

基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法

朱远哲^{1,2}, 要若天³, 王玲^{1,2}, 白浩³, 李巍³, 杜婉琳^{1,2}, 徐敏³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080;
3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 随着电网中电力电子装备渗透率的不断提高, 电网谐振现象日益严重, 严重影响电力设备正常工作和电力系统安全运行。针对现有模态频率灵敏度计算方法存在适用场景有限问题提出了基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的电网谐振频率灵敏度分析方法。详细给出了该方法提出的依据和过程, 采用非齐次公式求解关键变量表达式, 避免了频率分辨率的影响, 提高了计算精度, 并有效克服了模态频率灵敏度不能分析支路电流谐振特点的不足。算例分析表明, 在低频和中高频谐振两个案例下, 所提方法能够分析网络元件参数对谐振频率的影响, 并实现元件参数对谐振频率影响的量化。

关键词: 电能质量; 谐振分析; 频率灵敏度; 奇异值分解

Sensitivity Analysis Method for Resonant Frequency of Power Grids Based on Singular Value Decomposition

ZHU Yuanzhe^{1,2}, YAO Ruotian³, WANG Ling^{1,2}, BAI Hao³, LI Wei³, DU Wanlin^{1,2}, XU Min³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Guangzhou 510080, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of power electronic equipment in power grid, the resonance phenomenon of power grid is becoming more and more serious, which seriously affects the normal operation of power equipment and the safe operation of power system. A resonance frequency sensitivity analysis method for power grid based on singular value decomposition (SVD) is proposed to address the limited applicability of existing modal frequency sensitivity calculation methods. The basis and process of the proposed method are given in detail. The non-homogeneous formula is used to solve the key variable expression, which avoids the influence of frequency resolution, improves the calculation accuracy, and effectively overcomes the deficiency that the modal frequency sensitivity cannot analyze the characteristics of branch current resonance. Numerical examples analysis shows that the proposed method can analyze the influence of network component parameters on the resonant frequency and quantize the influence of component parameters on the resonant frequency in two cases of low frequency and medium-high frequency resonance.

Key words: power quality; resonance analysis; frequency sensitivity; singular value decomposition

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 风能、光伏等波动

性、间歇性新能源的渗透率和源-网-荷中电力电子化程度不断提高, 电力系统正朝着高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”方向发展^[1-4]。随着我国以新能源为主体的新型电力系统建设进程的不断加速, 电力系统“双高”趋势愈加明显, 系统中电能质量扰动源显著增多。然而由于电网结构的日益复杂化, 电网中谐波谐振现象频繁发生^[5-6]。网络谐振引起的谐振频率点附近谐波放大现象频繁发生, 导致经常出现严重的谐波谐振问题, 危害电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2096); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20210168(036100KK52210068))。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B2096); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20210168(036100KK52210068))。

力设备的正常工作和电力系统的安全稳定运行^[7-9]。

当前用于谐振分析的方法主要是谐振模态分析法, 谐振模态分析法是提取临界模态、分析动态响应的有效工具^[10-14]。文献[15]定义模态频率灵敏度是系统谐振频率对网络元件参数的敏感程度, 可以量化分析元件参数对谐振频率影响。模态频率灵敏度分析是谐振模态分析法的重要组成部分, 对系统的参数设置和稳定性优化有较好的指导意义^[16-18]。在文献[15]的基础上, 为避免计算过程中受频率分辨率的影响, 文献[19]提出了一种改进的模态频率灵敏度计算方法, 通过转换关键未知变量表达式进行求解, 减小了频率分辨率的影响, 精度得到提高。

基于特征值分解的模态频率灵敏度分析由于其数学特性仅能分析网络节点数与支路数相等的网络, 即网络矩阵为方阵。在实际电网中, 网络中的节点数与支路数一般情况下并不相等, 因此利用传统的模态频率灵敏度分析方法不能分析此类非方阵情况。奇异值分解技术在数学特性上对任意非零矩阵均适用, 因此奇异值分析方法不受传递矩阵形式的限制, 相比于模态分析法适用性更强, 可以更全面地得到网络谐振的规律^[20]。文献[21-22]提出了一种基于奇异值分解的谐波谐振分析方法, 然而该方法仅考虑了系统最大奇异值与元件参数间的关系, 而未考虑系统元件参数对系统谐振频率的影响, 不能从调整网络参数层面实现系统谐振抑制。

