# 分解问题在选择性识别和定位电力系统中电 压波动源的过程中的应用

Piotr Kuwałek

Institute of Electrical Engineering and Electronics Poznan University of Technology Poznan, Poland piotr.kuwalek@put.poznan.pl

摘要—电压波动是电力系统中常见的干扰,因此有效且具 有选择性的识别和定位个别电压波动源的过程对于减少此类干 扰是必要的。在识别和定位扰动负荷的过程中实现选择性可以通 过使用级联模块:解调、分解和传播评估来实现。这种方法的有 效性与所使用的分解方法密切相关。本文提出了用于选择性识别 和定位电压波动源的选定方法中的分解过程问题,其中增强了经 验小波变换(EEWT)算法被用作分解方法。本文介绍了来自 实际电力网络的选定研究成果,在这些研究中,所选方法的结果 导致了在识别和定位电压波动源过程中出现错误。基于获得的研 究结果讨论了与分解过程相关的此类错误的潜在原因。

Index Terms—分解,干扰负荷,识别,定位,电能质量, 电压波动

## I. 介绍

电压波动是电力质量问题之一。该现象定义为电压 有效值或峰值的连续变化 [1]。目前,在许多国家,电 压波动严重程度通过使用短期 *Pst* [3] 和长期 *Plt* [4] 闪 烁指标进行闪烁 [2] 严重性评估来评价。根据最新的电 力质量基准报告 [5] ,电压波动是影响电网电力质量的 最常见现象之一。考虑到这一事实,通常需要采取特殊 操作 [6]-[8] 来最小化电压波动造成的影响。在实际电 力网络中,此类操作通常先进行识别过程,然后定位电 力网络中的电压波动源 [9], [10] 。识别是指基于提取的

This research was funded in whole or in part by National Science Centre, Poland – 2021/41/N/ST7/00397, the Foundation for Polish Science (FNP) – Stipend START 45.2021. For the purpose of Open Access, the author has applied a CC–BY public copyright licence to any Author Accepted Manuscript (AAM) version arising from this submission. 信号特征识别干扰源类型, 而定位则是指指示干扰负荷 的供电点。

识别和定位电压波动源的方法在文献中被分为单 点~[11],[12]~和多点~[15],[16]~方法。识别和定位 扰动源的单点方法是文献中的主要部分,由于其实现简 单。然而,在大多数情况下,这类方法只能指示出主扰 动源所在的那一侧。当主扰动源在电网一侧时,则需要 一个多重步骤的迭代程序。多点方法的特点是有更大的 诊断可能性,因为这些方法允许选择性地识别和定位特 定扰动源的供电点。对于这些方法而言,最重要的是: 选择性,即基于一次同时测量系列指示尽可能多的电力 网络中扰动负荷的可能性;以及考虑电力网络中每种类 型的扰动负荷(包括那些以高于电源频率~ [18],[19]

~ 的频率改变其运行状态的负载,例如电力电子设备 ~ [20],[21])。实现所指目标的一种方法是基于 [22]:解 调 [23]-分解 [24]-传播评估 [25]级联块的选择性识别 和定位电压波动源的方法。该方法概念上较为复杂,但 允许在没有额外专家知识的情况下选择性和自动地定 位许多潜在的干扰负荷,这是文献中其他识别和定位电 压波动源的方法所无法做到的。在这种方法情况下,对 干扰负荷的识别和定位的选择性取决于所使用的分解 方法,它执行将分析信号分割为与各个干扰源相关的分 量信号的任务。因此,重要的是所使用的分解方法能够 使分割过程自动适应于被分析的可能含有噪声且非平 稳的信号。这种分解特性被称为经验性的。

在接下来的论文部分中,分解问题与所选的选择性 识别和定位电压波动源的方法 [22] 有关,在该方法中

©2022 IEEE. 允许个人使用此材料。对于所有其他用途,包括在任何当前或未来媒体中重新印刷/重新出版该材料用于广告或促销目的、创建新的集体作品、 转售或重新分发到服务器或列表,或者在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护的部分,必须获得 IEEE 的许可。 DOI: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808778 选择了增强的经验小波变换(EEWT)[26]作为分解方法。本文介绍了来自实际电力网络的选定测量结果,对于这些结果,所选方法在识别和定位电压波动源时会产生误差,这直接与所考虑的方法中使用的分解方法[22] 有关。基于获得的研究结果讨论了错误的潜在原因。

