

多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述

丁同¹, 陈红坤¹, 吴斌², 张靖宗¹, 曾令华¹

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 国网电力科学研究院 武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:谐波源的准确辨识对推动谐波奖惩机制的有效实施和谐波治理具有重要的意义。随着电网中多谐波源共存的情况日益普遍,一次针对单个谐波源进行辨识的研究思路已不再适用。为此,从多谐波源定位和谐波责任量化区分2个方面入手,对国内外的研究现状进行了归纳与总结。首先,介绍了谐波状态估计的数学模型以及应用该理论进行多谐波源定位的基本原理和具体方法,并指出这些方法存在的局限性;其次,在定义谐波责任指标的基础上,分2类研究场景梳理了多谐波源谐波责任的量化区分方法,并对相关研究的共性问题进行了分析;然后,结合电力电子化配电网中谐波呈现的动态时变特征,阐述了解决上述问题的最新研究进展;最后,提出该领域目前所面临的挑战,对未来需要深入探究的方向做出了展望。

关键词:多谐波源定位;谐波责任量化区分;谐波阻抗;谐波状态估计;独立分量分析;综述

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912004

0 引言

近年来,电网结构和负荷类型发生了深刻变革,各方对电能质量的要求也逐步提高。然而,大量电力电子装置和非线性负荷的接入造成了日益严峻的谐波污染问题^[1-2],不仅威胁电力系统的安全稳定运行,也给用户带来了不可估量的经济损失。同时,各类新型谐波源激增导致多谐波源共存的工况增多,也增强了电网谐波的随机性和时变性,使谐波问题更加复杂化。

为了避免因电能质量问题产生争端,并对谐波进行有效的管控,国际上提出一种“奖惩性方案”^[3],即对产生谐波污染的谐波源用户进行相应的惩罚,对有效抑制电网谐波水平的用户给予相应的奖励。这一方案能够体现供电方和用户对电能质量状况的共同责任,但其实施的前提是对多谐波源进行准确辨识,主要难点包括以下2个方面:①正确定位系统中所有谐波源的位置,并定量估计各谐波源注入系统的谐波电流大小;②根据谐波源定位的结果,以每个谐波源的谐波注入电流对系统谐波畸变的影响程度作为评判标准,合理地量化区分各谐波源对系统谐波应承担的责任。

谐波源定位是通过量测装置采集谐波电压和谐波电流数据并采用相应的算法进行分析,进而确定每个谐波源所在的节点并分离出各谐波源的谐波注入电流,为后续进行谐波责任量化区分提供依据。目前的谐波源定位方法总体上可以分为2类:一类是基于等效电路模型的方法,另一类是基于谐波状态估计的方法。前者通过建立等效电路模型,在公共连接点PCC(Point of Common Coupling)处划分出系统侧和用户侧,并依据不同的定位理论确定主

谐波源侧^[4-7]。该类方法的原理简单、直观,但是一次只能针对一个节点进行谐波源辨识,一般将其应用于单谐波源系统。而基于谐波状态估计的方法无需预知谐波源信息即可获取整个系统的谐波电压和谐波电流分布情况,从而在全网范围内对多个谐波源进行追溯,因此逐渐成为当前的研究热点^[8-9]。

量化区分谐波责任是谐波源定位的目的,其意义在于分清供电部门和每个谐波源用户的谐波责任,促使各方自觉维护谐波合格水平,共同推动谐波污染治理。目前的研究思路通常是基于诺顿等效电路,在PCC处划分出系统侧和用户侧,通过计算谐波发射水平来评估系统和用户双方对PCC处谐波畸变的影响程度^[10-13]。这种思路适用于对单个谐波源负荷的谐波责任进行评估。然而实际电网中通常包含多个谐波源负荷,每条母线上的谐波畸变都不是单一谐波源造成的,而是所有谐波源注入的谐波电流共同作用的结果,每个谐波源的谐波责任与其谐波发射水平不一定呈正相关^[14]。因此,需要研究适用于多谐波源场景下量化谐波责任的合理指标,以及如何准确区分每个谐波源应承担的谐波责任。

本文针对多谐波源的准确辨识问题,围绕多谐波源定位和谐波责任量化区分2个方面,对此前的相关研究成果进行梳理和综述,指出其中存在的不足。结合目前配电网电力电子化背景下谐波呈现的动态时变特征,对该领域的最新研究进展进行介绍,并展望仍然有待解决的问题,为下一步需要深入探索的工作提供参考。

1 基于谐波状态估计的多谐波源定位

1.1 谐波状态估计的数学模型

谐波状态估计是传统状态估计技术在谐波领域

内的应用,主要包括选取量测量和状态量、根据网络拓扑结构与元件谐波参数建立参数矩阵、求解谐波状态估计数学模型这3个步骤^[15-16],其基本流程如图1所示。

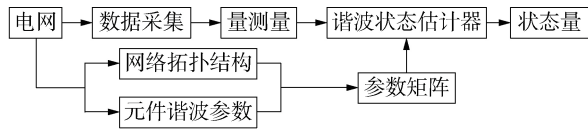


图1 谐波状态估计的基本流程

Fig.1 Basic flowchart of harmonic state estimation

在不考虑误差的情况下,谐波状态估计的数学模型可以表示为:

$$z = Hx \quad (1)$$

其中, z 为 m 维量测量向量; x 为 n 维待求状态量向量; H 为 $m \times n$ 阶量测矩阵。

由于在实际量测过程中容易受到噪声的干扰,所获得的量测量通常存在一定的误差^[17]。在考虑量测误差后,式(1)变换为:

$$z + \eta = Hx \quad (2)$$

其中, η 为由量测噪声导致的 m 维量测误差向量。

在建立网络参数矩阵的过程中,由于噪声污染的影响,也会有误差存在。当同时考虑量测误差和参数矩阵元素误差时,谐波状态估计的数学模型可用如下形式表示:

$$z + \eta = (H + \varepsilon_H)x \quad (3)$$

其中, ε_H 为 $m \times n$ 阶参数矩阵元素的随机误差。

谐波状态估计的关键是求解式(3)所示的线性或非线性方程组,针对方程组经常出现的超定或欠定情况,一般采用最小二乘法及其改进算法来进行求解。

1.2 基于谐波状态估计的定位原理

基于谐波状态估计的定位原理是依据负荷注入系统的谐波有功功率的正负来判断该负荷是否为谐波源^[18]。假设已经利用谐波状态估计技术得到全网的谐波电压,则可以根据节点电压方程求出系统中各母线的相关信息,即:

$$I_i(h) = \sum_{j=1}^n Y_{ij}(h) U_j(h) \quad (4)$$

其中, $I_i(h)$ 为第 i 条母线的第 h 次谐波注入电流; $Y_{ij}(h)$ 为系统的节点谐波导纳矩阵; $U_j(h)$ 为估计得到的网络谐波电压状态。

第 i 条母线的第 h 次谐波有功功率为:

$$P_i(h) = \text{Re}[U_i(h) I_i^*(h)] \quad (5)$$

根据式(5)可以判断关注母线的性质,如果 $P_i(h) > 0$,则该母线为该次谐波的注入源;反之,则该母线为该次谐波的吸收源。

1.3 基于谐波状态估计的定位方法

1.3.1 基于谐波功率量测的方法

文献[19]最早提出运用谐波状态估计的方法来定位谐波源,选取节点注入视在功率和线路视在功率作为量测量,谐波电流作为状态变量,利用广义逆矩阵结合最小二乘法进行求解,并根据支路是否注入有功功率来判断该支路是否存在谐波源,所做工作在该领域起到了开创性的作用。由于选择视在功率作为量测量,而目前关于无功功率的定义尚不明确,其量测装置还没有形成统一的标准,因此该方法的实用性存在一定的争议。

