DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.96 **中图分类号**：TM72 **文献标志码**：A

含并网变流器配电网宽频谐波谐振评估研究

杨 硕，徐哲恒，陶 顺(中国电源学会会员)，徐永海
(华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要：在高比例新能源接入配网的背景下,并网变流器与背景扰动交互作用，原次生谐波发射在宽频范围内增大了谐波谐振风险，为此，提出1种计及次生谐波严重度的无差别危险域评估方法和时序谐波风险评估方法。首先，基于谐波放大倍数定义谐波放大严重度指标和次生谐波严重度指标，通过无差别扫频注入方式评估配电网所有节点与支路全频段谐波谐振风险。其次，考虑实际谐波源的时序特性，计及原次生谐波叠加，构建包含超限概率、超限严重度和连续超限概率 3 个维度的风险等级矩阵，以量化配电网的时序过压过流风险。最后，通过测试案例和实际工程案例验证所提方法的可行性。

关键词：配电网；并网变流器；谐波谐振评估；时序评估

Research on Wideband Harmonic Resonance Assessment of Distribution Network with Grid-connected Converter

YANG Shuo, XU Zheheng, TAO Shun, *Member, CPSS*, XU Yonghai
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the context of a high-proportion of new energy integration into the distribution network, the interaction between a grid-connected converter and background disturbances increases the risk of harmonic resonance due to the emission of primary and secondary harmonics over a wide frequency band. Therefore, an indiscriminate risk-domain assessment method considering the severity of secondary harmonics and a temporal harmonic risk assessment method are proposed. First, based on the harmonic amplification factor, the severity indexes of harmonic amplification and secondary harmonics are defined, and the risk of harmonic resonance in all the nodes and branches of the distribution network across the entire frequency band is evaluated through indiscriminate sweep injection. Second, considering the temporal characteristics of actual harmonic sources and taking into account the superposition of primary and secondary harmonics, a risk level matrix containing three dimensions of over-limit probability, over-limit severity and continuous over-limit probability is constructed to quantify the temporal over-voltage and over-current risks of the distribution network. Finally, the feasibility of the proposed method was verified through a test case and an actual engineering case.

Keywords: Distribution network; grid-connected converter; harmonic resonance assessment; temporal assessment

随着我国新型电力系统的构建[1]，电力系统正逐步向高比例新能源趋势发展[2-4]，并网电压源型变流器VSC(voltage source converter)在电力电子化配电网中应用广泛[5]。一方面，VSC产生的谐波电流涵盖由死区效应产生的低频谐波及PWM调制产生的高频谐波[6-7]，配网出现了由谐振引起的谐波放大问题；另一方面，VSC与系统谐波源相互作用，耦合产生的次生谐波[8-11]进一步丰富了谐波频谱，导致谐波放大问题进一步恶化。

为全面了解整个配电网在不同频率下的谐波

收稿日期：2024-12-10；**修回日期**：2025-01-14；**录用日期**：2025-02-28；**网络首发日期**：2025-03-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52377101)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52377101

谐振特性，适应新能源设备接入的需求，需对含 VSC 配电网谐波的放大程度进行量化。谐波设备交互影响使得配电网各处均可能面临谐波放大的风险。国内外学者从谐振或谐波放大原理出发，利用 VSC 并网传递函数[12]、补偿容量与系统容量比值[13]、负荷状态比值[14]等方法描述并网点谐波放大现象。这类研究往往基于指标本身的特点进行谐波谐振评估，方法针对性强，不需要采用额外的限值边界，灵活性高，但仅考虑了系统背景谐波对 VSC 并网点的影响[15-16]，面对多扰动源接入配网时，方法往往失效。

除了量化由网络结构所确定的风险情况，在实际谐波源已经接入系统的场景下，评估方法也应考虑谐波源时序特性，量化 VSC 与多扰动源交互耦合而产生的时序过压过流风险。考虑到 VSC 的频率耦合效应会使谐波的传播和响应更加复杂，评价体系应将次生谐波纳入考量，解决实际工况下配电网时序谐波超限的评价问题。为此，现有研究多基于已有指标例如 THD、HRU 等[17-18]，利用指标本身的适用性，采用诸如模糊数学、层次分析[19]等评估手段，与谐波标准限值比较来进行谐波谐振评估，方法的适用性高，计算过程系统化、标准化，但依赖于限值标准，主观性强。

然而，现有研究尚未充分讨论 VSC 频率耦合现象对整个网络谐波评估的影响及次生谐波指标的定义方法，仅针对并网点进行低频谐波谐振分析，未能提供整个网络各节点各支路的风险量化方法，并不满足宽频域谐波谐振量化的要求。即便有研究利用谐振分类方法，构建了谐波谐振风险评估体系，给出了全网风险量化结果[20]，但该评估方法未考虑次生谐波的定义方式。

因此，本文面向含 VSC 配电网，提出 1 种计及次生谐波的无差别危险域评估方法及时序谐波风险评估方法。首先将谐波放大倍数作为谐波谐振判断依据，定义次生谐波严重度指标，以扫频注入的方式评估全网危险节点与危险支路；其次，在此基础上，考虑实际谐波源的时序特性，从超限概率、超限严重度、连续超限概率 3 个维度构建风险等级矩阵，综合量化配电网时序过压过流风险；最后，通过测试案例和实际工程案例，验证所提评估方法的可行性。

1　无差别危险域评估

为了评估一个配电网对宽频域范围内的谐波和间谐波谐振响应情况，在分析频域范围内，对每个节点无差别地按一定频率分辨率进行扫频，分析各节点电压和各支路电流的响应程度，从而得到系统谐波谐振严重度评估结果。因此无差别危险域评估量化了由网络结构所确定的系统整体风险情况。