基于上述背景, 本文提出了一种基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析(singular value decomposition frequencies sensitivity, SVDFS)方法, 该方法基于奇异值分解的结果采用非齐次公式求解关键变量表达式, 可以从节点电压和支路电流两个层面计算出谐振频率对网络元件参数的灵敏度, 从而量化分析元件参数对系统谐振频率的影响。该方法克服了模态频率灵敏度分析不能分析支路电流谐振特点的不足, 可以全面地分析得到网络谐振的规律, 最后以 IEEE14 节点配电网为例验证了该方法的有效性, 为识别引起谐振的主要元件和设计谐振抑制方案提供了理论基础和依据。

1 基于奇异值的频率灵敏度谐振影响因素分析方法

在频率 f 下, 假定输入与输出之间的传递矩阵

为 $m \times n$ 阶矩阵 $\mathbf{G}$, 其中 m 和 n 分别为矩阵 $\mathbf{G}$ 的输出与输入变量的数量。根据奇异值分解理论, $\mathbf{G}$ 矩阵可以分解成以下形式^[20, 23-24]。

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{W}^T = \sum_{i=1}^p \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{w}_i^T \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为 $m \times m$ 的酉矩阵; $\mathbf{W}^T$ 为 $n \times n$ 的酉矩阵; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_p)$, 其中 p 为矩阵 $\mathbf{G}$ 的秩, σ_i 为矩阵 $\mathbf{G}$ 的奇异值且按降序排列, 即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p > 0$; $\mathbf{u}_i$ 、 $\mathbf{w}_i$ 分别为矩阵 $\mathbf{G}$ 的左、右奇异向量。

因此, 在对矩阵 $\mathbf{G}$ 作奇异值分解后, 通过获得的奇异值和左、右奇异向量可以实现对原矩阵重构。从式(1)中可以看出, 矩阵 $\mathbf{G}$ 最大奇异值 σ_1 及其左、右奇异向量 $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{w}_1$ 对重构矩阵贡献最大。因此可以得到近似后的表达式^[20, 25]如式(2)所示。

$$\mathbf{A} = \mathbf{G}\mathbf{B} \approx \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{w}_1^T \mathbf{B} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_m]^T$ 和 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n]^T$ 分别为在频率 f 下由输出、输入变量组成的向量。

根据泰勒定理, 最大奇异值 σ_1 关于 f 的偏导数为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_1}{\partial f}(f_0 + \Delta f, \alpha_0 + \Delta \alpha) &\approx \frac{\partial \sigma_1}{\partial f}(f_0, \alpha_0) + \\ &\frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial f^2}(f_0, \alpha_0) \Delta f + \frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial f \partial \alpha}(f_0, \alpha_0) \Delta \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

式中: f_0 为谐振频率; Δf 为谐振频率变化; α_0 为网络元件参数; $\Delta \alpha$ 为参数 α 的变化部分。考虑到 $\frac{\partial \sigma_1}{\partial f}(f_0, \alpha_0) = 0$, $\frac{\partial \sigma_1}{\partial f}(f_0 + \Delta f, \alpha_0 + \Delta \alpha) = 0$, 可以得到基于奇异值分解的频率灵敏度 S 的表达式^[19]如式(4)所示。

$$S = \frac{df}{d\alpha}(f_0, \alpha_0) = \lim_{\Delta \alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta \alpha} = - \frac{\frac{\partial^2 |\sigma_1|}{\partial f \partial \alpha}(f_0, \alpha_0)}{\frac{\partial^2 |\sigma_1|}{\partial f^2}(f_0, \alpha_0)} \quad (4)$$

