k^{\pm}(x - x_0^{\pm}) \quad (1)$$

式中, x 为横轴上的时间变量,记作 $x_k = x(t_k), k=1, 2, \dots, N$,即横轴上的 $N-1$ 个时段; x_0^{\pm} 为初始值; y 为纵轴上的谐波数据; y_0^{\pm} 为初始值,一般选取具有强解释性的值,要求 $y_0^{\pm} \in [\min(y_{i1}), \max(y_{i1})]$, y_{i1} 为评估对象 O_i 在 t_1 时刻的评估值; k^{\pm} 为正、负激励直线的斜率。

然后,定义 r_a^{\max} 、 r_a^{\min} 、 \bar{r}_a 分别为全态最大、最小、平均增长率,其算式为

$$\begin{cases} r_a^{\max} = \max_i \left\{ \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \frac{y_{i,k+1} - y_{i,k}}{x_{k+1} - x_k} \right\} \\ r_a^{\min} = \min_i \left\{ \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \frac{y_{i,k+1} - y_{i,k}}{x_{k+1} - x_k} \right\} \\ \bar{r}_a = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k) \end{cases} \quad (2)$$

最后,定义 k_a^+ 、 k_a^- 分别为全态正、负激励直线斜率,计算式为

$$\begin{cases} k_a^+ = \bar{r}_a + v^+(r_a^{\max} - \bar{r}) \\ k_a^- = \bar{r}_a - v^-(\bar{r} - r_a^{\min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, v^+ 、 v^- 分别为正、负激励直线的斜率偏移度, $0 < v^+ \leq 1, 0 < v^- \leq 1$ 。

2.2 时序趋势特征提取

基于双激励理论对实测谐波曲线进行时序趋

势特征提取。通过对数据曲线观察得知,曲线中存在的诸多噪声信号以及小波动会影响整体时序趋势。在保持数据整体趋势不变的情况下,为了更好地表征数据时序趋势,本文对实测谐波曲线进行数据预处理。经过反复测试,本文按 95% 概率理论提取实测数据曲线的每小时 CP95 指标值,在提取时序趋势特征时,认为相邻 2 个时间点之间是均匀发展的,为此,将预处理后的数据按顺序 2 点相连,形成谐波数据的 CP95 值曲线,其中曲线整体波动即为其发展趋势,如图 5 所示。

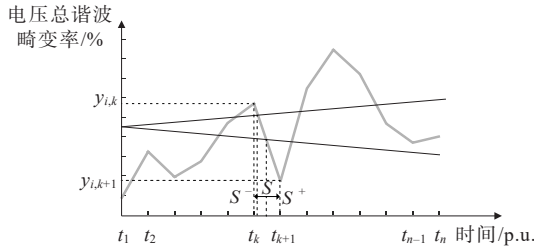


图 5 时序趋势特征提取示意

Figure 5 Schematic diagram of time series trend feature extraction

$t_k, y_{i,k}, y_{i,k+1}, t_{k+1}$ 与横轴包围的面积(图 5 中 S)反映谐波数据曲线 O_i 在 $[t_k, t_{k+1}]$ 内的总体趋势状况,其时序趋势特征值采用积分形式表达:

$$s_{i,k} = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[y_{i,k} + (t - t_k) \frac{(y_{i,k+1} - y_{i,k})}{t_{k+1} - t_k} \right] dt \quad (4)$$

位于正、负激励直线以外的部分(图 5 中的正、负激励面积 S^+, S^-)需通过奖惩机制进行调整,设 $s_{i,k}^+, s_{i,k}^-$ 分别为谐波数据曲线 O_i 在 $[t_k, t_{k+1}]$ 内的正、负激励趋势值,则

$$S_{i,k} = \mu^+ s_{i,k}^+ + s_{i,k} - \mu^- s_{i,k}^- \quad (5)$$

式中, $\mu^+, \mu^- (\mu^+, \mu^- > 0)$ 分别为正、负激励系数。

通过判断谐波数据曲线的基本时序类型,确定相对应的正、负激励系数 μ^+, μ^- , 同时也应遵循以下条件。

1) 不同类型时序曲线皆应遵守适度激励规则,即

$$\mu^+ + \mu^- = 1 \quad (6)$$

2) 对于线性类时序曲线,全体 $N - 1$ 个时段内的时序趋势维持稳定,变化波动较小,正、负激励的总量应相等,即

$$\mu^+ \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^+ = \mu^- \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^- \quad (7)$$