1.1　谐波放大判别

为反映配电网对谐波扰动放大的情况，基于节点阻抗矩阵中的自阻抗与互阻抗关系特性曲线，利用文献[20]所提出的放大倍数指标进行谐波放大判别。谐波电压、谐波电流、谐波阻抗、放大倍数可分别表示为

$$U_{\mathrm{AH},ij}=\frac{\left|\dot{U}_i\right|}{\left|\dot{U}_j\right|}=\frac{\left|Z_{ij}\right|}{\left|Z_{jj}\right|} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{AH},abj}=\frac{\left|\dot{I}_{ab}\right|}{\left|\dot{I}_j\right|}=\frac{\left|Z_{aj}-Z_{bj}\right|}{\left|Z_{ab}\right|} \tag{2}$$

$$Z_{\mathrm{AH},fj}=\frac{\left|Z_{fjj}\right|}{Z_{fjj,\max}} \tag{3}$$

式中：$U_{\mathrm{AH},ij}$为节点 i 谐波电压对节点 j 谐波电压的放大倍数；$\dot{U}_i$ 为节点 i 谐波电压；$\dot{U}_j$ 为节点 j 谐波电压；Z_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的互阻抗；Z_{jj} 为节点 j 的自阻抗；$C_{\mathrm{AH},abj}$ 为支路 ab 谐波电流对节点 j 注入谐波电流的放大倍数；$\dot{I}_{ab}$ 为支路 ab 谐波电流；$\dot{I}_j$ 为节点 j 注入的谐波电流；Z_{aj} 为节点 a 与节点 j 之间的互阻抗；Z_{bj} 为节点 b 与节点 j 之间的互阻抗；Z_{ab} 为节点 a 与节点 b 之间的互阻抗；$Z_{\mathrm{AH},fj}$ 为节点 j 阻抗在频率 f 下的放大倍数；Z_{fjj} 为节点 j 在频率 f 下的自阻抗；$Z_{fjj,\max}$ 为节点 j 电压不超标时的系统等效谐波阻抗。

由式(1)~式(3)可知，当谐波源为单位电压源时，谐波电压放大倍数 AHV(amplification of harmonic

voltage)在数值上等于非谐波源节点的谐波电压，反映非谐波源节点电压放大情况；当谐波源为单位电流源时，谐波电流放大倍数 AHC(amplification of harmonic current)在数值上等于各支路的谐波电流，反映支路电流放大情况；当谐波源为最大允许电流时，谐波阻抗放大倍数AHZ(amplification of harmonic impedance)反映谐波源节点电压放大情况。

1.2 严重程度定义

1.2.1 原扰动频率谐波严重度

在背景谐波作用下，VSC 会产生对应频次谐波电流响应，配电网各节点和各支路在原扰动频率电流注入下，产生谐波放大现象，因此谐波源以一定频率分辨率扫频注入网络各个节点，求得放大倍数的频率特性，如图 1 所示。图中：$f_{>1}$ 为放大倍数大于 1 的频段；x、y 分别为当前频率点到放大倍数最大值频率点的距离、当前频率点放大倍数大于 1 的值；$x_{\max}$、$y_{\max}$ 分别为放大频段内，放大倍数最大值频率点到放大频段边缘的最大距离、放大倍数最大值大于 1 的值。

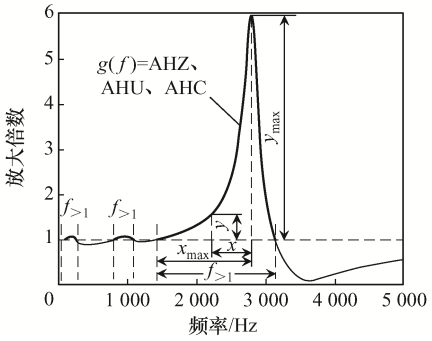


图 1 放大倍数频率特性示意

Fig. 1 Schematic of frequency characteristics of amplification factors

当放大倍数大于 1 时，表明出现了谐波放大，为了量化谐波放大严重程度，文献[20]从放大频带宽度、平均放大程度、谐振程度 3 个角度定义了谐波放大严重程度指标。其中谐振频带宽度指标 RABI(resonance amplification bandwidth index)反映了谐波放大的频带范围，谐振平均放大指标 RAAI (resonance average amplification index)量化了谐波放大的平均程度，谐振放大严重度指标 RASI(resonance amplification severity index)反映了谐振点附近的谐振情况。结合图 1，各指标可分别表示为

$$B_{\mathrm{RAI}}=\frac{\sum f_{>1}}{f_{\mathrm{all}}} \tag{4}$$

$$A_{\mathrm{RAI}}=B_{\mathrm{RAI}}\times\overline{g(f)}_{>1} \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{RAI}}=\left(1-\frac{x}{x_{\max}}\right)\frac{y}{y_{\max}} \tag{6}$$

式中：f_{all} 为所分析的频段；$g(f)_{>1}$ 为放大倍数大于 1 的值。

1.2.2 次生谐波严重度指标

VSC 与背景扰动相互作用产生的次生谐波发射也可能引起谐波放大，因此，为描述次生谐波在频率扫描中的结果，定义次生谐波电压含有率 SHUC(secondary harmonic voltage content)和次生谐波电流含有率 SHCC(secondary harmonic current content)指标，以反映次生谐波的含量，可分别表示为

$$U_{\mathrm{SHC},ij}=\frac{\sqrt{\sum\limits_{s=1,2,3,4}\left[\sum(u_{ij}^{s})^{2}\right]}}{\sqrt{\sum(u_{ij}^{\mathrm{p}})^{2}}} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{SHC},ij}=\frac{\sqrt{\sum\limits_{s=1,2,3,4}\left[\sum(i_{ij}^{s})^{2}\right]}}{\sqrt{\sum(i_{ij}^{\mathrm{p}})^{2}}} \tag{8}$$