根据奇异值分解, 奇异值 σ_1 相对频率 f 的导数为:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial f} = \mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{w}_1$ 分别为奇异值分解所得左、右奇异向量 $\mathbf{u}_k$ 、 $\mathbf{w}_k$ 的第一列向量; $\mathbf{X}$ 为传递函数矩阵。

将式(5)中 σ_1 对 f 求偏导, 可得:

$$\frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial f^2} = \frac{\partial \mathbf{u}_1^T}{\partial f} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1 + \mathbf{u}_1^T \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial f^2} \mathbf{w}_1 + \mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} \quad (6)$$

式中 $\partial^2 \mathbf{X} / \partial f^2$ 和 $\partial \mathbf{X} / \partial f$ 均可通过将 $\mathbf{X}$ 对频率 f 求导得到。

最大奇异值 σ_1 相对网络元件参数 α 的导数为:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} = \mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha} \mathbf{w}_1 \quad (7)$$

类似地, 将式(7)中 σ_1 对频率 f 求偏导, 可得:

$$\frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial f \partial \alpha} = \frac{\partial \mathbf{u}_1^T}{\partial f} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha} \mathbf{w}_1 + \mathbf{u}_1^T \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial f \partial \alpha} \mathbf{w}_1 + \mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha} \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} \quad (8)$$

由于在奇异值分解过程中, $\mathbf{u}_1^T$ 、 $\mathbf{w}_1$ 均只能表示为每个频率下的值形式, 然而在谐振影响因素分析中将频率 f 作为一个自变量, 无法通过推导计算得到其对频率 f 的偏导。因此 $\partial \mathbf{u}_1^T / \partial f$ 、 $\partial \mathbf{w}_1 / \partial f$ 均为未知数, 在计算过程中需要将其进行简化替代。

根据奇异值分解性质, 有:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{w}_1 = \sigma_1^2 \mathbf{w}_1 \quad (9)$$

$$(\mathbf{X} \mathbf{X}^T) \mathbf{u}_1 = \sigma_1^2 \mathbf{u}_1 \quad (10)$$

将式(10)求转置可得:

$$\mathbf{u}_1^T (\mathbf{X} \mathbf{X}^T) = \sigma_1^2 \mathbf{u}_1^T \quad (11)$$

式(11)关于频率 f 求导可以得到:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} + \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{X})}{\partial f} \mathbf{w}_1 = \frac{\partial \sigma_1^2}{\partial f} \mathbf{w}_1 + \sigma_1^2 \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} \quad (12)$$

式(12)可以用 $\partial \mathbf{w}_1 / \partial f$ 作为变量整理成一个非齐次形式如下。

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X} - \sigma_1^2 \mathbf{E}) \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} = \frac{\partial \sigma_1^2}{\partial f} \mathbf{w}_1 - \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{X})}{\partial f} \mathbf{w}_1 \quad (13)$$

式中 $\mathbf{E}$ 为单位矩阵, 左右奇异向量是每个奇异值唯一的单位向量, 其对 f 的偏微分也是唯一的。对式(13)进行求解可以得到:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X} - \sigma_1^2 \mathbf{E}) \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} = 2\sigma_1 \left(\mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1 \right) \mathbf{w}_1 - \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{X})}{\partial f} \mathbf{w}_1 \quad (14)$$

其中由式(5)可知 $\mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1$ 是一个数。

因此可得:

$$\frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial f} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} - \sigma_1^2 \mathbf{E})^{-1} \times \left[2\sigma_1 \left(\mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1 \right) \mathbf{w}_1 - \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{X})}{\partial f} \mathbf{w}_1 \right] \quad (15)$$

类似地, 可以用 $\partial \mathbf{u}_1^T / \partial f$ 作为变量整理成一个非齐次形式如下。

$$\frac{\partial \mathbf{u}_1^T}{\partial f} (\mathbf{X} \mathbf{X}^T - \sigma_1^2 \mathbf{E}) = \frac{\partial \sigma_1^2}{\partial f} \mathbf{u}_1^T - \mathbf{u}_1^T \frac{\partial (\mathbf{X} \mathbf{X}^T)}{\partial f} \quad (16)$$