## II. 电压波动源的选择性识别与定位算法选择

所选的电压波动源选择性识别和定位算法如图 1所 示。考虑的方法由三个主要模块组成,并在迭代过程中 以 1 分钟的时间间隔进行。在每次迭代中,首先通过 载波信号估计 [23] 实现真实调制信号的幅度解调。其 次,估计出的幅度调制信号使用增强的经验小波变换 (EEWT) 分解为 N 分量 [24]。对于第 i 个分量,基本频 率  $f_i$  和平均值  $A_i$  是根据电压变化幅度  $\left(k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \ldots\right)$ (排除异常值)确定的 [22],这些是正则化过程后的组 件信号 [22]。在最后一步,通过评估特定分量信号的传 播来进行选择性识别和定位电压波动源,假设调制信号 成分的传播方式与电力网络中结果电压波动(结果幅度 调制信号)的传播方式相同 [25]。指示特定干扰负荷的 供应点是通过定位距离  $l_{P_i}$ 进行的,对于该距离,变化 的平均振幅值  $A_i$  (第 i 个分量信号的变化,具有可比的 基本频率  $f_i$ ,针对选定的测量点)达到全局最大值。

迭代过程从 N = 1 开始 (N 是与特定电压波动源 相关的分解信号数量),并随着 N 的增加而重复,直 到任意两个 *i* 成分信号导致指示相同的供电点。(N-1)-次迭代在定位特定干扰负载供电点的过程中很重要。另 一方面,对于干扰负载的识别 (辨识)过程,可以使用 第 N 次迭代 (或后续每次增加 N 的迭代),前提是对于 任何两个分量信号的基本频率,其传播结果评估指示了 相同的供电点时,关系:

$$\exists_{i,j\in 1,...,N:(i\neq j\wedge l_{P_i}\approx l_{P_j})} \{f_i = |2f_c - f_j| \lor f_i = nf_j\} (1)$$

不成立,其中 $n \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,  $f_c$  是 电源频率,即 50 Hz 或 60 Hz 。

### III. 研究对象

实验研究是在一个准备好的低压电力网格模型上进行的,该模型具有分支辐射状拓扑结构,其示意图如图 2所示。所准备的电网模型参数见表 I。

图 3展示了所考虑的电网模型的实验室设置。在实验研究中,电压波动的来源是:2 kW 对流一辐射加热系统 (VFS1)、3 kW (VFS2)和 0.4 kW (VFS3)对



图 1. 所考虑的选择性识别和定位特定干扰源的算法 [22]。



#### 图 2. 考虑的低压电网配置具有分支辐射状拓扑结构。

表 I 具有分支辐射状拓扑结构的考虑低压电网参数

Parameter	SCP	Type	$l_i$	S	R	Х	Z
1 arameter			[m]	$[mm^2]$	$[m\Omega]$	$[m\Omega]$	$[m\Omega]$
Power System	200	_	-	-	0.0	0.9	0.9
i ower bystem	多变量分析				0.0	0.0	0.0
Transformer	630	_	_	_	3.8	10.8	11.4
Transformer	千伏安				0.0	10.0	11.4
Section I	_	开销	300	70	150.0	31.4	153.3
		线 - Al					
Section II	-	开销	250	50	150.0	31.4	153.3
		线 – 阿尔					
Section III	-	过载	100	35	100.0	69.1	121.6
		线 – Al					-
Section IV	-	电缆	50	16	50.0	2.1	50.0
		线 - 铝					
Section V	-	过载	100	35	100.0	69.1	121.6
		线 – 阿尔					
Section VI	-	电缆	50	16	50.0	2.1	50.0
		线 – 铝					

表 II 考虑情况下的扰动负载参数

	干扰负荷						
案例编号	VFS1 $(2 \text{ kW})$		VFS2 (3 k	W )	VFS3 (0.4 kW )		
	<i>f<sub>i</sub></i> [ 赫兹]	$\mathbf{P}_i$	$f_i$ [ 赫兹]	$\mathbf{P}_i$	f <sub>i</sub> [ 赫兹]	$\mathbf{P}_i$	
Ι	1.7	$P_4$	0.25	$P_4$	-	-	
II	1.7	$P_3$	0.25	$P_4$	_	-	
III	0.23	P <sub>3</sub>	9.11	P <sub>6</sub>	1.67	$\mathbf{P}_4$	
IV	108.8	$P_6$	91.2	P <sub>3</sub>	8.8	$\mathbf{P}_4$	
V	0.7	$P_6$	0.1	P <sub>3</sub>	2.5	$\mathbf{P}_4$	

流加热系统,其中每个系统分别由 SSR 系统以一个已 知的给定频率 *f<sub>i</sub>* 进行控制。供应点 P<sub>i</sub> 的考虑电压波动 源是已知的。所用电压波动源的选择信息包含在表 II 中。案例 I-V 被认为使用了图 1所示的算法(实验研究 中的采样频率为 12.5 kHz)。