式中：u_{ij}^{s} 和 i_{ij}^{s} 分别为节点 j 注入下节点 i 的次生谐波电压和谐波电流，其中上标变量 s=1~4 表示 4 种次生频率；u_{ij}^{p} 和 i_{ij}^{p} 为节点 j 注入下节点 i 的原扰动频率谐波电压和谐波电流，其中上标 p 表示原扰动频率。

文献[9]提出了由控制不对称所引起的与扰动频率 f_{p} 相关的 $f_{\mathrm{p}}-2f_0$ 频率的次生谐波量；文献[10]提出了由采样和 PWM 切换边带所引起的与开关频率 f_{c} 相关的 $f_{\mathrm{c}}-f_{\mathrm{p}}$、$f_{\mathrm{c}}-f_{\mathrm{p}}-f_0$ 及 $f_{\mathrm{p}}+f_0$ 频率的次生谐波量。上述文献已验证了模型的准确性，因此本文考虑这 4 种频率的次生谐波含有率情况。

次生谐波电压含有率和次生谐波电流含有率的定义方式为方和根值，与传统谐波含有率的定义方式类似。从计算公式来看，分子是扫频范围内所

有次生频率谐波量的方和根值，分母是扫频范围内所有原扰动频率谐波量的方和根值。

次生谐波含有率量化了次生谐波的丰富度，基于次生谐波含有率，定义次生谐波严重度指标。S_1 反映了不同注入节点下次生谐波严重度，S_2 反映了节点响应次生谐波严重度，S_3 反映了支路响应次生谐波严重度，可分别表示为

$$S_1=\frac{\sum\limits_{j=1,2,\cdots,n}U_{\mathrm{SHC},ij}}{n}+\frac{\sum\limits_{j=1,2,\cdots,b}C_{\mathrm{SHC},ij}}{b} \tag{9}$$

$$S_2=\frac{\sum\limits_{i=1,2,\cdots,n}U_{\mathrm{SHC},ij}}{n} \tag{10}$$

$$S_3=\frac{\sum\limits_{i=1,2,\cdots,n}C_{\mathrm{SHC},ij}}{n} \tag{11}$$

式中：n 为节点数；b 为支路数。

根据式(9)~式(11)，次生谐波严重度指标量化了网络次生谐波发射的平均水平，一个网络次生谐波严重度指标值越大，表明该网络次生谐波量越大。

1.3 危险域评估

为全面描述扰动源在不同节点注入的危险程度与网络各节点及各支路响应的危险程度，从扰动注入与响应 2 个方面定义了危险域评估指标。危险域评估指标是一组序列值，反映了节点或支路危险程度的相对大小，对于扰动源位置危险域，其值越大，表明扰动源在该节点注入时所引起的综合危险程度越高；对于节点/支路危险域，其值越大，表明该节点/支路响应的综合危险程度越高。

其中对于扰动源位置危险域，选取 1.2 节定义的所有谐波谐振放大指标及次生严重度指标，对这些指标之间进行加权求和，得到能够量化扰动源注入危险程度的节点激励风险指标 NIM(node incentive risk metric)，可表示为

$$M_{\mathrm{NI}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{I}}}(w_i^{\mathrm{I}}\cdot R_i^{\mathrm{I}})+\frac{S_1}{\sum S_1}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{I}}}(w_i^{\mathrm{I}}\cdot R_i^{\mathrm{I}}) \tag{12}$$

式中：N_{I} 为 NIM 所采用的指标数量；w_i^{I} 为各个指标的权重；R_i^{I} 为 NIM 所采用的指标。

响应危险域按照响应类别可以分为节点谐波电压响应和支路谐波电流响应。选取基于阻抗放大倍数和电压放大倍数的谐波放大程度指标，以及次生谐波电压严重度指标，构成节点响应风险指标 NRM(node response risk metric)；选取基于电流放大倍数的谐波放大程度指标，以及次生谐波电流严重度指标，构成支路响应风险指标 BRM(branch response risk metric)。计算公式分别为

$$\begin{cases}M_{\mathrm{NR}}=\sum\limits_{i=1}^{N_{\mathrm{II}}}(w_i^{\mathrm{II}}\cdot R_i^{\mathrm{II}})+\dfrac{S_2}{\sum S_2}\sum\limits_{i=1}^{N_{\mathrm{II}}}(w_i^{\mathrm{II}}\cdot R_i^{\mathrm{II}})\\ M_{\mathrm{BR}}=\sum\limits_{i=1}^{N_{\mathrm{III}}}(w_i^{\mathrm{III}}\cdot R_i^{\mathrm{III}})+\dfrac{S_3}{\sum S_3}\sum\limits_{i=1}^{N_{\mathrm{III}}}(w_i^{\mathrm{III}}\cdot R_i^{\mathrm{III}})\end{cases} \tag{13}$$

式中：N_{II} 和 N_{III} 分别为 NRM 和 BRM 所采用的指标数量；w_i^{II} 和 w_i^{III} 分别为各个指标的权重；R_i^{II} 和 R_i^{III} 分别为 NRM 和 BRM 所采用的指标。依据 NRM 和 BRM 可以量化网络中响应谐振风险较高的危险区域。