1.3.2 基于谐波电压量测的方法

文献[20]引入卡尔曼滤波器,以谐波电压为量测量、谐波电流为状态量,提出一种可应用于三相不平衡电网的谐波源实时追踪方法。该方法通过对测量误差协方差矩阵进行分析,并考虑谐波电流注入的估计情况,来优化量测装置的数目和布局,从而达到降低量测成本的目的。

1.3.3 基于非同步谐波电压、电流量测的方法

文献[21]选取谐波电压、电流作为量测量,谐波电压作为状态变量,结合最小方差估计算法进行谐波状态估计,但该方法的计算量较大,且通过增加量测来提高估计精度,导致成本增加。基于此,文献[22]将母线划分为非谐波源母线和可能存在谐波源的母线,提出采用连续谐波状态估计算法,明显优化了计算流程,并减少了量测装置的配置,提高了估计效率。

1.3.4 基于同步谐波电压、电流相量量测的方法

目前,基于全球定位系统的同步相量量测技术日益成熟,谐波状态估计一般不再选择谐波功率作为量测量,而是利用同步相量量测装置PMU(Phasor Measurement Unit)获取谐波电压以及电流相量作为量测量,这样就将原来的非线性量测方程转变为线性方程进行求解,使得谐波状态估计流程得以简化。文献[23]基于相量量测技术,提出谐波状态估计的分层算法,将分析场景从整个系统转化为多个单母线系统,显著地降低了量测矩阵的维度。文献[24]将传统潮流状态估计的可观性分析算法应用到谐波状态估计领域中,并且根据量测配置的特点提出了基于相关性理论的可观性分析算法与逻辑判断法。

受技术条件和经济因素的限制,电网中安装PMU的节点数量是有限的,所建立的谐波状态估计方程通常是欠定的。针对这一问题,文献[25]提出基于奇异值分解的谐波状态估计方法,在系统不可观的条件下仍能获得可行解。文献[26]将奇异值分解法应用于新西兰南岛的实际电力系统中,并证明

了其有效性。文献[27]在量测有限的条件下,采用5次谐波的相角分类模型实现谐波源定位。文献[28]根据谐波源的空间稀疏性特征,利用稀疏表示法进行谐波源定位,克服了因量测量不足导致的系统不能完全可观的难题。文献[29]针对谐波状态估计模型出现病态问题的情况,提出应用广义岭估计的方法进行求解,相比于最小二乘法,其改善了估计的精度。

1.3.5 结合人工神经网络的方法

人工神经网络ANN(Artificial Neural Network)具有较好的自适应、自组织、自学习能力,能够自动识别输入量和输出量之间的非线性关系,将其与谐波状态估计方法相结合,可以减少所需量测装置的数量,改善谐波源定位的精确程度。文献[30]根据不同类型的负荷会产生不同的谐波电流,通过训练建立不同的ANN模型来对相应的谐波电流进行特征识别,但是建立ANN模型需要预先进行大量的训练,而且当网络拓扑结构发生变化时,已经训练好的ANN模型将不再适用。针对ANN缺乏自我修正能力的缺点,文献[31]提出一种基于级联相关网络CCN(Cascade Correlation Network)的方法,该网络可以根据需求灵活地改变自身的结构,学习速度较快,克服了传统ANN的不足,同时起到了优化量测配置的效果。

1.4 存在的问题

综合上述分析可以知道,谐波状态估计方法可以根据谐波的分布情况,在全网范围内识别谐波源的位置、类型以及大小,具有整体可观性以及较高的定位精度,更适用于包含多个谐波源的系统。但是该方法在网络谐波建模、求解算法简便性以及可观性分析方面仍然存在一些有待解决的问题^[32]。目前已有学者尝试对谐波状态估计方法进行改进,在其基础上引申出新的算法,为解决多谐波源定位问题提供有效的思路。文献[33-34]针对状态量和量测量之间存在误差的情况,分别提出采用粒子群优化算法和蜂群算法来使误差最小化。文献[35-36]分别运用十进制遗传算法和二进制遗传算法对谐波量测装置进行优化配置,在保证估计精确度的基础上尽可能降低成本。文献[37]研究了基于贝叶斯定理的定位方法,首先圈定一个可能存在谐波源的疑似区域,然后寻找谐波源的确切位置。但是,以上方法均是在电网拓扑结构以及网络参数信息完备的前提下进行分析的,而现代配电网表现出明显的动态特性,非基频条件下的网络参数以及拓扑结构经常发生改变,往往很难准确获取,导致这些方法难以应用于实际工程。因此,亟需针对在缺乏相关谐波阻抗信息的情况下进行多谐波源定位这一难题展开深入探究。

2 考虑不同场景的多谐波源谐波责任量化区分

2.1 谐波责任指标

完成谐波源定位工作,获得各谐波源的谐波注入电流状态后,就可进一步实施谐波责任的量化区分,关键是选择合适的评估指标,目前常见的用于衡量谐波责任的指标包括谐波有功功率^[38-40]、谐波发射水平^[41-43]、谐波电流责任^[44-45]以及谐波电压责任^[46-47]等。

谐波有功功率可用于判断谐波源的方位。根据PCC处谐波有功功率的流向来识别主谐波源是来自系统侧还是来自用户侧。定义正方向为从系统侧流向用户侧,若谐波有功功率为正值,则说明系统侧为主要谐波源;若为负值,则说明用户侧是主要谐波源。但是谐波有功功率受谐波源间的相角差影响较大,且只能定性地确定谐波源的位置,而无法定量地计算得到谐波责任。

谐波发射水平指谐波源接入系统前、后造成的PCC处谐波电压的变化量,可用来衡量某负荷对PCC处的谐波贡献,从而判断该负荷能否安全接入电网。谐波发射水平不仅与谐波源自身的负荷特性有关,还受PCC处的总谐波畸变程度的影响。如果PCC处本来的谐波畸变就很严重,则可能导致接入系统的负荷产生偏高的谐波发射水平,这种情况下认定该负荷应承担较大的谐波责任是不合理的。因此,谐波发射水平不适合作为准确衡量谐波责任的指标。

谐波电流责任指某谐波源在PCC处产生的谐波电流与PCC处总谐波电流的比值。类似地,谐波电压责任指某谐波源在PCC处产生的谐波电压与PCC处总谐波电压的比值。当对同一场景进行分析时,谐波电流责任和谐波电压责任的计算结果常常出现不一致的情况。由于不同电压等级下的谐波电流造成的污染对比不明显,而公用电网的目标是为用户提供优质的电压,因此一般选择谐波电压责任作为衡量谐波源谐波责任的合理指标。

2.2 集中式多谐波源谐波责任量化区分

实际配电网中经常存在PCC母线上连接有多条谐波源负荷馈线的情况,各馈线之间彼此影响,导致谐波电流出现相互增强或抵消的现象。仅凭谐波电流大小或谐波发射水平无法准确地划分谐波责任。因此,有必要研究如何量化区分每一条馈线所接的谐波源负荷在PCC母线处产生的谐波责任。

以某一条PCC母线上连接 n 条谐波源负荷馈线的系统为例,系统示意图如图2所示。假设馈线 i ($i=1,2,\dots,n$)为关注谐波源馈线,根据叠加定理,PCC母线处的 h 次总谐波电压 U_{pcc}^h 为馈线 i 所连接谐