3) 对于指数或对数类时序曲线,全体 $N - 1$ 个时段内时序趋势之间都存在差异,需对各时段内时序趋势变化波动进行概况统计。根据时段内整体时序趋势的增减性,通过激励系数来表征时序趋势的波动,即

$$\begin{cases} \theta = \frac{\sum_{k=1}^{n'} \frac{y_{i,k+1} - y_{i,k}}{x_{i,k+1} - x_{i,k}}}{\mu^+ (1 + \theta) \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^+ = \mu^- \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^-, \theta > 0} \\ \mu^+ (1 + |\theta|) \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^+ = \mu^- \sum_{k=1}^{N-1} s_{i,k}^-, \theta < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, θ 为时段内整体时序趋势概况统计值; n' 为时段内谐波数据统计数量。

3 综合评估模型

3.1 谐波综合评估指标体系

中国现行标准主要以谐波畸变率评估谐波质量水平的优劣程度,为了充分表征实测谐波数据的时序演变规律,在此基础上,本文考虑谐波畸变率数据曲线的时序趋势特性,构建谐波综合评估指标体系,如图 6 所示。

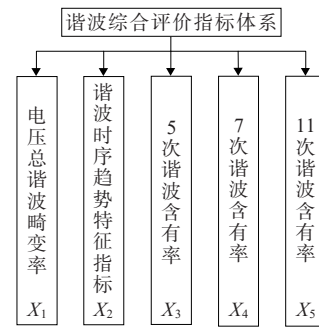


图 6 谐波综合评估指标体系

Figure 6 Comprehensive evaluation index system of harmonic

3.1.1 电压总谐波畸变率

基于现行标准 GB/T 14549—1993, 本文以电压总谐波畸变率(total harmonics distortion, THD)对电网节点的谐波质量水平进行评估。电压总谐波畸变率越小,说明电网节点的谐波质量水平越好,则 X_1 为电压总谐波畸变率数据曲线的 CP95 值。

$$J_{\text{THD}}^n = \frac{1}{U_1} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n U_h^2} \quad (9)$$

式中, U_1 为节点电压基波分量的方均根; U_h 为节点电压第 h 次谐波分量的方均根。

3.1.2 谐波含有率

谐波含有量是指从周期性交流量中减去基波分量后所剩余的交流成分。谐波含有率(harmonic ratio, HR)表示周期性交流量中含有 n 次谐波分量的方均根与基波分量的方均根之比的百分数, 如: 第 n 次谐波电压的含有率表示为

$$R_{HR,n}^U = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (10)$$

本文以高压谐波作为研究对象, 主要探讨海上风电、直流输电换流站以及电气化铁路等典型场景的高压谐波问题。从实际工程运行、维护经验中可知, 高压典型场景中主要以 5、7、11、13 以及 25 次谐波问题居多, 而其中 5、7 和 11 次谐波问题尤为严重, 其谐波幅值往往是其余次谐波的 5~10 倍。因此, 本文所建立的谐波扩展评估指标体系中主要讨论第 5、7 以及 11 次的谐波含有率。

3.1.3 谐波时序趋势特征指标

时序趋势特征主要体现数据的当前水平以及历史水平。首先, 通过式(1)~(5)计算得到各时段的时序趋势值 $S_{i,k}$; 然后, 基于以下公式对各时段趋势进行概况统计, 整合为谐波时序趋势特征指标值, 即

$$X_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_{i,k} \quad (11)$$

式中, n 为统计时段 $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 的个数; $S_{i,k}$ 为谐波数据曲线 O_i 在统计时段 $[t_k, t_{k+1}]$ 内基于双激励理论提取的时序趋势值。