2　时序谐波风险评估

在实际应用中，系统谐波源可能是三相不平衡的，仅包含某些特定频率的谐波电流，并且具有随时间变化的特性。与理想的全频谱扫描谐波源不同，实际的谐波源可能并不覆盖所有频率的谐波电流。同时，VSC 对于不同序特性的原扰动频率电流将会产生不同频率的次生谐波电流响应，从而影响某些频次的原次生谐波叠加计算。此外，谐波源在系统中分布广泛，多个节点都可能成为谐波的注入点。为量化多扰动源注入下配电网的响应情况，考虑实际谐波源的时序特性，计及变流器原次生谐波叠加，基于耦合谐波潮流方法，从响应的角度进行时序谐波源多点注入下的配网过压过流风险评估。

1)超限概率

针对某一时序数据，为了描述其超过限值的风险概率 P_{t}，定义超限时间点 $t_{>\mathrm{limit}}$ 除以总时间点 t_{all} 为该时序数据的超限概率，这个指标从时间的尺度上考虑了某一时序数据超过限值的样本占总样本的比例，即

$$P_{\mathrm{t}}=\frac{t_{>\mathrm{limit}}}{t_{\mathrm{all}}} \tag{14}$$

2)超限严重程度

除了超限概率，也应关注超过限值部分的严重程度，计算超过限值数据的平均值 $\bar{x}_{>\mathrm{limit}}$，这反映了该数据偏离限值的程度。同时，考虑到不同场景的通用性，将平均值 $\bar{x}_{>\mathrm{limit}}$ 除以限值 x_{limit}，作为超限严重程度 A_{t}，这个指标反映了某一时序数据超过限值的倍数，即

$$A_{\mathrm{t}}=\frac{\bar{x}_{>\mathrm{limit}}}{x_{\mathrm{limit}}} \tag{15}$$

3)连续超限概率

某些电气设备对长时间的过压、过流较为敏感，长期的过压、过流可能会造成设备损坏、寿命缩短。因此，定义了连续超限时间概率 P_{st} 来量化某一时序数据连续超限的情况，将最大连续超限时间除以超限时间作为连续超限时间概率，即

$$P_{\mathrm{st}}=\frac{\max(t_{>\mathrm{limit}})}{t_{>\mathrm{limit}}} \tag{16}$$

对于这 3 种时序下的评估指标，某一维度下的指标可以依据计算结果，将风险程度划分成低风险、中风险和高风险 3 种情况。若等权重地考虑每一维度的风险，任意一维的风险程度上升，对应的风险等级加 1，可以得到如图 2 所示的风险等级评分矩阵，进而确定最终的风险结果。

根据风险等级评分矩阵，可以将任意时序数据的评估结果划分成 1~7 的风险等级，其中风险等级越高代表越危险。值得注意的是，对于超限阈值，

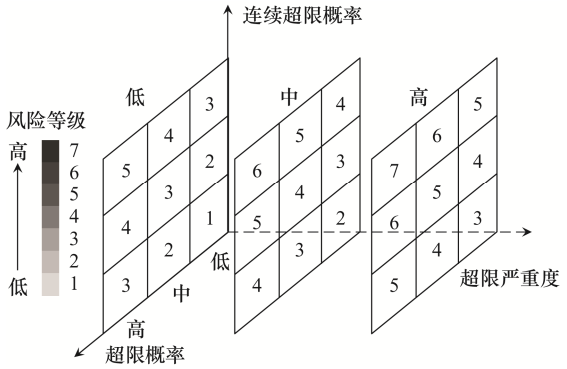


图 2 风险等级评分矩阵示意

Fig. 2 Schematic of risk level assessment matrix

应根据不同评估对象选取对应标准中规定的谐波限值，如 IEEE 519—2014、IEC 61000 系列和 GB/T 14549—1993 等标准，提供了不同电压等级和频率范围内谐波电压、电流的限值，可以作为超限阈值的参考，但标准中未明确指出的谐波限值应根据实际场景、专家经验和设备要求确定 1 个合理的阈值。对于某一维度指标，可以根据实际需求划分成多种风险情况，也可以根据重点关注的维度指标调整风险等级矩阵。

3 算例分析

3.1 计及 VSC 次生谐波的评估结果差异性分析

为验证上述方法的可行性，本文首先基于图 3 所示的测试算例，将所有参数等效到 10 kV 系统侧，对其进行无差别危险域评估。其中，变压器变比为 110/10.5，系统短路容量为 280 MVA，补偿容量为 5 010 kvar，串抗比为 5%，节点 5 和节点 7 接 VSC。

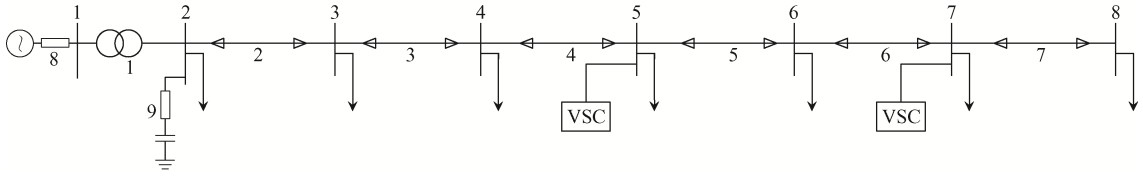


图 3 8 节点测试系统

Fig. 3 Eight-node test system

本文所提方法可以同时量化 4 种频率的次生谐波严重程度，文献[20]则是基于某一频率次生谐波的放大倍数进行量化。为保证算法之间的可比性，仅针对 $f_{\mathrm{p}}-2f_0$ 这一频率的次生谐波电压，分别采用文献[20]算法和本文所提算法进行量化，结果见表 1。可以看出，文献[20]算法对节点 3~8 次生谐波的量化结果均为 0，这说明该算法在这些节点上失效，不能准确反映这些节点次生谐波的严重