## IV. 研究结果与讨论

图 4和图 5分别展示了图 1中算法在案例 I 和案例 II 的结果。根据获得的研究结果,可以看出对于考虑的 情况,扰动源的数量评估是正确的,并且个体扰动负荷





图 3. 所考虑的电力网格模型的实验室设置。

Pi	P <sub>1</sub>	$P_2$	$P_3$	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	$P_6$	P <sub>7</sub>
f <sub>1</sub> [Hz]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
f <sub>2</sub> [Hz]	1.70	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10



图 4. 案例 I 中所考虑算法的图形表示。

的供电点也被正确指示。然而,其中一个电压波动源的 操作状态变化频率被不恰当地估计了。这个估算误差源



图 5. 考虑算法的图形表示 (针对第二种情况)。

于在使用分解方法构建小波滤波器组时对分析信号频 谱的错误分割。由于频谱划分错误,一个过滤器(在此 过程中构建)的截止频率值包括:与扰动源 VFS2 相关 的分量信号频谱中的显著非可忽略组件范围;以及与扰 动源 VFS1 相关的分量信号频谱的基本成分。与扰动源 VFS1 相关的频谱剩余成分出现在第二个构建滤波器的 通带中。讨论的情况如图 6所示。



图 6. 重建调制信号及其在通过 EEWT 和正则化过程中分解所得的各个分量 信号的谱。

图 7至图 9分别展示了如图 1所示算法在 III 至 V 案 例中的结果。基于获得的研究成果,可以看出对于考虑 的案例而言,正确评估了干扰源的数量。然而,根据具



图 7. 第三种情况所考虑算法的图形表示。

体情况,对某些电压波动源的操作状态变化频率估计不 当,并且对某些电压波动源的供电点指示错误。个别干 扰负荷供电点的错误指示如同识别错误一样,源于在构 建所用分解方法的小波滤波器组时分析信号频谱分割 不正确。由于频谱分割错误,重构调制信号中各分量信 号的频谱成分包含在各个构建滤波器的通带宽度内(分 量信号未分离为独立分量信号)。因此,确定的电压变 化幅度均值与个别电压波动源没有直接关联,并且根据 小波滤波器的设计不同,估计的分量信号形状各异,这 源于信号由各调制信号分量频谱成分的几何和(而非代 数和)重构而成。对于正确实施将与个别干扰源相关的 独立分量信号分解的过程而言,具有可比基本频率的分 量信号形状应相同。差异可能出现在幅度上,其取决于 干扰源的特性以及供电电路[25]的特性。所讨论的情况 如图 10所示。

值得注意的是,对于考虑的干扰源,分量信号具有



图 8. 第四种情况所考虑算法的图形表示。

准矩形形状和不对称占空比,其频谱较为复杂。如果分量信号为:

- 正弦/准正弦信号; 或
- -:具有大部分频谱能量集中在基频附近的信号; 或者
- 信号,其谱近似可分离(或者至少各个分量信号谱的基本分量之间存在显著距离[22]);

那么电压波动源的选择性识别和定位 [22] 就没有问题, 这些问题在讨论的案例 I 至 V 中已提及。

## V. 结论

本文介绍了在选择性识别和定位电网中电压波动 源的过程中,关于分解问题的初步研究成果。这些问题 可能导致对个别干扰源运行状态变化频率的不正确估 计,或者对个别干扰电源供应点的错误指示。这种状况 可能会发生,如果重构振幅调制信号的分量信号具有复



图 9. 考虑的算法在情况 V 中的图形表示。

杂的频谱并与其他频谱混合,从而导致正确的分离问题。本文讨论了与增强经验小波变换相关的分解问题, 基于为准备的电网模型所获得的研究结果,该模型直接 来自实际电网。实际上,由于电压波动源的随机性质, 振幅调制信号(与电压波动源的操作相关)的分量信号 可以具有不同的未定义形状。因此,很难确定各个分量 信号之间应发生的相互关系,以实现对干扰源的选择性 和有效定位过程。有可能通过使用其他经验分解方法或 提出新的分解方法来消除所提出的由 EEWT 引起的分 解问题,该新方法的基础函数与实际电网中最常出现的 振幅调制信号相关。

## 参考文献

- (2021). IEV Number 161-08-05, Voltage Fluctuation. [Online]. Available: http://www.electropedia.org/.
- [2] (2021). IEV Number 845-02-49, Flicker. [Online]. Available: http://www.electropedia.org/.