相对于 95% 概率指标, 式(11)综合了谐波数据曲线中各时段的时序发展, 通过奖惩机制形成具有时序趋势特征的谐波评估值, 该指标数值越小, 说明谐波水平越好。

3.2 数据预处理

本文通过极值变换方法将高压谐波评估指标值转换为无量纲化、标准化的数值。设评估对象 O_i 在第 T_k 时期的评估指标 X_j 下的指标值为 a_{kij} 。

若评估指标 X_j 为极大型指标, 则

$$x_{kij} = \frac{a_{kij} - \min_i \{a_{kij}\}}{\max_i \{a_{kij}\} - \min_i \{a_{kij}\}} \quad (12)$$

若评估指标 X_j 为极小型指标, 则

$$x_{kij} = \frac{\max_i \{a_{kij}\} - a_{kij}}{\max_i \{a_{kij}\} - \min_i \{a_{kij}\}} \quad (13)$$

其中, $\max_i \{a_{kij}\}$ 、 $\min_i \{a_{kij}\}$ 分别为评估指标在同一时期内所有评估对象中的最大、最小值。变换后的评估指标数值均位于 $[0, 1]$ 内, 对所有评估指标而言, 数值 1 表示相对最佳, 数值 0 表示相对最差。

3.3 确定指标权重

本文建立涵盖时序趋势特性的谐波综合评估体系, 提出谐波时序趋势特征指标。根据现有谐波综合评估研究中较少考虑时序特性, 本文选用序关系分析法结合决策者的专业知识以及工作经验, 确定各指标主观权重; 根据所建立谐波综合评估体系中 y_{THD}^u 和 $R_{HR,n}^U$ 存在相关性, 本文选用 CRITIC 法对指标权重进行求解, 兼顾指标间相关性^[20]。为了获得科学合理的综合理想权重, 基于最小熵原理求取一致性最好的综合权重。

3.3.1 序关系分析法

1) 确定评估指标间的序关系。

若评估指标 X_a 相对于某目标准则时重要程度大于或等于 X_b , 则记为 $X_a > X_b$, 其中 $X_a, X_b \in X$ 。评估指标 X_1, X_2, \dots, X_m 按此排序方式可得关系式:

$$X_1^* > X_2^* > \dots > X_m^* \quad (14)$$

2) 确定相邻指标间的相对重要程度及其比值。

设决策者关于指标 X_{k-1} 与 X_k 相对重要程度为 ω_k , 该相对重要程度理想决策为

$$\frac{\omega_{k-1}}{\omega_k} = r_k, k = m, m-1, \dots, 3, 2 \quad (15)$$

其中, r_k 的取值^[21]如表 2 所示。

表 2 r_k 取值

Table 2 r_k values

| r_k | 说明 | r_k | 说明 |
|-------|------------------------|-------|------------------------|
| 1.0 | X_{k-1} 与 X_k 相同重要 | 1.6 | X_{k-1} 比 X_k 强烈重要 |
| 1.2 | X_{k-1} 比 X_k 稍微重要 | 1.8 | X_{k-1} 比 X_k 极端重要 |
| 1.4 | X_{k-1} 比 X_k 明显重要 | | |

根据各指标间的相对重要程度值, 可求得主观权重 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$, 即

$$\begin{cases} \omega_m = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i)^{-1} \\ \omega_{k-1} = r_k \omega_k, k = m, m-1, \dots, 3, 2 \end{cases} \quad (16)$$

3.3.2 基于 CRITIC 法的客观赋权

CRITIC 法通过利用指标内的差异及指标间的冲突性,综合比较指标间的对比强度和冲突性,从而确定指标客观权重。

首先,按照式(11)、(12)对原始数据进行标准化处理,得到标准化指标值。计算 n 个评估对象各评估指标的标准差 δ_j 以及冲突系数 $\sum_{j=1}^m (1 - p_{ij})$, 即

