

# 间谐波源对地导纳对配电网并联 谐振影响研究

李博强<sup>1</sup>, 刘开培<sup>1</sup>, 林焱<sup>2</sup>, 彭雅洁<sup>1</sup>, 黄道姗<sup>2</sup>, 林芳<sup>2</sup>, 秦亮<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 间谐波源对地导纳幅值很小, 因此传统并联谐振分析一般忽略间谐波源对地导纳。如果间谐波源对地导纳对并联谐振的影响较大, 则忽略间谐波源对地导纳可能会严重降低并联谐振分析结果的准确性。为证明并联谐振分析计入间谐波源对地导纳的必要性, 该文基于 IEEE 33 节点配电网模型建立并联谐振测试系统, 开展间谐波源对地导纳对配电网并联谐振影响的研究。基于模态分析法发现特定节点处间谐波源对地导纳能够明显影响并联谐振, 通过灵敏度分析, 发现在特定节点处间谐波源对地导纳虚部对并联谐振的影响较大, 揭示了间谐波源对地导纳显著影响并联谐振的本质原因, 并验证了配电网并联谐振分析计入间谐波源对地导纳的必要性。

**关键词:** 间谐波源对地导纳; 并联谐振分析; 模态分析法; 灵敏度分析

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.011 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2022)03-0094-08

## Research on influence of admittance of inter-harmonic sources to ground on parallel resonance of distribution network

LI Boqiang<sup>1</sup>, LIU Kaipei<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>2</sup>, PENG Yajie<sup>1</sup>,  
HUANG Daoshan<sup>2</sup>, LIN Fang<sup>2</sup>, QIN Liang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The admittance amplitude of inter-harmonic sources to ground is very small, so traditional parallel resonance analysis generally ignores the admittance of inter-harmonic sources to ground. However, if the admittance of inter-harmonic sources to ground has a greater influence on the parallel resonance to a high degree, ignoring the admittance of inter-harmonic sources to ground could seriously reduce the accuracy of the parallel resonance analysis results. In order to prove the necessity of the parallel resonance analysis to include the admittance of inter-harmonic sources to ground, this paper establishes a parallel resonance test system based on the IEEE-33 nodes distribution network model, and carries out the research on the influence of admittance of inter-harmonic sources to ground on the parallel resonance of distribution network. Based on the modal analysis method, it is found that the admittance of inter-harmonic sources to ground at a specific node can significantly affect the parallel resonance. Through sensitivity analysis, it is found that the admittance imaginary part of inter-harmonic sources to ground at a specific node has a greater influence

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5400-201921142A-0-0-00)

通信作者: 刘开培(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事柔性直流输电、电能质量分析与控制研究工作; E-mail: kpliu@whu.edu.cn

on the high degree to the parallel resonance, which reveals the reason why the admittance of inter-harmonic sources to ground can obviously affect the parallel resonance, and finally validates the necessity of including the admittance of inter-harmonic sources to ground in the parallel resonance analysis of distribution network.

**Key words:** admittance of inter-harmonic sources to ground; parallel resonance analysis; modal analysis; sensitivity analysis

随着电力电子设备与冲击性负荷等非线性元件大规模接入配电网,配电网中的间谐波问题日益严重<sup>[1-4]</sup>。上述非线性元件大多并联接入配电网,其产生的间谐波能够引起并联谐振,造成谐振过电压、电力设备发热烧毁等诸多问题<sup>[5-7]</sup>。因此对配电网的并联谐振研究具有重要实际意义。

国内外学者对并联谐振进行了大量的研究,其中阻抗频谱分析法与模态分析法被广泛应用。阻抗频谱分析法是一种传统有效的并联谐振分析方法<sup>[8-10]</sup>,能够准确地识别并联谐振频率,但是无法挖掘出更多的并联谐振信息。目前,频谱分析法主要应用于配电网对地参数的测量中<sup>[11-12]</sup>,而在配电网并联谐振分析的应用较少。模态分析法通过“解耦”算法对节点导纳矩阵或节点阻抗矩阵的特征值及特征向量进行分析,能够挖掘更多的配电网并联谐振信息,近年来被广泛应用于配电网的并联谐振分析中<sup>[13-15]</sup>。文献[16]提出了基于模态分析法的并联谐振分析方法,阐述了如何根据节点阻抗矩阵的特征值与特征向量得到配电网的并联谐振信息;文献[17]在此基础上提出了改进节点分析法,解决了含有独立恒压源支路情况的并联谐振分析问题;文献[18]基于模态分析法,通过灵敏度分析方法量化了配电网元件对并联谐振的贡献程度;文献[19]通过模态灵敏度分析方法对五母线测试系统进行了并联谐振灵敏度分析,发现不同位置的配电网元件对并联谐振的贡献程度具有显著差异。