波源在PCC母线处产生的 h 次谐波电压 U_{pcc-i}^h 与其他所有谐波源产生的 h 次背景谐波电压 U_{pcc-0}^h 的相量和,即:

$$U_{pcc}^h = U_{pcc-i}^h + U_{pcc-0}^h = Z_{pcc-i}^h I_i^h + U_{pcc-0}^h \quad (6)$$

其中, Z_{pcc-i}^h 为除馈线 i 之外的PCC母线处 h 次等效谐波阻抗; I_i^h 为馈线 i 所连接谐波源负荷发射的 h 次谐波电流。

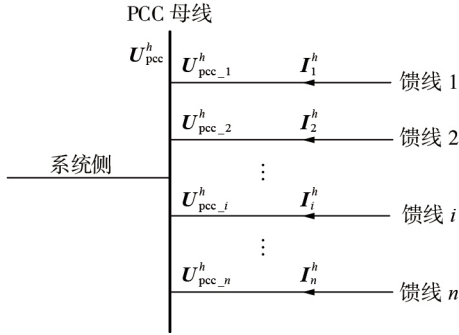


图2 PCC母线连接多条谐波源负荷馈线的系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of system with multiple harmonic source feeders at PCC bus

馈线 i 连接的谐波源负荷在PCC母线处产生的 h 次谐波电压 U_{pcc-i}^h 对PCC母线处的 h 次总谐波电压 U_{pcc}^h 的贡献可以用 U_{pcc-i}^h 在 U_{pcc}^h 上的投影表示,如图3所示。图中, θ_i 为 U_{pcc-i}^h 与 U_{pcc}^h 之间的夹角; θ_0 为 U_{pcc-0}^h 与 U_{pcc}^h 之间的夹角。

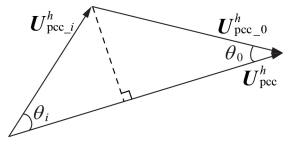


图3 谐波电压相量投影示意图

Fig.3 Schematic diagram of phasor projection of harmonic voltage

则馈线 i 连接的谐波源负荷在PCC母线处的 h 次谐波电压责任 μ_{pcc-i}^h 可表示为:

$$\mu_{pcc-i}^h = \frac{|U_{pcc-i}^h| \cos \theta_i}{|U_{pcc}^h|} \times 100\% = \frac{|Z_{pcc-i}^h| |I_i^h| \cos \theta_i}{|U_{pcc}^h|} \times 100\% \quad (7)$$

其中, $|U_{pcc-i}^h|$ 、 $|I_i^h|$ 、 $|Z_{pcc-i}^h|$ 分别为 U_{pcc-i}^h 、 I_i^h 、 Z_{pcc-i}^h 的模值。由于 $\cos \theta_i$ 不易求解,可根据余弦定理消除 $\cos \theta_i$,得到实用的谐波电压责任计算公式为:

$$\mu_{pcc-i}^h = \frac{|U_{pcc}^h|^2 + |Z_{pcc-i}^h|^2 |I_i^h|^2 - |U_{pcc-0}^h|^2}{2 |U_{pcc}^h|^2} \quad (8)$$

其中, U_{pcc}^h 可以通过电能质量监测设备采集获得; I_i^h 根据前文分析可知应为馈线 i 所连接的谐波源负荷发射的 h 次谐波电流,称之为“理论电流”。但实际系统中,“理论电流”难以测量得到。相较而言,每条

馈线上实际流过的谐波电流比较容易测量,称之为“实际电流”。文献[48]将这2种电流进行对比分析,发现用“实际电流”代替“理论电流”进行谐波责任划分具有较高的一致性。因此,式(8)中的 I_i^h 也可利用监测设备获取。而如果已知谐波阻抗 Z_{pcc-i}^h ,则背景谐波电压 U_{pcc-0}^h 可根据式(6)求解得到。可见,要想实现谐波责任的准确量化区分,关键是进行谐波阻抗估计。

估计谐波阻抗的方法包括“干预式”和“非干预式”这2类。“干预式”方法由于强行注入或投切可能影响系统的正常运行,在实际应用中受到很大的限制^[49-50],而“非干预式”方法对系统运行不会造成干扰,因此逐渐成为目前进行谐波阻抗估计的主流方法,其中波动量法和线性回归法较为常用。

波动量法利用PCC处的谐波电压波动量与谐波电流波动量的比值符号特征来估计系统侧谐波阻抗。由于系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗,传统波动量法认为系统侧波动造成的影响可以忽略,PCC处的波动完全由用户侧波动引起。但实际情况系统侧与用户侧的谐波波动同时存在,传统方法不可避免地会产生误差。针对这一问题,文献[51]利用统计筛选原理,从PCC处的谐波电流中筛选出用户侧主导的波动量,有效地抑制了系统侧波动的干扰。当PCC两侧波动量相当时,波动量法的估计结果会存在盲区,基于此,文献[52]提出基于阻抗归一化趋势的判别方法,筛选出更有价值的样本点来估计谐波阻抗。波动量法的不足之处在于需要谐波电压与电流信号有足够大的波动,且对谐波测量的精度有较高的要求。

线性回归法基于PCC处的谐波电压与谐波电流,通过计算等效电路方程的回归系数来求解谐波阻抗。该方法的适用前提是系统较为稳定,背景谐波电压基本不变,且系统侧谐波阻抗为一个常数。文献[53]首次采用最小二乘法解决多谐波源责任划分问题,为后续研究做出了积极有益的铺垫。但是最小二乘法要求谐波电流相互独立,当系统中各谐波源存在相互作用时,其便难以准确量化谐波责任。文献[54]提出了偏最小二乘的方法,可以在自变量存在多重相关性的情况下进行回归。上述方法将谐波电压相量的实部与虚部分开计算,所得到的结果不是真正的最小二乘解,为此文献[55]提出复线性最小二乘方法,直接在复数域内进行求解,计算结果更加真实、可靠。传统最小二乘法需要迁就远端异常数据,导致回归欠缺稳健性。为了克服这一不足,文献[56]利用基于M估计稳健回归的评估方法,通过反复迭代加权来求解回归系数,有效地抑制了异常值的影响。然而,所有线性回归方法都存在一大缺陷,即当系统的背景谐波波动比较明显时,谐波阻抗估计结果的准确性将会大幅降低。

2.3 分散式多谐波源谐波责任量化区分

多谐波源谐波责任量化区分还有一种研究场景,即多个谐波源分散分布在配电网中,每一条母线上的谐波畸变都是所有谐波源共同影响的结果。对某一关注母线而言,需要定量评估系统中每个谐波源负荷对其谐波畸变应承担的谐波责任。

图4为一个包含 n 个谐波源负荷的系统,其对应的 h 次谐波网络节点方程为:

$$U^h = Z^h I^h \quad (9)$$

其中, U^h 为网络的 h 次谐波电压向量; I^h 为 h 次谐波电流向量; Z^h 为网络的 h 次谐波阻抗矩阵。

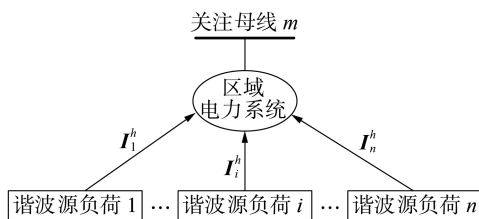


图4 多谐波源分散式分布的系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of system with multiple decentralized harmonic sources