情况。本文所提算法能够较好地反映各节点次生谐　　波的严重程度，与文献[20]算法相比具有明显优势。

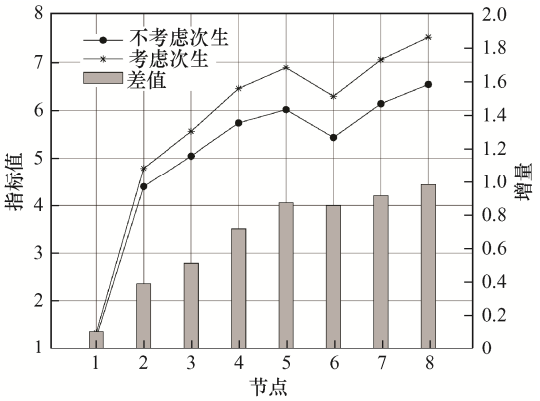
表 1　次生谐波量化方法对比

Tab. 1 Comparison among quantitative methods for secondary harmonic

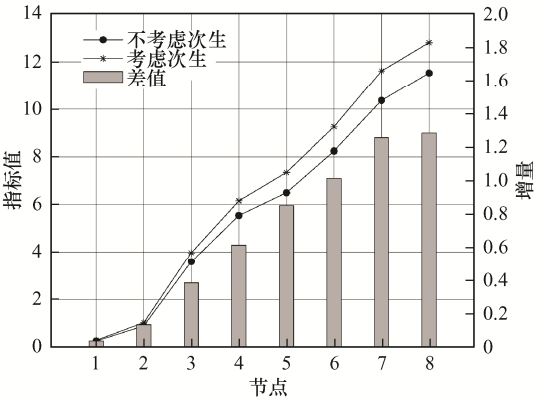
采用方法	量化结果							
	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8
文献[20]指标值	0.005 9	0.005 9	0	0	0	0	0	0
本文指标值	0.030 0	0.031 8	0.025 9	0.028 8	0.034 5	0.032 8	0.031 8	0.029 7

测试系统无差别危险域评估结果如图 4 所示。在所有节点注入 0~5 kHz、频率分辨率为 5 Hz 的扰动电流，得到扰动源位置危险域评估指标的结果，如图 4(a)所示，节点 8 为最危险的谐波源接入节点，而且由于考虑次生谐波严重度后，系统整体风险水平上升，其中节点 1 是次生谐波影响最小的节点；根据响应危险域指标的结果，如图 4(b)和(c)所示，节点 8 依旧是响应最严重的节点，随着节点号的增加，次生谐波的影响愈发明显，支路 2 是响应最严重的支路，并且考虑次生谐波严重度后，支路 2 风险提升最大，次生谐波对支路 7 影响不大。

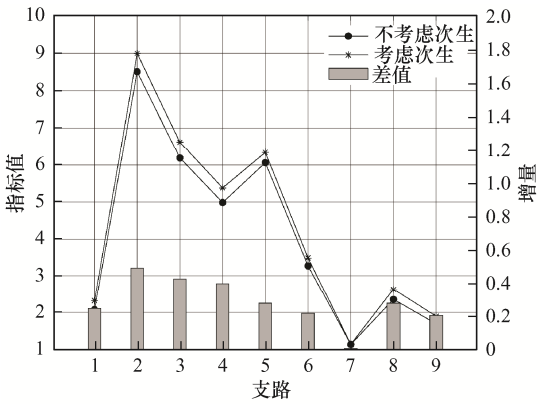
基于无差别危险域的评估结果，在最危险的扰动源位置节点 8 注入如图 5 所示的时序谐波电流，计算并网点电流。该测试案例在 3、18 和 48 次谐波附近出现谐振放大现象，取某一时刻谐波电流频谱进行分析，根据 GB/T 14549—1993 标准给出的谐波电流允许值换算公式，计算本算例中 10 kV 系统、280 MVA 短路容量的并网点电流限值。从图6(a)中的结果可以看出，考虑次生谐波后，由 56、6、55 次谐波耦合产生的 4 次谐波电流及由 42、20、41、17 次谐波耦合产生的 18 次谐波电流经过