在间谐波源接入位置确定的情况下,计入间谐波源对地导纳不会增加并联谐振分析步骤。因此,为了尽可能地保证并联谐振分析结果的准确性,并联谐振分析需要计入配电网已有间谐波源的对地导纳。因为生产需要,配电网存在待接入的间谐波源,这部分间谐波源接入位置并不确定,所以在并联谐振分析中需要根据间谐波源的实际接入情况进行节点导纳矩阵的修正。修正节点导纳矩阵较大幅度地

增加了并联谐振分析步骤。因为间谐波源对地导纳很小,所以在传统并联谐振分析中一般以理想电流源为间谐波源<sup>[16-17]</sup>,忽略了间谐波源对地导纳,减少了并联谐振分析步骤。尽管间谐波源对地导纳幅值很小,直观地看,忽略间谐波源对地导纳不会对配电网节点导纳矩阵造成明显的影响,但是如果间谐波源对地导纳对并联谐振的贡献程度较大,即使间谐波源对地导纳很小,也可能明显影响配电网并联谐振。因此,在并联谐振分析中忽略间谐波源对地导纳存在着使并联谐振分析结果准确性严重下降的风险。

为探究计入间谐波源对地导纳对并联谐振分析的重要性,本文开展间谐波源对地导纳对配电网并联谐振影响研究。本文基于 IEEE 33 节点配电网模型建立并联谐振测试系统,发现特定节点处间谐波源对地导纳能够明显影响并联谐振的现象。本文通过阻抗偏移评价间谐波源对地导纳对配电网并联谐振的影响程度,并进行灵敏度分析,通过比较阻抗偏移与灵敏度分析结果,发现特定节点处的间谐波源对地导纳虚部对并联谐振的贡献程度较高,解释间谐波源对地导纳能够明显影响并联谐振的原因,证明并联谐振分析计入间谐波源对地导纳的必要性。

## 1 模态分析法

### 1.1 基于模态分析法的并联谐振频率识别

相较于传统的频谱分析法,模态分析法在识别并联谐振频率外还能够挖掘更多的并联谐振信息,如节点激励谐振能力与观测谐振能力<sup>[16-17]</sup>。因此,本文选用模态分析法开展研究。

在特定频率下,定义节点阻抗矩阵对角化分解得到的特征值对角矩阵为模态阻抗矩阵。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11h} & \cdots & \mathbf{Z}_{1nh} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{n1h} & \cdots & \mathbf{Z}_{nnh} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{(h)} \boldsymbol{\lambda}_{(h)} \mathbf{R}_{(h)} \quad (1)$$

式中  $h$  为频率次数;  $n$  为配电网节点个数;  $\mathbf{Z}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的节点阻抗矩阵,  $\Omega$ ;  $\mathbf{L}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的左特征向量矩阵;  $\boldsymbol{\lambda}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的模态阻抗矩阵,  $\Omega$ ;  $\mathbf{R}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的右特征向量矩阵。其中, 左特征向量矩阵  $\mathbf{L}_{(h)}$  与右特征向量矩阵  $\mathbf{R}_{(h)}$  的表达式分别为

$$\mathbf{L}_{(h)} = [\mathbf{L}_{1(h)} \quad \cdots \quad \mathbf{L}_{m(h)} \quad \cdots \quad \mathbf{L}_{n(h)}] \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{(h)} = [\mathbf{R}_{1(h)}^T \quad \cdots \quad \mathbf{R}_{m(h)}^T \quad \cdots \quad \mathbf{R}_{n(h)}^T]^T \quad (3)$$

式中  $\mathbf{L}_{m(h)}$ 、 $\mathbf{L}_{n(h)}$  分别为频率次数  $h$  下模态  $m$ 、 $n$  的左特征向量;  $\mathbf{R}_{m(h)}$ 、 $\mathbf{R}_{n(h)}$  分别为频率次数  $h$  下模态  $m$ 、 $n$  的右特征向量。

模态阻抗矩阵  $\boldsymbol{\lambda}_{(h)}$  为对角矩阵, 每个主对角元表示一个模态阻抗, 模态的个数与节点阻抗矩阵的阶数一致。  $\boldsymbol{\lambda}_{(h)}$  的表达式为

$$\boldsymbol{\lambda}_{(h)} = \text{diag}(\lambda_{1(h)}, \cdots, \lambda_{m(h)}, \cdots, \lambda_{n(h)}) \quad (4)$$

式中  $\lambda_{m(h)}$ 、 $\lambda_{n(h)}$  分别为频率次数  $h$  下模态  $m$ 、 $n$  的模态阻抗,  $\Omega$ 。

特定频率下, 配电网节点注入电流与节点电压间满足:

$$\dot{\mathbf{U}}_{(h)} = \mathbf{Z}_{(h)} \dot{\mathbf{I}}_{(h)} = \mathbf{L}_{(h)} \boldsymbol{\lambda}_{(h)} \mathbf{R}_{(h)} \dot{\mathbf{I}}_{(h)} \quad (5)$$