将式(9)展开表示为:

$$\begin{bmatrix} U_1^h \\ \vdots \\ U_m^h \\ \vdots \\ U_n^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^h & \cdots & Z_{1m}^h & \cdots & Z_{1n}^h \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1}^h & \cdots & Z_{mm}^h & \cdots & Z_{mn}^h \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^h & \cdots & Z_{nm}^h & \cdots & Z_{nn}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^h \\ \vdots \\ I_m^h \\ \vdots \\ I_n^h \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)中的第 m 行对应关注母线 m ,其 h 次谐波电压 U_m^h 等于系统中所有谐波源负荷的谐波贡献之和,即:

$$U_m^h = \sum_{i=1}^n Z_{mi}^h I_i^h = \sum_{i=1}^n U_{mi}^h \quad (11)$$

其中, U_{mi}^h 为谐波源负荷 i ($i=1,2,\dots,n$)对关注母线 m 的谐波贡献; Z_{mi}^h 为关注母线 m 和谐波源负荷 i 之间的 h 次谐波自阻抗(当 $m=i$ 时)或互阻抗(当 $m \neq i$ 时)。

则谐波源负荷 i 对关注母线 m 的谐波责任定义为 U_{mi}^h 在 U_m^h 上的投影长度与 U_m^h 模长的比值。要想合理区分各谐波源负荷在关注母线 m 处的谐波责任,首要的是对各谐波源负荷与关注母线 m 之间的自阻抗和互阻抗进行准确估计。文献[57]将谐波电流曲线分为缓慢变化分量和快速变化分量,利用快速变化分量之间的相互独立性,提取得到式(11)中的自阻抗和互阻抗,从而成功分离得到各谐波源负荷对关注母线的谐波贡献。文献[58]利用该方法的研究思路,实现了主动配电网中谐波责任的有效、准确划分。但是这种方法是基于自阻抗和互阻抗为恒定值的假设展开分析的,在谐波阻抗发生变化的场

景中并不适用。

2.4 存在的问题

以上研究为多谐波源条件下的谐波责任量化区分提供了良好的思路,但是存在一个普遍的问题,即假定系统比较稳定,分析时段内背景谐波电压和谐波阻抗保持恒定。然而实际电网是动态时变的,背景谐波电压往往波动明显,多数“非干预式”方法抗背景谐波波动的能力较弱,直接利用这些方法对谐波阻抗进行估计会产生较大的误差。同时,由于系统运行方式的改变和设备的切换,谐波阻抗也并非恒定值。目前的谐波电压责任指标是基于谐波阻抗建立的,谐波阻抗的变化将会导致谐波责任随之发生改变。上述方法基于恒定谐波阻抗对谐波责任进行划分,其准确程度必然受到影响。因此,如何在背景谐波电压波动和谐波阻抗变化的条件下准确划分谐波责任,值得进一步研究。

3 计及谐波动态时变特征的研究进展

3.1 电力电子化配电网中的谐波特征

各类分布式新能源、电力电子型负荷的大量接入,加速了配电网的电力电子化进程^[59],由此导致了更为严重的谐波污染情况,多谐波源定位及谐波责任量化区分问题也变得复杂棘手,具体体现在以下几个方面^[60]。

(1)谐波来源更加丰富。在电网侧,柔性交、直流输电技术的普及使得大功率电力电子变换器广泛应用;在负荷侧,分布式电源、微网等通过换流器大量接入电网,民用非线性负荷的类型与数量逐渐增多。这些整流逆变型电力电子器件工作时都会产生谐波,造成配电网中谐波来源多样化的趋势日益显著。

(2)谐波产生机理更加复杂。从谐波产生源头分析,由于谐波源数量增加,彼此之间交互作用的现象非常普遍,一个谐波源的谐波发射特性往往会受到其他谐波源影响;从谐波传播过程分析,分布式电源接入的位置和容量会影响谐波的传播规律和分布情况,某些频率的谐波可能具备较强的传播能力,谐波流经某些节点时可能出现放大效应。

(3)谐波流向不确定性更加明显。风电、光伏等分布式新能源的出力受自然条件约束而具有较强的间歇性,电动汽车等新型非线性负荷的输出功率也体现出明显的时序特征,造成注入配电网中的谐波波动剧烈,准确测量谐波相角非常困难,导致PCC处谐波功率的流向愈发难以明确。

总体而言,在配电网电力电子化背景下,谐波具有更为显著的动态时变特征,主要表现为网络谐波参数随时改变,背景谐波电压与背景谐波阻抗明显波动等,进行谐波溯源及评估谐波责任时需要予以考虑。

3.2 网络谐波阻抗参数未知条件下的多谐波源定位

现有的基于谐波状态估计及其引申算法的多谐波源定位需要已知网络的谐波阻抗参数信息,而实际系统中通常难以准确知晓。盲源分离理论为解决这一难题提供了有效的途径,其中独立分量分析ICA(Independent Component Analysis)法是一种代表性方法^[61]。其数学模型为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为由 M 个量测信号组成的矩阵, $\mathbf{S}$ 为由 N 个未知源信号组成的矩阵,一般 $M \geq N$; $\mathbf{A}$ 为 $M \times N$ 阶混合矩阵。

ICA 法的目标是寻找到最佳的分离矩阵 $\mathbf{W}$ (即 $\mathbf{A}$ 的逆矩阵),使分离得到的信号尽可能接近源信号,表示成下列形式:

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (13)$$

其中, $\hat{\mathbf{S}}$ 为源信号 $\mathbf{S}$ 的估计值。

综上,ICA 法的基本流程见附录中图 A1。

对比式(1)和式(12)可见,两式中的参数存在一一对应关系,因此可将ICA法应用于多谐波源定位。当谐波源满足统计独立性和非高斯性的前提条件时,可在仅量测谐波电压数据而未知网络谐波阻抗参数的情况下,从多个谐波电流的混合信号中逐一分离出各谐波电流信号。

由于电网中各谐波源之间相互影响,产生的谐波电流并非是相互独立的,所以在使用ICA法之前需要对采集到的谐波电压信号进行预处理,具体方式是去均值及白化。去均值的目的是减小因数据量纲不同及差值较大引起的误差,而白化是为了消除谐波测量信号间的相关性。经过预处理后的谐波电压信号具有零均值、单位方差、各分量相互正交的特征,满足ICA法的要求,随后即可通过求解分离矩阵来对谐波电流进行估计。

在各类ICA法中,快速独立分量分析FastICA(Fast Independent Component Analysis)法因具有收敛速度快、分离效果好的优势脱颖而出。这是一种定点迭代优化算法,以追求各独立分量非高斯性最大为目标。非高斯性有多种度量方式,文献[62]提出一种基于负熵最大的FastICA法,采用牛顿迭代法求解分离矩阵,分离目标是使负熵最大化,其迭代形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{k+1} = E\{Xg(\mathbf{W}_k^T \mathbf{Z})\} - E\{g'(\mathbf{W}_k^T \mathbf{Z})\} \mathbf{W}_k \\ \mathbf{W}_{k+2} = \mathbf{W}_{k+1} / \|\mathbf{W}_{k+1}\| \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为谐波电压数据; $\mathbf{Z}$ 为预处理后的谐波电压数据; g 为非线性函数,常见的形式为 $g = y \exp(-y^2/2)$, y 为自变量; E 为数学期望; $\mathbf{W}_k$ 、 $\mathbf{W}_{k+1}$ 、 $\mathbf{W}_{k+2}$ 为不同迭代阶段的分离矩阵, $k = 1, 2, \dots, m_1, m_1$ 为迭代次数。