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ \delta_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \end{cases} \quad (17)$$

$$p_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

然后,分析指标间的信息量确定客观权重。采用 C_j 衡量信息量大小, $C_j = \delta_j \sum_{j=1}^m (1 - p_{ij})$, 则

$$\tilde{\omega}_j = C_j / \sum_{k=1}^m C_k \quad (19)$$

根据式(19)可确定各指标的客观权重 $\tilde{\omega} = \{\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_m\}$ 。

3.3.3 综合权重计算

为了获得科学合理的综合理想权重,本文建立基于最小熵的综合权重优化模型,以求解与主、客观权重一致性最好的综合权重 W , 即

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^m W_i (\ln W_i - \ln \omega_i) + \sum_{i=1}^m W_i (\ln W_i - \ln \tilde{\omega}_i) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m W_i = 1, W_i > 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, ω_i 为主观权重, $\tilde{\omega}_i$ 为客观权重, W_i 为综合权重, $W_i = \sqrt{\omega_i \tilde{\omega}_i} / \sum_{k=1}^m \sqrt{\omega_k \tilde{\omega}_k}$ 。根据拉格朗日算法对式(20)进行求解,可得综合权重向量 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ 。

3.4 综合评估流程

本文综合评估流程如图 7 所示,具体步骤如下。

1) 基于 95% 概率值,根据原始谐波数据提取 CP95 指标值;

2) 对数据谐波曲线按照基本时序特性类型进行初步判断,基于双激励原理计算双激励控制线,根据时序类型计算对应正、负激励系数,提取谐波时序趋势特性指标值;

3) 对指标值进行无量纲化、标准化处理;

4) 基于最小熵原理,分别利用序关系分析法和 CRITIC 法确定指标综合权重;

5) 通过加权综合计算得到各节点谐波水平等级。

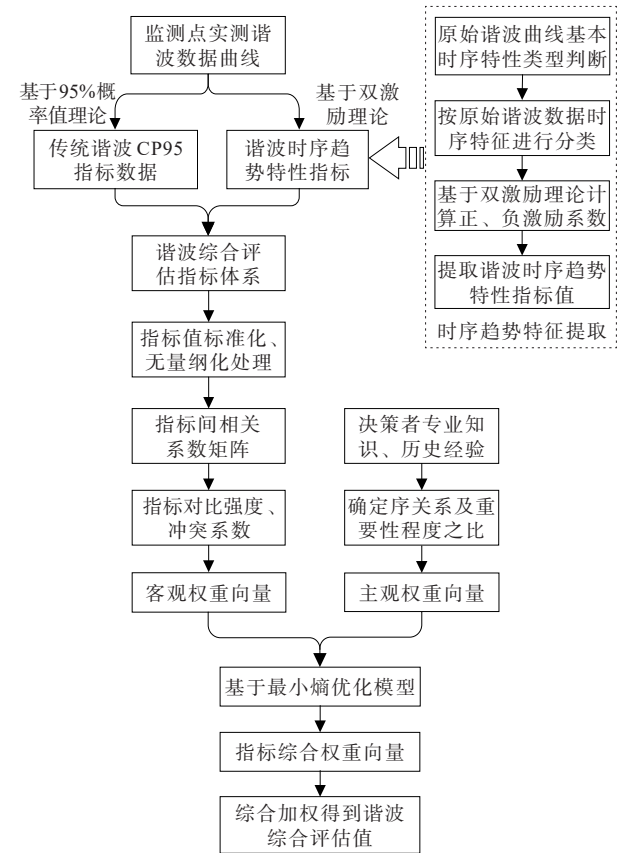


图 7 综合评估流程

Figure 7 Comprehensive assessment flowchart

4 算例分析

本文以江苏电网 500 kV 高压直流输电换流站为例,对该区域内的 5 个重要谐波监测点进行质量水平综合评估。通过监测系统收集并整理该地区的实测谐波数据,选取监测点 9 月份某周内的电压