式中  $\dot{\mathbf{U}}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的节点电压向量,  $\text{V}$ ;  $\dot{\mathbf{I}}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的节点注入电流向量,  $\text{A}$ 。

将式(5)进一步转化为

$$\mathbf{R}_{(h)} \dot{\mathbf{U}}_{(h)} = \boldsymbol{\lambda}_{(h)} \mathbf{R}_{(h)} \dot{\mathbf{I}}_{(h)} \quad (6)$$

将  $\mathbf{R}_{(h)} \dot{\mathbf{U}}_{(h)}$  定义为模态电压向量  $\dot{\mathbf{V}}_{(h)}$ , 将  $\mathbf{R}_{(h)} \dot{\mathbf{I}}_{(h)}$  定义为模态电流向量  $\dot{\mathbf{J}}_{(h)}$ , 最终可以得到模态电压与模态电流之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{1(h)} \\ \dot{\mathbf{V}}_{2(h)} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{V}}_{n(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{1(h)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{2(h)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{n(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{J}}_{1(h)} \\ \dot{\mathbf{J}}_{2(h)} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{J}}_{n(h)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知, 模态分析法实现了各个模态之间的“解耦”, 并联谐振分析可以从各个模态的角度开

展。在不同频率下, 如果将模态阻抗幅值最大的模态定义为关键模式, 可以根据关键模式模态阻抗幅频特性曲线, 以曲线极大值的频率为并联谐振频率, 实现并联谐振频率的识别。

## 1.2 关键模式模态阻抗灵敏度分析

关键模式模态阻抗对配电网元件参数的灵敏度能够反映配电网元件对并联谐振的贡献程度。

频率次数  $h$  下的配电网节点导纳矩阵对角化分解结果为

$$\mathbf{Y}_{(h)} = \mathbf{Z}_{(h)}^{-1} = \mathbf{L}_{(h)} \cdot \boldsymbol{\Lambda}_{(h)} \cdot \mathbf{R}_{(h)} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{Y}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的节点导纳矩阵,  $\text{S}$ ;  $\boldsymbol{\Lambda}_{(h)}$  为频率次数  $h$  下的模态导纳矩阵,  $\text{S}$ 。

$\boldsymbol{\Lambda}_{(h)}$  与  $\boldsymbol{\lambda}_{(h)}$  为互逆矩阵,  $\boldsymbol{\Lambda}_{(h)}$  表达式为

$$\boldsymbol{\Lambda}_{(h)} = \text{diag}(\boldsymbol{\Lambda}_{1(h)}, \cdots, \boldsymbol{\Lambda}_{m(h)}, \cdots, \boldsymbol{\Lambda}_{n(h)}) \quad (9)$$

式中  $\boldsymbol{\Lambda}_{m(h)}$  为频率次数  $h$  下模态  $m$  的模态导纳,  $\text{S}$ 。

假设某一导纳元件并联接入配电网, 在频率次数  $h$  下其参数表达为

$$\alpha_{(h)} = G_{(h)} + jB_{(h)} \quad (10)$$

式中  $\alpha_{(h)}$  为导纳参数,  $\text{S}$ ;  $G_{(h)}$  为  $\alpha_{(h)}$  实部,  $\text{S}$ ;  $B_{(h)}$  为  $\alpha_{(h)}$  虚部,  $\text{S}$ 。

假设配电网并联谐振的频率次数为  $f$ , 关键模式为模态  $i$ , 根据文献[18-19]可以得到关键模式模态导纳幅值的灵敏度表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial |\Lambda_{i(f)}|}{\partial G_{(f)}} = \\ (S_{r(f)} \Lambda_{r(f)} + S_{j(f)} \Lambda_{j(f)}) / |\Lambda_{i(f)}| \\ \frac{\partial |\Lambda_{i(f)}|}{\partial B_{(f)}} = \\ [(S_{r(f)} \Lambda_{j(f)} - S_{j(f)} \Lambda_{r(f)}) / |\Lambda_{i(f)}| \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} S_{i(f)} = \mathbf{R}_{ik(f)} \mathbf{L}_{ik(f)} = S_{r(f)} + jS_{j(f)} \\ \Lambda_{i(f)} = \Lambda_{r(f)} + j\Lambda_{j(f)} \end{cases} \quad (12)$$

式(11)、(12)中  $S_{i(f)}$  为  $\Lambda_{i(f)}$  对  $\alpha_{(f)}$  的灵敏度;  $\mathbf{R}_{ik(f)}$  为频率次数为  $f$ 、模态  $i$  下节点  $k$  对应的右特征向量元素;  $\mathbf{L}_{ik(f)}$  为频率次数为  $f$ 、模态  $i$  下节点  $k$  对应的左特征向量元素;  $S_{r(f)}$  为  $S_{i(f)}$  的实部;  $S_{j(f)}$  为  $S_{i(f)}$  虚部;  $\Lambda_{r(f)}$  为  $\Lambda_{i(f)}$  的实部,  $\text{S}$ ;  $\Lambda_{j(f)}$  为  $\Lambda_{i(f)}$  的虚部,  $\text{S}$ 。