当式(14)收敛时,即可得到最优的分离矩阵 $\mathbf{W}$ 。

针对上述迭代算法是二阶收敛、收敛速度较慢的不足,文献[63]提出一种改进的FastICA法,采用修正的三阶牛顿迭代形式,加快了算法的收敛速度。同时,陆续有学者尝试采用其他ICA法,如核ICA^[64]、快速核熵优化ICA^[65]、有监督的ICA^[66]等,试图优化对源信号的分离效果,但是这些方法都没有解决分离得到的谐波电流次序不确定性的问题,主要表现为幅值、相位、排列位置随机变化,估计得到的信号与源信号之间不存在固定的对应关系,从而无法准确判断谐波源的位置。

解决上述问题的思路是寻找估计信号与量测信号之间的相关性度量方法,通过对估计信号进行排序,使其与量测信号之间的相关性最强,从而建立估计信号与源信号的一一对应关系,得到与源信号排序相一致的估计结果。在相关性度量方法方面,文献[67]提出基于互信息理论的思路,利用联合概率分布和边缘概率分布估算谐波电压、电流的互信息,互信息越大表明相关性越强;文献[68]采用相关系数矩阵来度量估计信号向量与观测信号向量之间的相关性,以相关系数矩阵各行元素中的绝对值最大者作为该行的排序标记;文献[69]以条件熵作为判据,利用谐波电流与其注入节点的谐波电压之间的条件熵最小,来判定谐波源的方位。

综合以上分析,总结得到网络谐波阻抗参数未知条件下的多谐波源定位流程,如附录中图 A2 所示。

3.3 背景谐波变化条件下的多谐波源谐波责任量化区分

3.3.1 考虑背景谐波电压波动

实际电网中的背景谐波电压是剧烈波动的,导致难以对谐波阻抗进行估计,如图5所示,当背景谐波电压分别为 $\mathbf{U}_{pcc_0(1)}^h$ 、 $\mathbf{U}_{pcc_0(2)}^h$ 和 $\mathbf{U}_{pcc_0(3)}^h$ 时,各自对应的谐波阻抗产生较大的偏差。传统的波动量法和线性回归法均基于背景谐波电压保持稳定的假设,无法适应实际电网的需求,因此亟待探究适用于背景谐波电压波动情况下的谐波责任量化区分方法,目

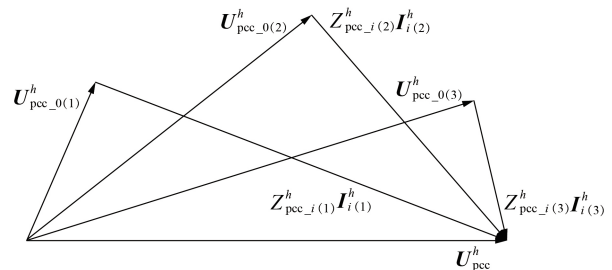


图5 背景谐波电压波动示意图

Fig.5 Schematic diagram of background harmonic voltage fluctuation

前的研究成果主要分为进行数据聚类 and 建立函数模型 2 类。

数据聚类法的研究思路是对背景谐波数据进行聚类处理,从而将分析时段划分为若干个子时段。实现的途径包括电压聚类和电流聚类 2 种方式,前者是为了保证每个子时段内的背景谐波电压近似保持不变,后者是为了保证每个子时段内只有关注谐波源负荷变化而其他谐波源负荷保持稳定。这 2 种方式的最终目标都是在各分析子时段内满足利用“非干预式”方法估计谐波阻抗的假设条件。数据聚类法的关键是选择合适的聚类算法,常用的算法包括改进的 k -means 算法^[70]、均值漂移算法^[71]、大地测量与地球物理研究所(IGG)权重函数^[72]等。其难点主要在于分段数目的选取:若分段过多,则会降低计算效率;若分段过少,则会影响求解精度,因此实际应用较为困难。

函数模型法通过分析背景谐波电压的主要来源,建立背景谐波电压的函数表达式,来描述其波动特性。该方法的关键在于建立合理的背景谐波电压函数模型,文献[73]根据背景谐波电压是时间的函数,将背景谐波电压在某一时刻进行泰勒展开并忽略高阶项,利用部分线性核估计方法对函数模型进行回归;文献[74]采用邻域多点测量方法,通过分析关注母线上的背景谐波电压来源,将背景谐波电压分为变动部分和不变部分,并将变动部分表示成关注母线邻域内其他谐波源发射的谐波电流与对应等效谐波阻抗的乘积之和。函数模型法应用数学形式描述背景谐波电压,为量化其波动规律提供了有效思路,但所选取模型的合理性仍有待验证。

3.3.2 考虑背景谐波阻抗变化

实际电网中经常发生负荷投切、无功补偿设备切换等情况,导致系统的背景谐波阻抗发生变化,进而改变 PCC 处的谐波畸变程度。现有方法大多假设分析时段内的背景谐波阻抗维持恒定,将其视为一个常数进行处理,这样无疑会影响谐波责任划分的准确性。

为了实现背景谐波阻抗变化下的谐波责任准确划分,通常将背景谐波阻抗进行分段处理,每段内的背景谐波阻抗近似恒定,各段的背景谐波阻抗各不相同。依次求解每段的谐波责任,再根据各段所占的权重,加权求和计算总谐波责任。由于目前的谐波责任指标将背景谐波阻抗视作恒定值,所以需重新建立背景谐波阻抗变化情况下的总谐波责任指标。

假设将背景谐波阻抗数据分成 N_b 段,第 k ($k = 1, 2, \dots, N_b$) 段中关注谐波源 i 的谐波责任为:

$$\mu_{\text{pcc}_i}^h(k) = \frac{\left| I_{\text{pcc}_i}^h(k) \right| \left| I_i^h(k) \right| \cos \theta_i(k)}{\left| U_{\text{pcc}}^h(k) \right|} \times 100\% \quad (15)$$

定义总谐波责任为:

$$\mu_{\text{pcc}_i}^h = \frac{\sum_{k=1}^{N_b} \mu_{\text{pcc}_i}^h(k) T_k}{\sum_{k=1}^{N_b} T_k} \quad (16)$$

其中, T_k 为第 k 段中的采样点数目。

对背景谐波阻抗进行分段的关键在于准确识别背景谐波阻抗变化的时刻。文献[75]利用斜率比较法进行分段。采集 PCC 处的谐波数据,以谐波电压为纵坐标,谐波电流为横坐标,则 2 个数据点连线的斜率近似为背景谐波阻抗的模值。通过检测斜率突变的时刻,即可得到背景谐波阻抗变化的时间点。由于背景谐波阻抗突变的边界点并不明显,文献[76]提出运用小波包变换的方法,将识别突变时间点转化为识别突变时间窗口,根据突变时间窗口与相邻窗口相比拟合曲线的斜率发生改变,来获得背景谐波阻抗的变化规律,从而改善了分段的准确程度。

考虑背景谐波阻抗变化的多谐波源谐波责任量化区分流程如附录中图 A3 所示。

4 未来研究展望

在包含多个谐波源的系统中准确识别各谐波源位置并合理划分谐波责任具有至关重要的现实意义,目前该领域的研究已取得一定的成果,但仍有诸多问题需要解决,未来需要深入探索的工作可从以下几个方面展开。

4.1 多谐波源定位

(1) 研究网络谐波阻抗参数变化条件下的定位方法。实际系统的网络谐波阻抗参数通常难以准确获取,基于 ICA 的谐波状态估计方法为解决这一难题提供了有效的途径。但是该方法基于某一固定的网络参数进行分析,而当前配电网的运行方式变化频繁,网络参数经常发生改变,这种情况下 ICA 法的计算精度将明显降低,因此需要研究适应网络谐波阻抗参数变化的新定位方法。