总谐波畸变率实测数据,并绘制相对应数据曲线,便于分析其中蕴含的谐波数据特征(图1)。

本文基于双激励原理的时序趋势提取算法,对谐波数据曲线进行基本时序类型判断以及预处理,获得谐波时序趋势特征指标值 X_5 ;基于所建立的谐波综合评估指标体系,提取各监测点谐波电压数据中的电压总谐波畸变率CP95值 X_1 以及各次谐波含有率 X_2 、 X_3 、 X_4 ,如表3所示,可知时序趋势特性差异较大的监测点谐波数据曲线具有相近甚至相同的CP95值,如1、2号监测点数据曲线,3、4、5号数据曲线。

表3 谐波综合评估指标值

| 监测点 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 2.900 0 | 2.717 5 | 2.080 0 | 1.520 0 | 0.870 0 |
| 2 | 2.900 0 | 2.339 2 | 2.640 0 | 0.230 0 | 0.560 0 |
| 3 | 1.730 0 | 1.549 2 | 1.650 0 | 0.250 0 | 0.500 0 |
| 4 | 1.730 0 | 1.637 7 | 1.080 0 | 0.260 0 | 0.530 0 |
| 5 | 1.730 0 | 1.671 7 | 1.600 0 | 0.300 0 | 0.560 0 |

结合专家们的专业知识和工程实践经验,对各监测点谐波数据曲线进行基本时序类型判断,并按照式(13)进行数据标准化处理;根据式(14)~(19)分别计算得到主、客观权重;基于最小熵原理,根据式(20)计算得到谐波评估指标综合权重,如表4所示。

表4 谐波评估指标综合权重

| 权重 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 主观 | 0.299 6 | 0.249 7 | 0.178 3 | 0.148 6 | 0.123 8 |
| 客观 | 0.208 9 | 0.124 8 | 0.288 6 | 0.210 9 | 0.166 8 |
| 综合 | 0.256 8 | 0.181 2 | 0.232 8 | 0.181 7 | 0.147 5 |

基于本文所建立的谐波综合评估指标体系及其评估模型,对上述5个重要监测点谐波数据进行质量水平评估,并且对比仅考虑单一CP95值的传统谐波评估方法^[22],如图8所示,可知基于仅考虑电压总谐波畸变率CP95值的传统谐波评估方法,因部分监测点指标皆具有相同CP95值,从而得到相同的谐波质量评估结果。然而,各监测点谐波数据曲线间存在显著的时序趋势特性,其谐波质量必然

存在差异性。可见,仅考虑单一电压总谐波畸变率CP95值的传统谐波评估方法不能科学合理地评估各监测点实际谐波质量水平。

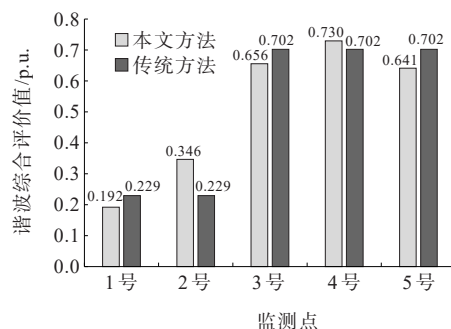


图8 谐波综合评估值对比

Figure 8 Comparison of comprehensive evaluation values of harmonics

在电压总谐波畸变率CP95值的基础上,本文考虑各监测点数据曲线的时序趋势特性,有效区分时序趋势特性差异较大且CP95值相同的多条谐波数据曲线,表征其谐波水平差异。