最终根据  $\lambda_{i(f)}$  与  $\Lambda_{i(f)}$  之间的倒数关系, 可以得到关键模式模态阻抗幅值  $|\lambda_{i(f)}|$  对导纳元件参数的归一化灵敏度, 即

$$\left\{ \begin{aligned} S_G &= \frac{-[|G_{(f)}| (S_{r(f)} \Delta_{r(f)} + S_{j(f)} \Delta_{j(f)})]}{|\Delta_{i(f)}|^2} \\ S_B &= \frac{-[|B_{(f)}| (S_{r(f)} \Delta_{j(f)} - S_{j(f)} \Delta_{r(f)})]}{|\Delta_{i(f)}|^2} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中  $S_G$  为  $|\lambda_{i(f)}|$  对  $G_{(f)}$  的归一化灵敏度;  $S_B$  为  $|\lambda_{i(f)}|$  对  $B_{(f)}$  的归一化灵敏度。

## 2 间谐波源对地导纳对配电网并联谐振影响分析

### 2.1 并联谐振测试系统建立

为了开展间谐波源对地导纳对配电网并联谐振

影响研究,本文以 IEEE 33 节点配电网模型为基础<sup>[20]</sup>,建立并联谐振测试系统,如图 1 所示,0 号节点为系统电源接入点,不接入间谐波源,0 号节点外其他节点的负载均采用电阻电感串联模型。并联谐振测试系统的元件基频参数如表 1 所示。

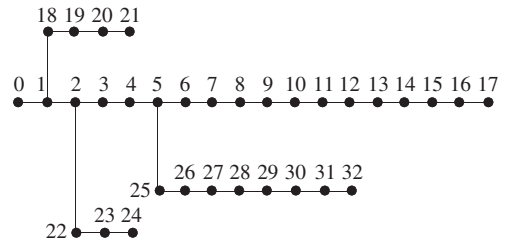


图 1 并联谐振测试系统

Figure 1 Parallel resonance test system

表 1 并联谐振测试系统基频参数

Table 1 Fundamental frequency parameters of parallel resonance test system

编号	支路电阻/ $\Omega$	支路电抗/ $\Omega$	负载电阻/ $\Omega$	负载电抗/ $\Omega$	电容量/S	编号	支路电阻/ $\Omega$	支路电抗/ $\Omega$	负载电阻/ $\Omega$	负载电抗/ $\Omega$	电容量/S
1	0.097 5	0.091 0	1 178.497	707.098	0.000 3	17	0.732 0	0.574 0	1 487.093	660.930	0.000 1
2	0.493 0	0.251 1	1 487.093	660.930	0.000 3	18	0.164 0	0.156 5	1 487.093	660.930	0.000 2
3	0.366 0	0.186 4	924.666	616.445	0.000 2	19	1.504 2	1.355 4	1 487.093	660.930	0.000 2
4	0.388 1	0.194 1	2 137.008	1 068.504	0.000 2	20	0.409 5	0.478 4	1 487.093	660.930	0.000 2
5	0.819 0	0.707 0	2 404.134	801.378	0.000 3	21	0.708 9	0.937 3	1 487.093	660.930	0.000 1
6	0.187 2	0.618 8	641.102	320.551	0.000 2	22	0.451 2	0.308 3	1 360.831	756.017	0.000 2
7	1.711 4	1.235 1	641.102	320.551	0.000 2	23	0.898 0	0.709 1	311.071	148.129	0.000 2
8	1.030 0	0.740 0	2 404.134	801.378	0.000 2	24	0.896 0	0.701 1	311.071	148.129	0.000 1
9	1.044 0	0.740 0	2 404.134	801.378	0.000 2	25	0.203 0	0.103 4	2 276.103	948.376	0.000 2
10	0.196 6	0.065 0	2 465.778	1 643.852	0.000 2	26	0.284 2	0.144 7	2 276.103	948.376	0.000 2
11	0.374 4	0.123 8	1 993.064	1 162.621	0.000 2	27	1.059 0	0.933 7	2 404.134	801.378	0.000 2
12	1.468 0	1.155 0	1 993.064	1 162.621	0.000 2	28	0.804 2	0.700 6	996.532	581.310	0.000 2
13	0.541 6	0.712 9	924.666	616.445	0.000 2	29	0.507 5	0.258 5	80.138	240.413	0.000 2
14	0.591 0	0.526 0	2 599.064	433.177	0.000 2	30	0.974 4	0.963 0	877.421	409.463	0.000 2
15	0.746 3	0.545 0	2 404.134	801.378	0.000 2	31	0.310 5	0.361 9	622.142	296.258	0.000 2
16	1.289 0	1.721 0	2 404.134	801.378	0.000 2	32	0.341 0	0.530 2	1 849.334	296.258	0.000 1