(2) 研究考虑谐波源波动特性的动态定位方法。分布式电源、电动汽车等新型谐波源具有明显的波动特性,导致电网中的谐波电压、电流动态时变。现有的谐波状态估计技术大多基于静态分析^[77],无法适应实际工程的需求。有必要结合谐波源的动态特征,建立更为准确的动态谐波状态估计模型,实现多谐波源的动态定位。

(3) 研究有限量测条件下的区域定位方法。谐波状态估计的精度依赖于量测点的数量和位置。受客观条件与经济因素的限制,在配电网的每个节点处都安装量测装置并不现实。在量测装置有限的情况下,研究对量测装置进行优化配置的算法,先实现多谐波源的区域定位,再逐步缩小可能存在谐波源

的嫌疑范围,直至精确识别谐波源所在位置。

(4)研究考虑误差影响的定位方法。受量测噪声影响,建立的谐波状态估计模型往往存在量测误差和参数误差。现有大多方法忽略了误差的影响,导致模型的估计精度欠佳。文献[78]提出考虑误差影响的两阶段定位方法,采用总体最小二乘法进行估计,但该方法不具备抑制粗差的能力。总体而言,关于考虑误差影响的定位方法的研究相对比较欠缺,有待进一步思考。

(5)研究基于谐波量测数据的定位方法。随着谐波量测技术的不断进步,谐波量测数据与之前相比出现井喷式增长。这些海量谐波数据能够全面反映系统中各个时段各次谐波的分布情况,以及各项谐波指标的变化规律,通过对其进行筛选处理、挖掘分析,提取得到体现谐波源运行状态的有用信息,可以为追溯配电网中的谐波来源提供重要依据。

4.2 多谐波源谐波责任量化区分

(1)建立更为合理的谐波指标体系。目前常用的谐波电压责任指标存在两大问题:一是只计算孤立的某一频次谐波的谐波责任,二是只计算某一时刻的瞬时谐波责任。该指标的合理性值得商榷。应该在明确谐波责任定义的基础上,构建新的评估谐波责任的指标集,对不同频率下的谐波责任进行统一分析,并尝试研究针对中长期时间范畴的谐波责任评估方法。

(2)克服背景谐波波动的影响。背景谐波电压与背景谐波阻抗的变化会导致谐波责任量化区分结果产生较大的误差,这是目前谐波责任划分领域存在的共性问题。现有方法的实质都是努力寻找背景谐波保持恒定的区间,但是在波动十分剧烈的情况下,这些方法的有效性还有待检验。如何刻画背景谐波的波动规律,量化背景谐波波动对谐波责任的影响,改善现有方法的精确程度,值得进一步研究。

(3)考虑分布式电源、电动汽车等新型谐波源的谐波责任划分。不同于传统谐波源,分布式电源、电动汽车等新型谐波源的谐波发射特性和交互作用特征较为复杂,注入的谐波具有明显的波动性与不确定性。传统的谐波责任划分方法不适用于接入这些新型谐波源的系统,需要在充分考虑其谐波特征的基础上,制定合理的谐波责任评估指标,进而探讨更加准确的谐波责任量化区分新方法。

(4)利用大数据分析技术进行工程实用的谐波责任划分。谐波量测技术的发展为实际工程中获取谐波大数据创造了便利的条件。大数据分析技术的核心思想是数据驱动,其侧重事件彼此的相关性^[79]。通过对电能质量监测系统采集的数据进行筛选、融合、挖掘,分析得到各项时变谐波数据之间的关联性特征,如谐波时间序列相似性^[80]等,可为研究适用于

工程实际的谐波责任量化区分提供有效的手段。

(5)制定基于谐波责任的奖惩性电费方案。量化区分谐波责任的最终目标是制定合理的计费方案。现有文献主要针对评估谐波责任的方法进行介绍,但并没有对如何依据谐波责任划分结果制定相应的奖惩性电费方案进行说明。为了使谐波责任划分领域的研究成果能够充分体现其实际应用价值,如何在考虑谐波责任的基础上制定合理的电费计量方案亟待深入探索。

5 结语

各类时变谐波源大量接入电网,导致准确识别谐波源的位置并合理区分各谐波源的责任非常困难。传统的针对单个谐波源逐一进行辨识的研究思路已不再适用,鉴于此,很多学者在多谐波源定位及谐波责任量化区分领域开展了丰富的研究工作,本文从基于谐波状态估计的多谐波源定位和考虑不同场景的多谐波源谐波责任量化区分2个角度出发,对相关研究方法进行总结与综述,并指出其中存在的问题。随后结合目前电力电子化配电网中谐波的动态时变特征,对尝试解决上述问题的最新研究进展进行梳理,介绍了网络谐波阻抗参数未知条件下的多谐波源定位以及背景谐波变化条件下的多谐波源谐波责任量化区分方法。最后分析该领域有待进一步完善与发展的内容,并对未来需要深入思考的方向做出了展望,旨在为本课题后续的相关研究提供帮助。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汪颖,罗代军,肖先勇,等. IEEE ICHQP2018与电能质量发展方向[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):197-203.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. IEEE ICHQP-2018 and development directions of power quality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 197-203.
- [2] DING T, CHEN H K, WU B, et al. Harmonic characteristics analysis of PWM-based electric vehicle chargers considering control strategy [C] // 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2018: 1-5.
- [3] MCEACHERN A, GRADY W M, MONCRIEF W A, et al. Revenue and harmonics: an evaluation of some proposed rate structures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 474-482.
- [4] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [5] 张哲, 陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 37-41.
ZHANG Zhe, CHEN Hongkun. Status and development of harmonic source identification [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2005, 17(5): 37-41.