图 10. 所考虑算法中情况 V 的信号处理各个阶段(针对供应点  $P_3$ 和  $P_4$ )的 图形表示。

- [3] (2021). IEV Number 161-08-18, Short-Term Flicker Indicator. [Online]. Available: http://www.electropedia.org/.
- [4] (2021). IEV Number 161-08-19, Long-Term Flicker Indicator. [Online]. Available: http://www.electropedia.org/.
- [5] (2016) 6th CEER Benchmarking Report on all the Quality of Electricity and Gas Supply 2016. [Online]. Available: https://www.ceer.eu/.
- [6] A. M. Colak and K. Kayisli, "Reducing Voltage and Frequency Fluctuations in Power Systems using Smart Power Electronics Technologies: A Review", 2021 9th Int. Conf. on Smart Grid (icSmartGrid), 2021, pp. 197-200.

- [7] M.E.M. Taha and A.V. Kozhevnikov, "Voltage Fluctuation and their Mitigations", School of Science, vol. 36, no. 11, pp. 6-10, 2020.
- [8] L. Feola et al., "Selective Interharmonic Compensation to Improve Statcom Performance for Light Flicker Mitigation", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 33, no. 5, pp. 2442-2451, 2018.
- [9] P. Otomanski and G. Wiczynski, "The usage of voltage and current fluctuation for localization of disturbing loads supplied from power grid", Przeglad Elektrotechniczny, vol. 87, no. 1, pp. 107-111, 2011.
- [10] G. Wiczynski, "Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid", Electr. Power Syst. Res., vol. 180, art. 106069, 2020.
- [11] Z. Hanzelka, "Single-Point Methods for Location of Electromagnetic Disturbances in Power System", Przeglad Elektrotechniczny, vol. 91, no. 6, pp. 1-5, 2015.
- [12] Z. Hanzelka et al., "Single Point Methods for Location of Distortion, Unbalance, Voltage Fluctuation and Dips Sources in a Power System", Power Quality, chapter 9, DOI: 10.5772/16410, 2011.
- [13] K. Chmielowiec et al., "Location of power quality disturbances sources using aggregated data from energy meters", 2020 12th Int. Conf. and Exhib. on Electr. Power Quality and Util. (EPQU), 2020, pp. 1-5.
- [14] G.A. Senderovich and A.V. Diachenko, "A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid", Electrical eng. and electromechanics, no. 3, pp. 58-61, 2016.
- [15] A. Dejamkhooy et al., "Source detection and propagation of equal frequency voltage flicker in nonradial power system", Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci., vol. 24, pp. 1351-1370, 2016.
- [16] N. Eghtedarpour et al., "Intelligent identification of flicker source in distribution systems", IET Gener. Transm. Distrib., vol. 4, no. 9, pp. 1016-1027, 2010.
- [17] J.J. Inamdar and K.I. Annapoorani, "A Review of Methods Employed to Identify Flicker Producing Sources", Telkomnika, vol. 16, no. 2, pp. 465-480, 2018.
- [18] P. Kuwalek and G. Wiczynski, "Dependence of Voltage Fluctuation Severity on Clipped Sinewave Distortion of Voltage", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 70, art. 2006008, 2021.
- [19] P. Otomanski et al., "Flicker vision of selected light sources", Meas. Sci. Rev., vol. 17, no. 5, pp. 232-240, 2017.
- [20] A. Alizade and J.B. Noshahr, "Evaluating noise and DC offset due to inter-harmonics and supra-harmonics caused by back-to-back converter of (DFIG) in AC distribution network", CIRED - Open Access Proc. J., vol. 2017, no. 1, pp. 629-632, 2017.
- [21] Y. Ji et al., "A novel combinational evaluation method of voltage and reactive power in regional power grid containing renewable energy", Arch. Electr. Eng., vol. 70, no. 4, pp. 925-942, 2021.
- [22] P. Kuwalek, "Selective Identification and Localization of Voltage Fluctuation Sources in Power Grids", Energies, vol. 14, no. 20, art. 6585, 2021.
- [23] P. Kuwalek, "AM Modulation Signal Estimation Allowing Further Research on Sources of Voltage Fluctuations", IEEE Tran. Ind. Electron., vol. 67, no. 8, pp. 6937-6945, 2020.
- [24] P. Kuwalek, "Estimation of Parameters Associated with Individual Sources of Voltage Fluctuations", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 36, no. 1, pp. 351-361, 2021.

- [25] G. Wiczynski, "Voltage-Fluctuation-Based Identification of Noxious Loads in Power Network", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 8, pp. 2893-2898, 2009.
- [26] Y. Hu et al., "An enhanced empirical wavelet transform for noisy and non-stationary signal processing", Digit. Signal Process., vol. 60, pp. 220-229, 2017.