本文以交流电弧炉为接入并联谐振测试系统的间谐波源,依据文献[21]中的交流电弧炉模型,间谐波源并联支路的基频阻抗参数如表 2 所示。

表 2 间谐波源内阻抗基频参数

Table 2 Inter-harmonic source internal impedance fundamental frequency parameter  $\Omega$

并联支路电阻	并联支路电抗
4.239 6	18.428 6

### 2.2 间谐波源对地导纳对并联谐振影响现象

本文在研究过程中,以并联谐振测试系统中存在一个接入位置变化的间谐波源为例,在不同接入位置的条件下,分析间谐波源对地导纳对配电网并联谐振的影响。考察的并联谐振频率范围为 0~12.5 p. u.。

在未接入间谐波源时,配电网的基频节点导纳矩阵形式为

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} Y_{11(1)} & \cdots & Y_{1k(1)} & \cdots & Y_{1n(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1(1)} & \cdots & Y_{kk(1)} & \cdots & Y_{kn(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1(1)} & \cdots & Y_{nk(1)} & \cdots & Y_{nn(1)} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{Y}_{(1)} = & Y_{k1(1)} \cdots Y_{kk(1)} \cdots Y_{kn(1)} \quad (14) \\
 & \begin{bmatrix} Y_{n1(1)} & \cdots & Y_{nk(1)} & \cdots & Y_{nn(1)} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

当仅在节点  $k$  接入间谐波源时,修正后的配电网基频节点导纳矩阵为

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} Y_{11(1)} & \cdots & Y_{1k(1)} & \cdots & Y_{1n(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{L(1)} = & Y_{k1(1)} & \cdots & Y_{kk(1)} + Y_{H(1)} & \cdots & Y_{kn(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1(1)} & \cdots & Y_{nk(1)} & \cdots & Y_{nn(1)} \end{bmatrix} \\
 & \quad \quad \quad (15)
 \end{aligned}$$

式中  $Y_{H(1)}$  为基频下的间谐波源对地导纳,  $S$ 。

通过表 2 可知,间谐波源的内阻抗幅值较大,因此其对地导纳的实部与虚部都很小,修正后的节点导纳矩阵与原节点导纳矩阵相比差别很小。直观地看,间谐波源对地导纳不会对配电网并联谐振产生明显影响。

本文以忽略间谐波源对地导纳的关键模式模态阻抗幅频特性为基准曲线,然后将间谐波源依次接在 5、9、17 号节点上,将 3 种间谐波源接入情况对应的幅频特性曲线与基准曲线作对比,对比结果如图 2 所示。

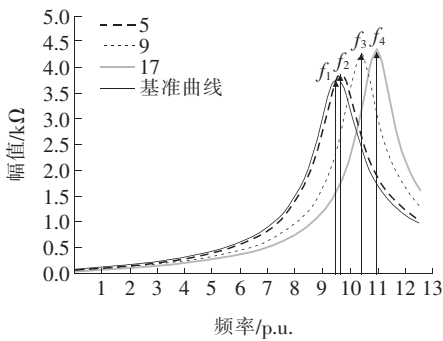


图 2 幅频特性曲线对比图 1

Figure 2 Comparison chart (1) of amplitude-frequency characteristic curve

根据图 2 可以得到 4 条曲线对应的并联谐振频率分别为:  $f_1 = 9.5$  p. u.、 $f_2 = 9.6$  p. u.、 $f_3 = 10.4$  p. u.、 $f_4 = 10.9$  p. u.。当 5 号节点接入间谐波源时,其对应的幅频特性曲线与基准曲线之间几乎没有偏差,间谐波源对地导纳没有对配电网并联谐振造成明显影响。然而,当间谐波源接入到 17 号

节点时,其对应的幅频特性曲线与基准曲线之间出现了明显的偏差,此情况说明尽管间谐波源对地导纳很小,但是在特定节点处仍然能够明显影响并联谐振。这一现象反映出了计入间谐波源对地导纳对保证并联谐振分析结果准确性的意义。

### 2.3 关键模式模态阻抗灵敏度分析

本文将通过灵敏度分析解释间谐波源对地导纳能够对配电网并联谐振产生明显影响的原因。

由图 2 的基准曲线可以得出,不计入间谐波源对地导纳时,并联谐振测试系统的并联谐振频率  $f_1 = 9.5$  p. u.。在不同的间谐波源接入情况下,根据式(13)能够计算得到  $f = 9.5$  p. u. 条件下的  $S_G$  与  $S_B$ 。