1) 1、2号监测点皆具有相同电压总谐波畸变率CP95值(该数值为2.9),谐波综合评估值都低于0.4,其谐波质量属于较差水平;考虑数据时序趋势特性,1号数据曲线为线性递增,2号为指数递增。基于双激励原理的时序特征值提取方法,2号小于1号监测点指标 X_5 ,其整体维持平稳趋势,数据稳定性高。因此,2号略高于1号监测点谐波综合评估值。

2) 观察3~5号监测点指标值可知,3个监测点皆具有相同的指标值 X_1 (该数值为2.9),谐波综合评估值皆大于0.6,其谐波质量属于中等水平;指标值 X_3 、 X_4 、 X_5 都十分相近,而4号小于3、5号监测点时序特征指标 X_2 ,且5次谐波含量较小,谐波质量优于其他监测点。因此,4号略高于3、5号监测点谐波综合评估值。

5 结语

现有标准体系中仅考虑CP95值量化的评估方法无法对时序趋势特性差异大而CP95值相似的多条谐波曲线实现有效区分,不能科学合理地表征各曲线谐波水平差异。本文基于典型场景围

绕高压谐波水平评估展开研究,提出了一种考虑时序趋势特性的典型场景高压谐波综合评估方法。首先,提出了一种基于双激励理论的时序趋势特性提取方法,并在此基础上构建了涵盖时序趋势特性的谐波扩展评估指标体系,突显出实测谐波数据曲线原有的时序趋势;然后,采用基于最小熵原理的组合赋权评估模型,并纳入双激励时序特征及指标之间的相关性特征;最后,经过实例验证得到以下结论:

1) 通过对高压谐波实测数据曲线进行分析,归纳、概括出基本时序特性类型,基于双激励原理提取不同类型数据曲线的时序趋势特征值,该指标值能有效地结合数据曲线的时序发展,形成具有时序趋势特性的谐波评估值;

2) 相较于传统评估方法,本文所提出的评估方法能够充分考虑数据曲线原有的时序趋势特性,可有效区分时序趋势特性差异大而CP95值相似的多条谐波曲线,表征其谐波水平的差异,得到更为科学合理的谐波评估结果,发掘谐波数据中隐藏的风险,为谐波治理以及谐波水平控制奠定基础。

参考文献:

- [1] 李笑容,丁健民,杨金刚,等.电力系统谐波评估有关问题的探讨[J].自动化与仪器仪表,2016(12):191-194+197.
LI Xiaorong, DING Jianming, YANG Jingang, et al. Discussion on related issues of power system harmonic evaluation[J]. Automation & Instrumentation, 2016(12): 191-194+197.
- [2] 孙巍巍,曾江,俞家良,等.谐波国标中95%概率值评价方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):7-11+18.
SUN Weiwei, ZENG Jiang, YU Jialiang, et al. Research on the evaluation mode of 95% probability value in the national standard GB/T 14549—93[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18):7-11+18.
- [3] GB/T 14549—1993.电能质量公用电网谐波[S].
GB/T 14549—1993. Power quality harmonics of public power grid[S].
- [4] HU H T, HE Z Y, GAO S B. Passive filter design for china high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1):505-514.
- [5] 周胜军,谈萌.基于监测数据的高铁动车组谐波特性分析[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):128-133.
ZHOU Shengjun, TAN Meng. Harmonic characteristics analysis of electric multiple units in high-speed railway based on the monitoring data[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 128-133.
- [6] LIU Z F, RONG J, ZHAO G K, et al. Harmonic assessment for wind parks based on sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4):1373-1382.
- [7] LIU D, LI X H, CAI Z X. Analysis of the harmonic transmission characteristics of HVDC transmission based on a unified port theory model[J]. IEEE Access, 2020, 8: 8922-8934.
- [8] 宋可荐,吴命利,杨少兵,等.我国电气化铁路高次谐波谐振问题研究综述[J].铁道学报,2021,43(1):64-76.
SONG Kejian, WU Mingli, YANG Shaobing, et al. Review of high-order harmonic resonances of electric railways in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1):64-76.
- [9] 程伟添,欧阳森,黄祎.考虑数据离散波动的电网高压谐波质量综合评价方法[J].南方电网技术,2022,16(11):111-119.
CHENG Weitian, OUYANG Sen, HUANG Yi, et al. Comprehensive evaluation method of high voltage harmonic quality of power grid considering discrete fluctuation of data[J]. South Power System Technology, 2022, 16(11):111-119.
- [10] 雷达,常潇,刘子腾,等.基于DBSCAN聚类和数据筛选的系统谐波阻抗估算[J].电测与仪表,2022,59(1):93-98.
LEI Da, CHANG Xiao, LIU Ziteng, et al. Estimation of system harmonic impedance based on DBSCAN clustering and data filtering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1):93-98.
- [11] 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, ZHAO 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.
- [12] 靳海强,文俊,王彤彤,等.基于改进方差特性二维混合抽样蒙特卡罗法的多谐波源叠加研究[J].电网与清洁