也可以得到 $\partial \mathbf{u}_1^T / \partial f$ 的表达式如下。

$$\frac{\partial \mathbf{u}_1^T}{\partial f} = \left[2\sigma_1 \left(\mathbf{u}_1^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial f} \mathbf{w}_1 \right) \mathbf{u}_1^T - \mathbf{u}_1^T \frac{\partial (\mathbf{X} \mathbf{X}^T)}{\partial f} \right] \times (\mathbf{X} \mathbf{X}^T - \sigma_1^2 \mathbf{E})^{-1} \quad (17)$$

将式(15)和式(17)代入式(6)和式(8)中, 可以得到 $\partial^2 \sigma_1 / \partial f^2$ 和 $\partial^2 \sigma_1 / \partial f \partial \alpha$ 的表达式, 进而可以得到式(4)无需任何近似过程的表达式。

2 基于奇异值的频率灵敏度谐振影响因素分析应用

在实践中, 网络元件参数 α 通常用矩阵 $\mathbf{Y}$ 和 $\mathbf{Y}_B$ 中的等效导纳 ($Y_{eq} = G + jB$) 或阻抗 ($Z_{eq} = R + jX$) 表示, 其中 $\mathbf{Y}$ 为节点导纳矩阵, $\mathbf{Y}_B$ 为支路电流向量 $\mathbf{I}_B$ 与节点电压向量 $\mathbf{V}$ 之间的导纳矩阵^[11]。因此从本节起用 Y_{eq} 替代参数 α 。

在对谐振影响分析时分为两种情况, 一种是节点电压的谐振影响因素分析, 另一种是支路电流的谐振影响因素分析。而基于奇异值分解的频率灵敏度谐振影响因素分析方法对这两种情况均适用, 仅传递函数矩阵 $\mathbf{X}$ 有不同。在对节点电压的谐振影响因素分析时, 传递函数矩阵 $\mathbf{X}$ 表示的是阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$, $\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1}$; 在对支路电流的谐振影响因素分析时, 传递函数矩阵 $\mathbf{X}$ 表示的是 $\mathbf{Y}_B \mathbf{Y}^{-1}$ ^[20]。因此, 在对式(8)中 $\partial \mathbf{X} / \partial Y_{eq}$ 的表达式推导时结果有所不同。

在对节点电压的谐振影响因素分析时,

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial Y_{eq}} = \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial E_{ij}} \cdot \frac{\partial E_{ij}}{\partial Y_{eq}} = -\mathbf{Y}^{-1} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial E_{ij}} \mathbf{Y}^{-1} \cdot \frac{\partial E_{ij}}{\partial Y_{eq}} \quad (18)$$

式中 E_{ij} 为 $\mathbf{Y}$ 与 Y_{eq} 相关联的内容, 即一个中间量。

在对支路电流的谐振影响因素分析时,

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial Y_{eq}} = \frac{\partial \mathbf{X}_B}{\partial E_{B,ij}} \cdot \frac{\partial E_{B,ij}}{\partial Y_{eq}} = \frac{\partial \mathbf{Y}_B}{\partial E_{B,ij}} \mathbf{Y}^{-1} \cdot \frac{\partial E_{B,ij}}{\partial Y_{eq}} - \mathbf{Y}_B \mathbf{Y}^{-1} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial E_{ij}} \mathbf{Y}^{-1} \cdot \frac{\partial E_{ij}}{\partial Y_{eq}} \quad (19)$$

式中 $E_{B,ij}$ 为 $\mathbf{Y}_B$ 与 Y_{eq} 相关联的内容, 即一个中间量。而 $\partial^2 \mathbf{X} / \partial f \partial Y_{eq}$ 可通过 $\partial \mathbf{X} / \partial Y_{eq}$ 对 f 进行求导得到。