同时,本文在此处定义阻抗偏移,以阻抗偏移为评价间谐波源对地导纳对配电网并联谐振影响程度的指标。阻抗偏移的表达式为

$$\Delta |\lambda| = (|\lambda_{oi(f)}| - |\lambda_{ki(f)}|) / |\lambda_{ki(f)}| \quad (16)$$

式中  $|\lambda_{oi(f)}|$  为当不计入间谐波源对地导纳时,在频率次数为  $f$  情况下的关键模式模态阻抗幅值,  $\Omega$ ;  $|\lambda_{ki(f)}|$  为当在节点  $k$  接入间谐波源并计入间谐波源对地导纳,在频率次数为  $f$  情况下的关键模式模态阻抗幅值,  $\Omega$ 。

在不同的间谐波源接入节点条件下,  $S_G$ 、 $S_B$  及  $\Delta |\lambda|$  的分布结果如图 3 所示。

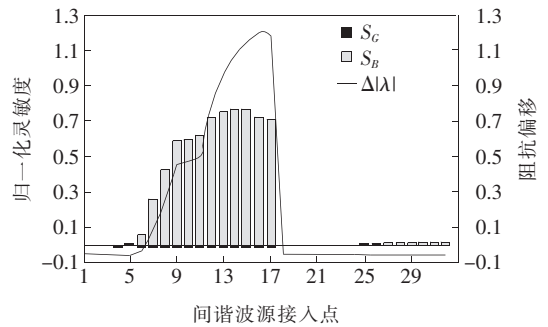


图 3 灵敏度与阻抗偏移分布对比

Figure 3 Comparison of sensitivity and impedance deviation distribution

由图 3 可知,不论间谐波源接入点如何变化,  $S_G$  始终趋近于 0,可以说明间谐波源对地导纳的实部几乎不会对并联谐振造成影响。当间谐波源接入点为 14 号节点时,  $S_B = 0.7622$ , 取到最大值。本文以 14 号节点处的  $S_B$  为基值,对各节点间谐波源对地导纳归一化灵敏度进行标么化处理,标么值结

果如表 3 所示。

表 3 间谐波源对地导纳虚部归一化灵敏度标么值结果

Table 3 Results of normalized sensitivity per unit of admittance imaginary part of the inter-harmonic sources to ground

编号	标么值	编号	标么值	编号	标么值	编号	标么值
1	0.000 004	9	0.759 713	17	0.920 904	25	0.002 681
2	0.002 262	10	0.774 184	18	0.000 004	26	0.003 986
3	0.005 954	11	0.797 716	19	0.000 003	27	0.013 226
4	0.010 820	12	0.941 268	20	0.000 002	28	0.018 633
5	0.001 704	13	0.985 763	21	0.000 002	29	0.020 079
6	0.072 967	14	1.000 000	22	0.002 191	30	0.022 669
7	0.348 792	15	0.998 933	23	0.002 001	31	0.027 707
8	0.568 206	16	0.947 131	24	0.001 807	32	0.021 611

本文以各节点间谐波源对地导纳归一化灵敏度标么值为评价间谐波源对地导纳对并联谐振贡献程度的量化指标。当间谐波源接入点为 1~6 号节点及 18~32 号节点时,  $S_B$  的标么值在 0~0.25 之间, 对地导纳虚部对配电网并联谐振贡献程度极小。此时,  $|\Delta|\lambda|$  极小, 对地导纳虚部对并联谐振几乎没有影响, 该情况对应的幅频特性曲线(如图 2 中 5 号节点)与基准曲线之间的偏差极小。当间谐波源接入点为 7 号节点时,  $S_B$  的标么值在 0.25~0.5 之间, 间谐波源对地导纳对配电网并联谐振的贡献程度较小。当间谐波源接入点在 8~11 号节点时,  $S_B$  的标么值在 0.5~0.75 之间, 间谐波源对地导纳虚部对并联谐振的贡献程度较大, 在这种间谐波源接入情况下,  $|\Delta|\lambda|$  较大, 该情况对应的幅频特性曲线(如图 2 中 9 号节点)与基准曲线之间的偏差较大。当间谐波源接入点在 12-17 号节点时,  $S_B$  的标么值增大到 0.75~1.0 的范围内, 尽管对地导纳虚部较小, 但对并联谐振的贡献程度极大, 此时  $|\Delta|\lambda|$  增大到 0.7~1.3 的范围内, 该情况对应的幅频特性曲线(如图 2 中的 17 号节点)与基准曲线之间出现了明显偏差。