- [6] 欧阳森,任震. 谐波源检测与识别方法综述[J]. 电网技术, 2006,30(增刊1):151-156.
OUYANG Sen,REN Zhen. A survey on monitoring and identifying methods of harmonic sources[J]. Power System Technology,2006,30(Supplement 1):151-156.
- [7] 周林,张凤,栗秋华,等. 配电网中谐波源定位方法综述[J]. 高电压技术,2007,33(5):103-108.
ZHOU Lin,ZHANG Feng,LI Qiuhua,et al. Methods for localizing the harmonic source in power distribution network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(5):103-108.
- [8] YU K K C,WATSON N R,ARRILLAGA J. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1577-1584.
- [9] 郑东方,陈红坤,杨志平. 独立分量分析在谐波源辨识中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(4):139-144.
ZHENG Dongfang,CHEN Hongkun,YANG Zhiping. Application of independent component analysis on harmonic source identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(4):139-144.
- [10] 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.
- [11] 车权,杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):39-42,49.
CHE Quan,YANG Honggeng. Assessing the harmonic emission level based on robust regression method[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):39-42,49.
- [12] HUI J,YANG H G,LIN S F,et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(3):1778-1786.
- [13] 邱思语,杨洪耕. 改进的加权支持向量机回归的谐波发射水平估计方法[J]. 电工技术学报,2016,31(5):85-90.
QIU Siyu,YANG Honggeng. Assessment method of harmonic emission level based on the improved weighted support vector machine regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(5):85-90.
- [14] XU W,BAHRY R,MAZIN H E,et al. A method to determine the harmonic contributions of multiple loads[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada:IEEE,2009:1-6.
- [15] KANAO N,YAMASHITA M,YANAGIDA H,et al. Power system harmonic analysis using state-estimation method for Japanese field data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):970-977.
- [16] NIU Shengsuo,LIANG Zhirui,SU Haifeng,et al. Power system harmonic state estimation based on PMU and ridge estimation[C]//The Proceedings of International Conference on Electricity Distribution. Nanjing,China:IEEE,2010:1-6.
- [17] 牛胜锁,张达,梁志瑞,等. 基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):106-111.
NIU Shengsuo,ZHANG Da,LIANG Zhirui,et al. Power system harmonic state estimation based on robust total least squares[J]. Power System Protection and Control,2014,42(11):106-111.
- [18] 韩美玉. 电力系统谐波状态估计与谐波源定位技术研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.
HAN Meiyu. Research on harmonic state estimation and harmonic source location in power system[D]. Qingdao:China University of Petroleum(East China),2011.
- [19] HEYDT G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(1):569-576.
- [20] MA H,GIRGIS A A. Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(3):1659-1665.
- [21] MELIOPOULOS A P S,ZHANG F,ZELINGHER S. Power system harmonic state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(3):1701-1709.
- [22] DU Z P,ARRILLAGA J,WATSON N. Continuous harmonic state estimation of power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution,1996,143(4):329-336.
- [23] 吴笃贵,徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I):理论、模型与求解算法[J]. 电工技术学报,2004,19(2):64-68,88.
WU Dugui,XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements(I):theory,model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(2):64-68,88.
- [24] 吴笃贵,徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(II):可观性、质量评估与算例研究[J]. 电工技术学报,2004,19(3):76-81.
WU Dugui,XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements(II):observability analysis,quality evaluation algorithm and example studies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(3):76-81.
- [25] YU K K C,WATSON N R. Three-phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems[C]//2004 International Conference on Power System Technology. Singapore:IEEE,2004:29-34.
- [26] MATAIR S S,WATSON N R,WONG K P,et al. Harmonic state estimation;a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network[C]//International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London,UK:IEEE,2000:41-46.
- [27] OKADA N,YUKIHIRA K. Harmonic state estimation in distribution network based on fifth harmonic current characteristic[C]//2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bucharest,Romania:IEEE,2014:566-570.
- [28] LIAO H W. Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(1):15-23.
- [29] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等. 基于广义岭估计的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):94-98.
NIU Shengsuo,LIANG Zhirui,ZHANG Jianhua,et al. Power system harmonic state estimation based on generalized ridge estimation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):94-98.
- [30] SRINIVASAN D,NG W S,LIEW A C. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):398-405.
- [31] LIN W M,LIN C H,TU K P,et al. Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(3):2166-2173.

- [32] 梁志瑞,叶慧强,赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):157-160.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control,2010,38(15):157-160.
- [33] AREFI A,HAGHIFAM M R,FATHI S H. Distribution harmonic state estimation based on a modified PSO considering parameters uncertainty[C]//2011 IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim,Norway:IEEE,2011:1-7.
- [34] AREFI A,HAGHIFAM M R,FATHI S H, et al. A novel algorithm based on honey bee mating optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators[C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest,Romania:IEEE,2009:1-6.
- [35] KUMAR A,DAS B,SHARMA J. Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1088-1096.
- [36] DEHKORDI B M,FESHARAKI F H,KIYOUNNARS A. Optimal measurement placement for static harmonic state estimation in the power systems based on genetic algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology,2009,4(2):175-184.
- [37] D'ANTONA G,MUSCASCAS C,PEGORARO P A, et al. Harmonic source estimation in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2011,60(10):3351-3359.
- [38] XU W. Power direction method cannot be used for harmonic source detection[C]//2000 Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle,WA,USA:IEEE,2000:1-5.
- [39] LI C,XU W. On defining harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Power Engineering Review,2002,22(7):44-45.
- [40] XU W,LIU X,LIU Y. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):214-219.
- [41] 黄舜,徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):93-97.
HUANG Shun,XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):93-97.
- [42] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):27-31.
HUI Jin,YANG Honggeng,LIN Shunfu, et al. Assessment method of harmonic emission level based on covariance characteristic of random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(7):27-31.
- [43] 袁林,杨洪耕,王智琦,等. 基于快速近似联合对角化的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):81-87.
YUAN Lin,YANG Honggeng,WANG Zhiqi, et al. Assessment method of harmonic emission level based on fast approximate joint diagonalization[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):81-87.
- [44] 马宏忠,徐刚,宋树平,等. 配电网中谐波电流责任划分定量分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):44-49.
MA Hongzhong,XU Gang,SONG Shuping, et al. Quantitative analysis of harmonic current responsibility in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):44-49.
- [45] 袁林,杨洪耕,王智琦,等. 基于区间约束的主谐波电流来源判别方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):143-148.
YUAN Lin,YANG Honggeng,WANG Zhiqi, et al. Identification method for main source of harmonic current based on boundary restriction[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):143-148.
- [46] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. 电网技术,2013,37(11):3110-3117.
HUA Huichun,JIA Xiufang,CAO Dongsheng, et al. Harmonic contribution estimation under power quality data interchange format[J]. Power System Technology,2013,37(11):3110-3117.
- [47] 陈静,符玲,臧天磊,等. 考虑背景谐波波动的谐波责任划分方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):61-66.
CHEN Jing,FU Ling,ZANG Tianlei, et al. Harmonic responsibility determination considering background harmonic fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):61-66.
- [48] 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.
- [49] AHMED E E,XU W. Assessment of potential harmonic problems for systems with distributed or random harmonic sources[J]. IEEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2007,1(3):506-515.
- [50] 吕洋. 电网谐波阻抗测量[D]. 杭州:浙江大学,2010.
LÜ Yang. Measurement of power system harmonic impedance[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010.
- [51] 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.
- [52] 惠锦,杨洪耕,叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):73-80.
HUI Jin,YANG Honggeng,YE Maoqing. Assessing harmonic emission level based on the impedance gathering trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):73-80.
- [53] 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.
- [54] 李丽,马宏忠,姜宁,等. 基于改进偏最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):92-95,131.
LI Li,MA Hongzhong,JIANG Ning, et al. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on improved partial least-squares regression method[J]. Power System Protection and Control,2011,39(1):92-95,131.
- [55] 贾秀芳,华回春,曹东升,等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):149-155.
JIA Xiufang,HUA Huichun,CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):149-155.
- [56] 孙媛媛,尹志明. 基于M估计稳健回归的多谐波源责任区分[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):166-173,233.
SUN Yuanyuan,YIN Zhiming. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on M-estimation