(a)扰动源位置



(b)响应节点



(c)响应支路

图 4　测试系统无差别危险域评估结果

Fig. 4 Undifferentiated risk-domain assessment result of test system

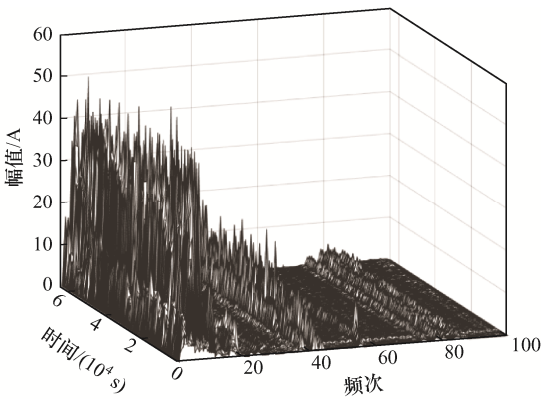


图 5　时序谐波源数据

Fig. 5 Temporal data of harmonic sources

原次生谐波叠加后，出现超标情况。

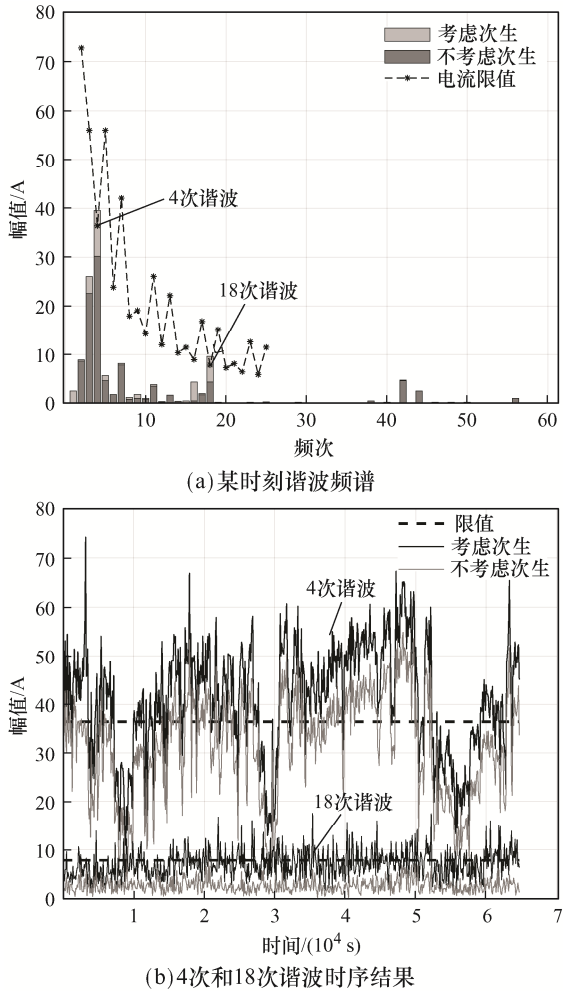


图 6 并网点电流频谱与时序

Fig. 6 Frequency spectrum and time sequence of current at grid-connected point

如图 6(b)所示，在考虑 VSC 次生谐波电流发射后，并网点 4 次谐波和 18 次谐波均有所增加，尤其是 18 次谐波整体幅值提升较大，超限现象较为明显。为量化不同频次谐波超限情况，分析 VSC 次生谐波电流发射对并网点谐波电流的影响，采用所提时序谐波风险评估方法，对并网点电流 4 次和 18 次谐波进行时序风险评估。为说明时序风险评估方法的可行性，假设超限概率小于 0.2 为低风险，在 0.2~0.5 之间为中风险，超过 0.5 为高风险；假设超限严重度在 1.1 以下为低风险，在 1.1~1.2 之间为中风险，超过 1.2 为高风险；假设连续超限概率在 0.1 以下为低风险，在 0.1~0.4 之间为中风险，超过 0.4 为高风险。3 种指标按等权重构建风险矩阵，评估结果见表 2。当考虑次生谐波之后，4 次和 18 次谐波的风险等级提高。

表 2 超标谐波评估结果

Tab. 2 Over-limit harmonic assessment results

频次	限值/A	是否考虑次生	超限概率	超限严重度	连续超限概率	风险等级
4	36.40	否	0.367	1.161	0.135	4
		是	0.678	1.304	0.153	6
18	7.84	否	0.002	1.006	0	1
		是	0.375	1.293	0.033	4

综上，忽略 VSC 次生谐波电流的影响，将导致某些频次谐波电流评估结果出现偏差，所提计及次生谐波的评估方法更能准确地反映 VSC 实际发射特性对配电网谐波放大产生的影响。

3.2 实际配电网案例应用情况

为验证所提评估方法的可行性，对某一实际配电网案例进行谐波谐振危险域评估及谐波时序风险评估，其拓扑结构如图 7 所示。该变电站通过 1 台变比为 110/10.5、容量为 50 MVA 的变压器对 F07、F09、F13 这 3 条馈线上的负荷(包含分布式光伏、PWM 型负荷等多种电力电子设备)进行供电。为了贴近实际变电站负荷情况，将其他分支线上的负荷等效为 1 个总负荷连接到节点 1 上。该变电站有 2 种运行方式：方式 1 是联络开关断开，各段馈线由各自变电站供电；方式 2 是联络开关闭合，馈线对侧变电站停电，馈线两端的所有负荷由当前变电站进行供电。

1)联络开关断开

当联络开关断开时，该变电站处于正常供电状态。根据无差别危险域评估流程，得到扰动源注入位置危险域、节点响应危险域、支路响应危险域指标计算结果，部分节点和支路的评估结果见表 3。

由评估结果可见，节点 24 和节点 1 是 2 个较为危险的谐波源注入节点，其 NIM 值高于其他节点；节点 22 是最危险的响应节点，较为危险的前 10 个节点间的 NRM 值差距较小；支路14 是最危