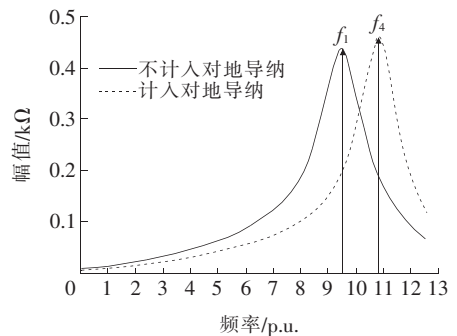
### 3 分析结果验证

#### 3.1 间谐波源对地导纳对并联谐振影响验证

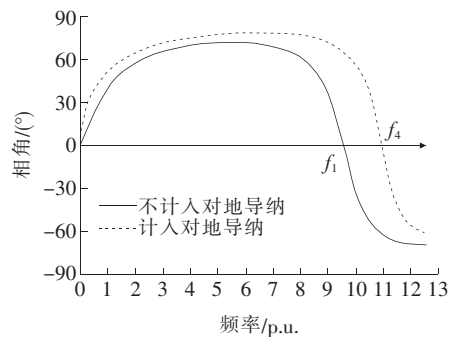
根据文 2.3 节的结果, 当在 17 号节点接入间谐波源时,  $S_G = -0.008 3$ ,  $S_B = 0.702 0$ ,  $|\Delta|\lambda| = 1.181 1$ ,

$f_4 = 10.9$  p. u., 间谐波源对地导纳能够对配电网并联谐振产生明显影响。本文以 17 号节点接入间谐波源情况为例, 验证间谐波源对地导纳对配电网并联谐振的影响。

当 17 号节点接入间谐波源时, 基于传统的阻抗频谱分析法可以对 17 号节点的自阻抗进行频谱分析, 通过比较不计入对地导纳与计入对地导纳情况的自阻抗频谱分析结果, 可以验证间谐波源对地导纳是否对配电网并联谐振产生明显影响。17 号节点自阻抗频谱分析结果如图 4 所示。



(a) 幅频特性曲线



(b) 相频特性曲线

图 4 自阻抗频谱分析

Figure 4 Self-impedance spectrum analysis

由图 4 可知, 在不计入对地导纳与计入对地导纳时, 并联谐振频率分别为  $f_1 = 9.5$  p. u.、 $f_4 = 10.9$  p. u., 与图 2 的结果相吻合。频谱分析结果反映出间谐波源对地导纳能够使并联谐振频率发生明显偏移, 这验证了间谐波源对地导纳能够对配电网并联谐振产生明显影响。

#### 3.2 间谐波源对地导纳影响并联谐振原因验证

为验证间谐波源对地导纳影响并联谐振的主要原因是间谐波源对地导纳的虚部, 并且实部对并联谐振几乎没有影响, 分别绘制不计入对地导纳、只计入对地导纳实部不计入虚部、只计入对地导纳虚部

不计入实部、同时计入对地导纳实部与虚部4种情况对应的关键模式模态阻抗的幅频特性曲线,结果如图5所示。

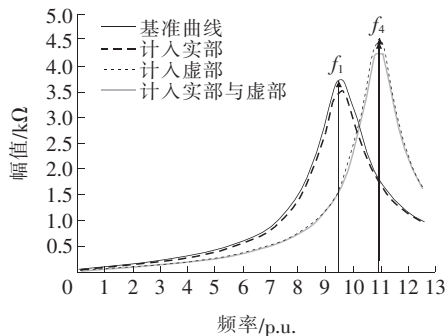


图5 幅频特性曲线对比图2

Figure 5 Comparison chart (2) of amplitude-frequency characteristic curve

由图5可知,间谐波源对地导纳实部对并联谐振的影响程度很小,并且不会使并联谐振频率发生偏移。而计入间谐波源对地导纳虚部,幅频特性曲线与基准曲线相比有明显的偏移,并联谐振频率发生了明显的变化。这验证了间谐波源对地导纳的虚部是影响并联谐振的主要原因,实部几乎不影响并联谐振。

## 4 结语

本文发现了间谐波源对地导纳能够明显影响配电网并联谐振的现象,通过灵敏度分析对其原因进行了研究,得到了如下结论:

1) 尽管间谐波源对地导纳幅值很小,但是特定节点处的间谐波源对地导纳能够对配电网并联谐振产生明显影响;

2) 特定节点处  $S_B$  较大,间谐波源对地导纳虚部对并联谐振的贡献程度较大,这是间谐波源对地导纳虚部能够明显影响并联谐振的主要原因;

3) 各节点处  $S_G$  均趋近于0,间谐波源对地导纳实部几乎不影响并联谐振;

4) 忽略间谐波源对地导纳使并联谐振分析结果准确性严重下降的风险真实存在,在配电网并联谐振分析的工程实践中,针对待接入的间谐波源,计入其对地导纳并根据其可能的接入情况进行节点导纳矩阵修正对保证并联谐振分析结果的准确性具有重要意义;