此时, 我们可通过式(4)计算得到灵敏度 S 。但由于 S 和 Y_{eq} 均为复数, 且复数的导数较为复杂, 为了解决这个问题我们做出如下假设。

$$S = S_r + jS_i, \quad Y_{eq} = G + jB, \quad F = |f|^2 \quad (20)$$

式中: S_r 和 S_i 分别为灵敏度 S 的实部和虚部; Y_{eq} 为等效导纳; G 和 B 分别为等效电导、等效电纳; f 为

频率。

当仅考虑等效电纳变化量 ΔB 变化时,有:

$$\begin{aligned}\Delta F &= |f + \Delta f|^2 - |f|^2 \\ &= |f + j(S_r + jS_i)\Delta B|^2 - |f|^2 \\ &= -2fS_i\Delta B + (S_r^2 + S_i^2)\Delta B^2\end{aligned}\quad (21)$$

令 $\Delta B \rightarrow 0$,可以得到:

$$\frac{\partial F}{\partial B} = -2fS_i \quad (22)$$

将式(22)代入 $\partial f/\partial B$ 的表达式,可得:

$$\frac{\partial f}{\partial B} = \frac{\partial |f|}{\partial B} = \frac{d|f|}{dF} \frac{\partial F}{\partial B} = -S_i \quad (23)$$

类似地,我们可以得到:

$$\frac{\partial f}{\partial G} = \frac{\partial |f|}{\partial G} = \frac{d|f|}{dF} \frac{\partial F}{\partial G} = S_r \quad (24)$$

类似地,在一个等效阻抗为 $Z_{eq}=R+jX$ 的电路中,其中 R 和 X 分别为等效电阻和电抗,可得到如下推论。

$$\frac{\partial f}{\partial X} = \frac{-2S_rRX - S_i(X^2 - R^2)}{(R^2 + X^2)^2} \quad (25)$$

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{S_r(X^2 - R^2) - 2S_iRX}{(R^2 + X^2)^2} \quad (26)$$

最后,将从式(23)~(26)中获得的灵敏度 S 作归一化后可得灵敏度 S_{norm} 表达式为:

$$S_{norm} = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \bigg|_{norm} = \frac{\partial f}{f} \bigg/ \frac{\partial \alpha}{\alpha} = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{f} \quad (27)$$

式中 $\partial f/f$ 和 $\partial \alpha/\alpha$ 分别为频率和网络参数的相对变化。

由式(27)可知,只需将计算得到的频率灵敏度乘以网络参数的原始值再除以频率大小即可进行归一化。归一化的灵敏度是相对单位的灵敏度指标,而不是实际的灵敏度指标。使用归一化后的灵敏度比实际灵敏度更有物理意义,并可以使不同类型参数的灵敏度具有可比性。

基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法计算流程图如图1所示。

如图1所示,本文网络元件频率灵敏度计算流程为:首先获取电力系统网络的拓扑结构,根据拓扑结构建立谐波观测点与谐波激励源之间的传递函数矩阵,再将传递函数矩阵进行奇异值分解,将分解结果代入到基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法中,判断是节点电压还是支路电流的频率灵敏度分析,再代入到相应的计算表达式,最后得到归一化后的网络元件频率灵敏度。