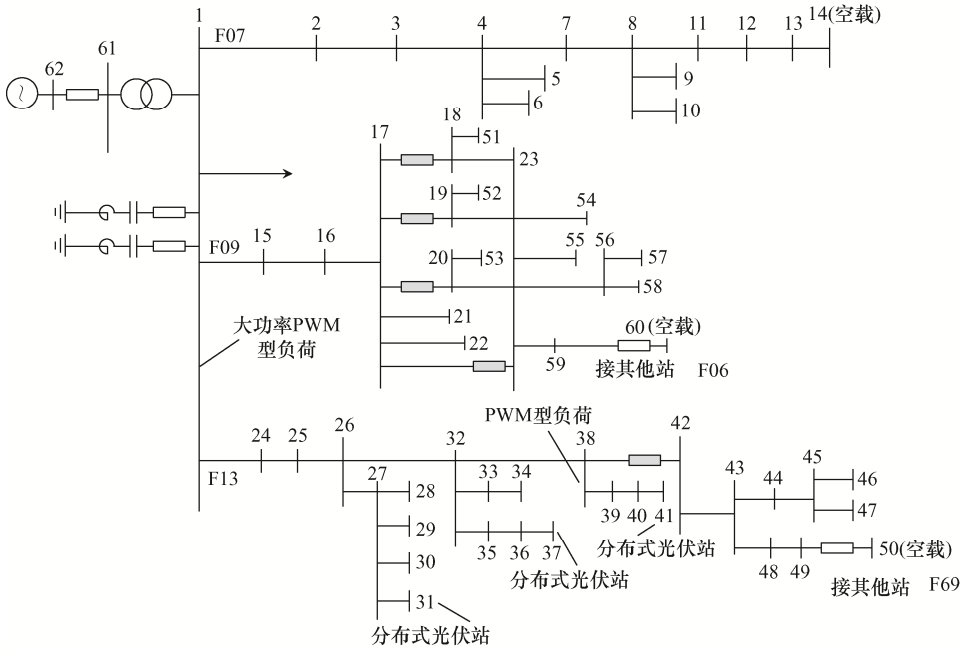


图 7　某 10 kV 变电站拓扑结构

Fig. 7 Topological structure of one 10 kV substation

表 3　方式 1 危险域指标部分结果

Tab. 3 Part of result of risk-domain indexes (mode 1)

节点	NIM	节点	NRM	支路	BRM
24	17.77	22	18.91	14	18.56
1	17.48	21	18.56	24	11.02
2	11.42	20	18.29	23	10.89
25	10.82	18	18.29	15	9.79
26	9.64	19	18.29	44	7.59
32	7.90	23	17.36	45	6.82
17	7.75	14	16.44	16	6.63
16	7.73	17	16.35	43	5.05
15	7.68	13	15.98	42	5.04
38	7.56	16	15.37	59	4.78
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 4　方式 2 危险域指标部分结果

Tab. 4 Part of result of risk-domain indexes (mode 2)

节点	NIM	节点	NRM	支路	BRM
1	27.72	50	68.99	47	28.87
24	25.33	49	62.17	14	26.16
26	20.62	48	43.31	41	24.69
25	20.39	60	39.93	42	22.78
15	17.23	57	32.60	15	21.07
29	17.16	58	32.59	37	19.21
32	17.14	56	32.31	16	17.33
27	16.46	59	31.71	66	13.85
44	16.43	54	30.57	31	12.13
45	16.36	55	30.54	65	12.01
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

险的响应支路，其 BRM 值远高于其他支路，变电站运行当中应格外注意该支路的谐波放大风险。

2)联络开关闭合

当联络开关闭合时，该变电站将额外带载。根据无差别危险域评估流程，得到扰动源注入位置危险域、节点响应危险域、支路响应危险域指标计算结果，部分节点和支路的评估结果见表 4。

由无差别危险域的评估结果可见，扰动源注入位置最危险的仍是节点 1 和节点 24，但是相较于方式 1 其危险程度更高；节点 50 和节点 49 是最危险的响应节点，其 NRM 值远高于其他节点；支路 47 是最危险的响应支路。危险域指标值相较于方式 1 显著升高，无论是危险注入节点还是危险响应节点/支路，都有了明显改变，表明在联络开关闭合后，变电站所面临的潜在风险更高。

基于无差别危险域评估结果，将实测非线性设备时序谐波电流注入到该配网节点 1、24、26、29 中，计算各节点谐波电压总谐波畸变率 THDu(total

harmonic voltage distortion，10 kV 系统 THDu 限值为 4%)，进行时序谐波风险评估。将各维度的风险指标分成 3 种风险情况，部分评估结果见表 5。与无差别危险域评估结果类似，节点 50 为运行方式 2 风险等级最高的节点，表明该节点在 3 种指标的评估下综合风险最高。

表 5 时序风险评估部分结果

Tab. 5 Part of result of temporal risk assessment

节点	超限概率	超限严重度	连续超限概率	风险等级
50	0.946	1.379	0.317	6
48	0.777	1.207	0.347	6
29	0.608	1.154	0.266	5
28	0.600	1.155	0.269	5
25	0.046	1.083	0.333	2
60	0.031	1.035	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4 结论

针对含电力电子设备的配电网宽频谐波谐振问题，本文提出了无差别危险域评估方法，从全网的角度以一定频率分辨率量化全频段内配网谐波放大的危险情况。同时，考虑了实际谐波源的时变特性，给出了时序谐波源注入场景下的配电网过压、过流风险评估方法，并应用于某实际工程案例，验证了方法的可行性，得到以下结论。

(1)基于阻抗放大倍数和电压/电流放大倍数，量化了谐波谐振放大程度，定义了扰动源位置危险域、节点/支路响应危险域指标，提出了计及耦合谐波的无差别量化扰动源位置危险区域、节点/支路响应危险域的评估方法，实现了扰动源接入位置、配电网谐振过电压节点和谐振过电流严重支路的判别。

(2)考虑时序原扰动频率与次生频率谐波的耦合叠加，提出了 1 种基于时序谐波潮流分析的配电网过电压和过电流风险评估方法，综合考虑时间尺度下各维度风险评估指标的区别与联系，构建了风险等级评估矩阵，实现了时序场景下配电网的过电压过电流风险评估。

参考文献：

[1] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[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. (in Chinese)

[2] 马燕峰, 李金媛, 王子建, 等. 基于量测数据的新能源电力系统区域等效惯量评估方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5406-5421.
Ma Yanfeng, Li Jinyuan, Wang Zijian, et al. Assessment method of regional equivalent inertia of new energy power system based on measured data [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5406-5421. (in Chinese)

[3] 戚振彪, 齐慧. 基于调节函数的含光伏电源配电网电压越限识别研究[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 196-203.
Qi Zhenbiao, Qi Hui. Research on voltage over-limit identification in distribution network with photovoltaic power supply based on regulation function [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 196-203. (in Chinese)

[4] 卢军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191. (in Chinese)

[5] 杨权, 梁永昌, 魏建荣, 等. 多谐波源下分布式电源并网逆变器的谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 2908-2920.
Yang Quan, Liang Yongchang, Wei Jianrong, et al. Harmonic suppression strategy of grid connected inverter under multi-harmonic sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 2908-2920. (in Chinese)

[6] 朱明星, 孔彬彬, 张华赢. 电缆化配电系统高频谐振频移方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 19-26.