- 能源,2021,37(1):16-23+31.
- JIN Haiqiang, WEN Jun, WANG Tongtong, et al. Research on multiple harmonic source superposition based on improved variance characteristic two-dimensional mixed sampling Monte Carlo method[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1):16-23+31.
- [13] 杨义, 杨苹, 唐玉峰. 兼具电能质量补偿功能的互联变换器统一控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 132-140.
- YANG Yi, YANG Ping, TANG Yufeng. Unified control strategy with power quality compensation function for interlinking converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15):132-140.
- [14] 郭慧珠, 孟鑫, 贺明智, 等. 无通信高电能质量的微电网平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2611-2621.
- GUO Huizhu, MENG Xin, HE Mingzhi, et al. An enhanced power quality and smooth transition control strategy for a microgrid without remote pre-synchronization communication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2611-2621.
- [15] 袁性忠, 王辉, 贾宏刚, 等. 基于储能型 APF 的微电网电能质量综合治理[J]. 高压电器, 2022, 58(8):238-244+251.
- YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):238-244+251.
- [16] 姚猛, 蒋德珑, 陈根永. 基于模糊聚类的电网谐波综合评估方法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(10):1-4+24.
- YAO Meng, JIANG Delong, CHEN Genyong. Application of fuzzy clustering on power grid harmonic comprehensive evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(10):1-4+24.
- [17] 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.
- [18] 王伟明, 徐海燕, 张发明. 基于双激励模型的学术期刊动态综合评价研究[J]. 情报资料工作, 2020, 41(5):65-71.
- WANG Weiming, XU Haiyan, ZHANG Faming. Re-search on dynamic comprehensive evaluation of academic journals based on dual incentive[J]. Information and Documentation Services, 2020, 41(5):65-71.
- [19] 欧阳森, 石怡理, 刘洋. 基于双激励控制线的区域电网电能质量动态综合评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(12):205-210.
- OUYANG Sen, SHI Yili, LIU Yang. Dynamic comprehensive evaluation of power quality for regional grid based on double inspiring control lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(12):205-210.
- [20] 王源, 姜懿郎, 王长江, 等. 基于改进 G1-CRITIC 的直流多馈入受端系统故障筛选与排序[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(12):43-52.
- WANG Yuan, JIANG Yilang, WANG Changjiang, et al. Based on improved G1-CRITIC method for fault screening and sequencing of DC multi-infeed receiving and system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(12):43-52.
- [21] 宫诚举, 李伟伟, 郭亚军. 群体评价中的序关系分析法[J]. 运筹与管理, 2020, 29(11):152-156.
- GONG Chengju, LI Weiwei, GUO Yajun. Rank correlation analysis method in group evaluation[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(11):152-156.
- [22] 孙建梅, 陈璐. 基于组合赋权法的 TOPSIS 模型的电能质量综合评估[J]. 电气应用, 2020, 39(3):20-25.
- SUN Jianmei, CHEN Lu. Comprehensive power quality evaluation of TOPSIS model based on combinatorial weighting method[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(3):20-25.