- robust regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 166-173, 233.
- [57] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波源条件下的谐波污染责任划分研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 48-54.
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Research on the responsibility partition of harmonic pollution of multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 48-54.
- [58] 李国栋, 李洪安, 葛磊蛟, 等. 主动配电网的谐波源定位方法及谐波责任划分[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 95-99, 129.
LI Guodong, LI Hong'an, GE Leijiao, et al. Harmonic source location method and division of harmonic responsibility in active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(11): 95-99, 129.
- [59] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高压谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [60] 王攸然, 张逸, 邵振国, 等. 谐波责任划分研究现状及在分布式电源并网条件下的展望[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(1): 61-69.
WANG Youran, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Current status of harmonic responsibility division and prospects under grid-connected distributed generations condition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(1): 61-69.
- [61] 杨源. 谐波源定位与谐波责任划分方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
YANG Yuan. The research of harmonic source location and harmonic contributions with multiple harmonic sources [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [62] 赵熙, 杨洪耕. 基于快速独立分量分析的系统侧谐波阻抗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 139-144, 151.
ZHAO Xi, YANG Honggeng. Method of calculating system-side harmonic impedance based on FastICA [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 139-144, 151.
- [63] 林顺富, 李扬, 汤波, 等. 基于改进FastICA及偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 308-314.
LIN Shunfu, LI Yang, TANG Bo, et al. System harmonic impedance estimation based on improved FastICA and partial least squares[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 308-314.
- [64] 杨雪萍, 杨洪耕, 马晓阳, 等. 基于核独立分量分析的谐波责任划分[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(12): 109-114.
YANG Xueping, YANG Honggeng, MA Xiaoyang, et al. Determination of harmonic contributions based on kernel independent component analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(12): 109-114.
- [65] SHWARTZ S, ZIBULEVSKY M, SCHECHNER Y Y. Fast kernel entropy estimation and optimization [J]. Signal Processing, 2005, 85(5): 1045-1058.
- [66] WU J W, WANG X, LIU Y D, et al. Identification of multiple harmonic sources in cyber-physical energy system using supervised independent component analysis [C]//2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Montevideo, Uruguay: IEEE, 2014: 496-501.
- [67] 苗长新, 冯学俊, 马士亮, 等. 基于独立分量分析和互信息的多谐波源定位[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 60-64.
MIAO Changxin, FENG Xuejun, MA Shiliang, et al. Localization of multi-harmonic sources based on independent component analysis and mutual information [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(11): 60-64.
- [68] 杨源, 臧天磊, 何正友. 一种谐波阻抗未知条件下的谐波源定位方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 222-226.
YANG Yuan, ZANG Tianlei, HE Zhengyou. A harmonic source location method under unknown harmonic impedance [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 222-226.
- [69] ZANG T L, HE Z Y, FU L, et al. Harmonic source localization approach based on fast kernel entropy optimization ICA and minimum conditional entropy [J]. Entropy, 2016, 18(6): 1-15.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 刘苏婕, 肖先勇, 刘亚梅, 等. 基于IGG权重函数复数域多元线性回归算法的谐波责任分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 160-166.
LIU Sujie, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. Harmonic responsibility allocation method based on complex field multiple linear regression algorithm with IGG weight function [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 160-166.
- [73] 贾秀芳, 张韶光, 华回春, 等. 部分线性核估计方法在谐波责任分摊问题中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 63-68.
JIA Xiufang, ZHANG Shaoguang, HUA Huichun, et al. Application of kernel estimation with partial linear method for harmonic contributions determination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 63-68.
- [74] 华回春, 贾秀芳, 张韶光. 谐波责任定量评估的邻域多点测量方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 502-508.
HUA Huichun, JIA Xiufang, ZHANG Shaoguang. Neighborhood multi-point measurement method for harmonic contribution determination [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 502-508.
- [75] 马智远, 许中, 黄裕春, 等. 背景谐波阻抗变化情况下的谐波责任划分[J]. 电测与仪表, 2016, 53(23): 78-83, 89.
MA Zhiyuan, XU Zhong, HUANG Yuchun, et al. Harmonic contributions determination on condition of changing background harmonic impedance [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(23): 78-83, 89.
- [76] 臧天磊. 动态条件下配电网多谐波源定位与贡献评估方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZANG Tianlei. Localization and contribution assessment method of multiple harmonic sources in distribution network under dynamic conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [77] 王艳, 臧天磊, 符玲, 等. 基于谐波源特征提取的电力系统动态谐波状态估计自适应方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2612-2619.
WANG Yan, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. Adaptive method for dynamic harmonic state estimation in power system based on feature extraction of harmonic source [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2612-2619.

- [78] 袁一丹,肖先勇,刘亚梅,等. 考虑误差影响的两阶段谐波源定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(12):91-96.
YUAN Yidan, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. Two-stage location method for harmonic sources considering the error effect[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(12): 91-96.
- [79] 张宇帆,艾芊,肖斐,等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):187-196.
ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 187-196.
- [80] 顾伟,邱海峰,尹香,等. 基于波形匹配的谐波责任划分方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):129-134.
GU Wei, QIU Haifeng, YIN Xiang, et al. Waveform matching based method for harmonic contribution determination[J]. Au-

tomation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 129-134.

作者简介:



丁 同

丁 同(1994—),男,安徽合肥人,博士研究生,主要研究方向为电力系统谐波源定位与谐波责任划分(**E-mail**: dingtong@whu.edu.cn);

陈红坤(1967—),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电能质量分析及评估、配电网规划等(**E-mail**: chkinsz@163.com);

吴 斌(1993—),男,湖北孝感人,工程师,硕士,主要研究方向为电能质量分析与评估(**E-mail**: 870658992@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources

DING Tong¹, CHEN Hongkun¹, WU Bin², ZHANG Jingzong¹, ZENG Linghua¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The accurate identification of harmonic sources is of great significance to the effective implementation of harmonic reward and punishment mechanism and harmonic control. With the coexistence of multiple harmonic sources in the power grid becoming increasingly common, the idea of identifying a single harmonic source at one time is no longer applicable. Therefore, the research status at home and abroad is summarized from two aspects of multiple harmonic sources location and harmonic responsibility quantitative determination. Firstly, the mathematical model of harmonic state estimation is introduced. The basic principle and specific methods of multiple harmonic sources location based on harmonic state estimation are expounded, and the limitations of these methods are also pointed out. Besides, on the basis of the definition of harmonic contribution index, the quantitative determination methods in two kinds of scenarios for harmonic responsibility of multiple harmonic sources are sorted out, and the common problems of related research are analyzed. In addition, combining with the dynamic time-varying characteristics of harmonics in the power electronics dominated distribution network, the latest research progress to solve the above problems is presented. Finally, the current challenges in this field are proposed and the future directions of further studies are prospected.

Key words: location of multiple harmonic sources; quantitative determination of harmonic responsibility; harmonic impedance; harmonic state estimation; independent component analysis; overview

附录

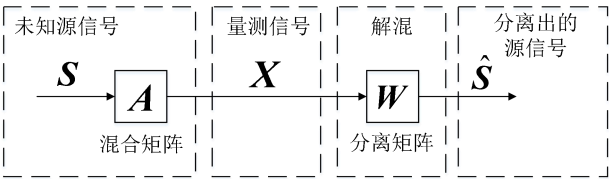


图 A1 ICA 的基本流程
Fig.A1 Basic process of ICA

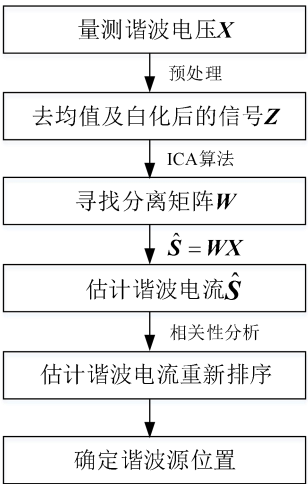


图 A2 网络谐波阻抗参数未知条件下的多谐波源定位流程
Fig.A2 Flowchart of multiple harmonic source location under unknown network harmonic impedance parameters

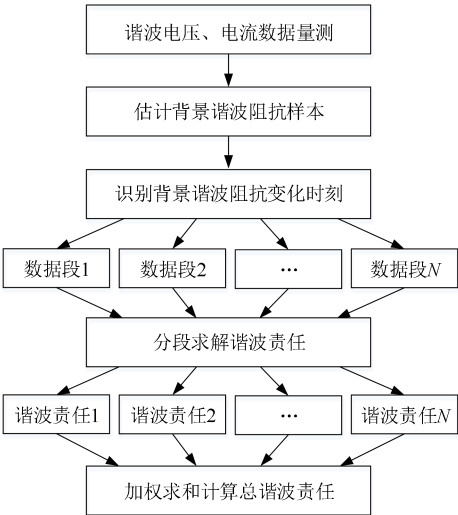


图 A3 考虑背景谐波阻抗变化的谐波责任量化区分流程
Fig.A3 Flowchart of quantitative harmonic contribution determination considering background harmonic impedance variations