Zhu Mingxing, Kong Binbin, Zhang Huaying. High frequency resonance frequency shift method for cable distribution system [J]. Electric Power, 2021, 54(8): 19-26. (in Chinese)

[7] Nakhodchi N, Bollen M H J, Busatto T. Transfer of harmonics in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1617-1626.

[8] 武相强, 王赟程, 陈新, 等. 考虑频率耦合效应的三相并网逆变器序阻抗模型及其交互稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1605-1617.
Wu Xiangqiang, Wang Yuncheng, Chen Xin, et al. Sequence impedance model and interaction stability research of three-phase grid-connected inverters with considering coupling effects [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1605-1617. (in Chinese)

[9] 陶顺, 朱歆艺, 陈慧琳, 等. 并网逆变器死区耦合谐波源建模[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14. (2024-11-06) [2024-12-02]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241845.
Tao Shun, Zhu Xinyi, Chen Huilin, et al. Modeling of dead zone coupled harmonic sources in grid connected inverters [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14. (2024-11-06)[2024-12-02]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241845. (in Chinese)

[10] 徐少博, 徐永海, 陶顺, 等. 并网换流器采样和 PWM 边带次生谐波特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4340-4355.
Xu Shaobo, Xu Yonghai, Tao Shun, et al. Research on sampling and PWM sideband secondary harmonic characteristics of grid connected converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (11): 4340-4355. (in Chinese)

[11] Tao Shun, Zhu Xinyi, Xu Shaobo, et al. Modeling of coupled harmonic current source for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 13720-13732.

[12] 熊平, 汪春江, 孙建军, 等. 含光伏逆变器的低压有源配电网谐振风险评估[J]. 湖北电力, 2020, 44(1): 20-25.
Xiong Ping, Wang Chunjiang, Sun Jianjun, et al. Assessment on resonance risk of low-voltage active distribution networks with photovoltaic inverters [J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(1): 20-25. (in Chinese)

[13] Torquato R, Argüello A, Freitas W. Practical chart for harmonic resonance assessment of DFIG-based wind parks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35 (5): 2233-2242.

[14] Argüello A, Torquato R, Freitas W, et al. A graphical method to assess component overload due to harmonic resonances in wind parks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1819-1828.

[15] Do D T, Hirsch H. Harmonic resonance risk assessment of photovoltaic applications in low voltage grid [C]// 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands, 2020: 868-873.

[16] Sun Y, de Jong E C W, Cuk V, et al. Harmonic resonance risk of massive ultra fast charging station grid integration [C]// 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Ljubljana, Slovenia, 2018: 1-6.

[17] 景巍巍, 付慧, 程伟添, 等. 考虑时序趋势特性的典型场景高压谐波综合评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 215-224.
Jing Weiwei, Fu Hui, Cheng Weitian, et al. Comprehensive evaluation method of high-voltage harmonics in typical scenarios considering time series trend characteristics [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 215-224. (in Chinese)

[18] 黄祎, 欧阳森, 程伟添. 电网高压谐波电压多维概率特性与时序特征及其评价方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 196-205.
Huang Yi, Ouyang Sen, Cheng Weitian. Study on multi-dimensional probability characteristics, time-series features, and evaluation methods of high voltage harmonic voltages in power grids [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 196-205. (in Chinese)

[19] 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. (in Chinese)

(下转第 237 页)

Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3274-3284.

[15] 李菊, 阮新波. 全桥 LLC 谐振变换器的混合式控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 72-79, 94.
Li Ju, Ruan Xinbo. Hybrid control strategy of full bridge LLC converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 72-79, 94. (in Chinese)

[16] 王志刚, 董长城, 侯凯, 等. 全桥 LLC 电路时域模型及其分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 138-143, 164.
Wang Zhigang, Dong Changcheng, Hou Kai, et al. Time domain model of full bridge LLC circuit and its analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 138-143, 164. (in Chinese)



熊兰

作者简介：

熊兰(1978—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：电力电子变换器，新能源发电并网控制。E-mail：xusbl@hotmail.com。

高迎飞(1996—)，女，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器应用。E-mail：1979630676@qq.com。

宋佳(1999—)，女，硕士研究生。研究方向：储能变流器控制。E-mail：s17631434412@163.com。

刘林(1997—)，男，硕士。研究方向：电力电子变换器应用。E-mail：47286834@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)

(上接第 105 页)

[20] 袁威, 陶顺, 王浩雄, 等. 基于熵权-独立性权法的配电网宽频域谐波谐振风险评估[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-13. (2024-05-28)[2024-12-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20240527.0915.002.html.
Yuan Wei, Tao Shun, Wang Haoxiong, et al. Risk assessment of wide frequency domain harmonic resonance in distribution network based on entropy-independence weight method [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-13. (2024-05-28) [2024-12-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20240527.0915.002.html. (in Chinese)



杨硕

作者简介：

杨硕(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统电能质量。E-mail：120232201675@ncepu.edu.cn。

徐哲恒(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统电能质量。E-mail：120232201158@ncepu.edu.cn。

陶顺(1972—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力系统电能质量。E-mail：taoshun@ncepu.edu.cn。

徐永海(1966—)，男，博士，教授。研究方向：电能质量分析与控制。E-mail：yonghaixu@263.net。

(责任编辑：耿越)