5) 间谐波源对地导纳对配电网并联谐振的影响与间谐波源接入位置有关,在工程实践中可以通过选择合理的间谐波源接入位置避免配电网并联谐振发生。

## 参考文献:

- [1] 陈思源,景巍巍,史明明,等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(7):162-175.  
CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):162-175.
- [2] 马喜欢,陶顺,徐永海,等. 非线性负荷接入高压一超高压系统应用评估[J]. 中国电力,2021,54(12):63-72.  
MA Xihuan, TAO Shun, XU Yonghai, et al. Application evaluation of non-linear load connected to HV-EHV systems[J]. Electric Power, 2021, 54(12):63-72.
- [3] 李嘉彬,杨建华,张涛,等. 电力电子设备谐波对配电网电压骤升的影响研究[J]. 智慧电力,2021,49(5):35-41.  
LI Jiabin, YANG Jianhua, ZHANG Tao, et al. Harmonic impact of power electronic devices upon voltage swell in distribution networks[J]. Smart Power, 2021, 49(5):35-41.
- [4] 林才华,张逸,邵振国,等. 用于低频非平稳间谐波研究的超高功率电弧炉模型[J]. 中国电力,2020,53(11):1-8.  
LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. An ultra-high-power electric arc furnace model for low-frequency non-stationary inter-harmonics studies[J]. Electric Power, 2020, 53(11):1-8.
- [5] 张金平,李建立,段晨. 计及负频率影响的新能源发电低频间谐波检测方法[J]. 电测与仪表,2020,57(2):95-100.  
ZHANG Jinping, LI Jianli, DUAN Chen. Low frequency interharmonic detection method for renewable energy generation with negative frequency contribution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2):95-100.
- [6] 李国欣,费骏韬,朱堂宇,等. 基于自适应变分模态分解的谐波检测算法[J]. 供用电,2021,38(11):1-8+13.  
LI Guoxin, FEI Juntao, ZHU Tangyu, et al. Harmonic

- detection algorithm based on adaptive variational modal decomposition[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(11):1-8+13.
- [7] 陈佳浩,王琦,朱鑫要,等.谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. *高压电器*, 2020, 56(5):196-202.  
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5):196-202.
- [8] JIANG X, GOLE A M. A frequency scanning method for the identification of harmonic instabilities in HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(4):1875-1881.
- [9] CURRENCE E J, PLIZGA J E, NELSON H N. Harmonic resonance at a medium-sized industrial plant[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(4):682-690.
- [10] 李海峰,刘崇茹,韩民晓.基于频率扫描法与特征值法的交流系统串补引起的次同步谐振分析[J]. *电网技术*, 2012, 36(5):107-112.  
LI Haifeng, LIU Chongru, HAN Minxiao. Analysis on subsynchronous resonance caused by series compensation in AC system based on frequency-scanning and eigenvalue[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(5):107-112.
- [11] 张姗,梁志瑞,张丽芳,等.一种谐振接地系统电容电流测量新方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(1):109-114.  
ZHANG Shan, LIANG Zhirui, ZHANG Lifang, et al. A new capacitor current measurement method for resonance grounding system[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(1):109-114.
- [12] 曾祥君,刘玉铃,喻锴.改进的配电网对地参数谐振测量方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(3):3-11.  
ZENG Xiangjun, LIU Yuling, YU Kun. An improved resonance measurement method of grounded parameters for distribution networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(3):3-11.
- [13] 白雪,高瑞雪,闻福岳,等.特定次谐波注入抑制模块化多电平换流器电容电压波动[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(9):8-14.  
BAI Xue, GAO Ruixue, WEN Fuyue, et al. Suppression of capacitor voltage fluctuation of the modular multi-level converter by specific sub-harmonic injection[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(9):8-14.
- [14] 刘洋,帅智康,李杨,等.多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14):4156-4164+4295.  
LIU Yang, SHUAI Zhikang, LI Yang, et al. Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14):4156-4164+4295.
- [15] HONG L C, SHU W T, WANG J H, et al. Harmonic resonance investigation of a multi-inverter grid-connected system using resonance modal analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(1):63-72.
- [16] 徐文远,张大海.基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(22):89-93.  
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(22):89-93.
- [17] 仰彩霞.基于模态分析法的电力系统谐波谐振问题研究及其灵敏度分析[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
- [18] HUANG Z Y, CUI Y, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1):222-231.
- [19] 仰彩霞,刘开培,李建奇,等.谐波谐振模态灵敏度分析[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(S1):207-212.  
YANG Caixia, LIU Kaipei, LI Jianqi, et al. Modal sensitivity analysis for harmonic resonance[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(S1):207-212.
- [20] KASHEM M A, GANAPATHY V, JASMON G B, et al. A novel method for loss minimization in distribution networks[C]// *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT2000)*, London, UK; IEEE, 2000:251-256.
- [21] 陈磊.电弧炉电气系统的建模与谐波分析[D]. 沈阳:东北大学, 2011.