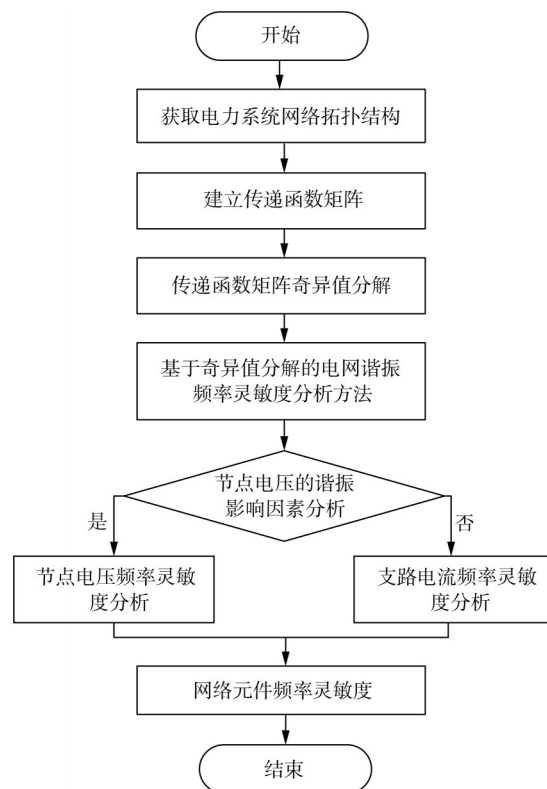


图1 网络元件频率灵敏度计算流程图

Fig. 1 Flow chart of network component frequency sensitivity calculation

3 案例分析与仿真验证

本节以修改后的IEEE14节点配电网为研究对象,研究网络元件参数对谐振频率的影响,验证基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法的有效性。拓扑结构如图2所示,该系统由14个节点,28条支路构成,包括恒功率负载、单调谐滤波器、传输线路,及以3条传输线路为例的对地分布电容等。由于在分析支路电流的谐振特性时,传递函数矩阵是 28×14 阶的非方阵,因此无法使用传统模态频率灵敏度分析法,此时采用本文提出的基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法。IEEE14节点配电网中部分参数如表1所示^[26],其中以5次谐波为例设置单调谐滤波器的参数。本文后续对线路和单调谐滤波器参数进行了简化,并以其所在的数字命名, L_{i-j} 为节点 i 和 j 之间的线路电感, R_i 为节点 i 处的单调谐滤波器的电阻, L_i 为节点 i 处的单调谐滤波器的电感, C_i 为节点 i 处的单调谐滤波器的电容, C_{i-j} 为节点 i 和 j 间线路靠近节点 i 的对地分布电容。

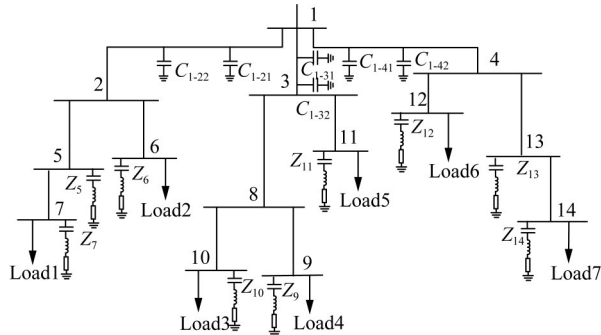


图2 修改后的 IEEE 14 节点配电网络

Fig. 2 Modified IEEE 14-node distribution network

表 1 IEEE14 节点配电网络部分参数

Tab. 1 IEEE 14-node distribution network partial parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
L_{1-2}/mH	1.684	L_7/mH	0.37
L_{1-3}/mH	1.852	L_{10}/mH	0.20
L_{2-5}/mH	3.031	L_{13}/mH	0.67
L_{2-6}/mH	1.852	L_{14}/mH	0.22
L_{3-8}/mH	1.516	$C_7/\mu\text{F}$	1200
L_{3-11}/mH	1.852	$C_{10}/\mu\text{F}$	2000
L_{4-12}/mH	2.021	$C_{13}/\mu\text{F}$	600
L_{13-14}/mH	0.674	$C_{14}/\mu\text{F}$	1800
R_7/Ω	0.011	$C_{1-22}/\mu\text{F}$	2
R_{10}/Ω	0.006	$C_{1-32}/\mu\text{F}$	1.8
R_{13}/Ω	0.021	$P_7(\text{Load1})/\text{kW}$	1.5
R_{14}/Ω	0.011	$P_9(\text{Load4})/\text{kW}$	4.5

对此案例作奇异值分解的结果如图3所示,其中14条曲线分别指的是按降序排列的奇异值 σ_1 — σ_{14} 曲线,即 σ_1 为最大奇异值曲线。从分解结果可知此系统在低频和中高频均有谐振尖峰,初步分析此系统低频谐振与系统中滤波器及无功功率补偿装置有关,而中高频谐振主要与传输线路的对地分布电容有关。由于篇幅有限,本节分别在低频和中高频中各取一个谐振峰值作为案例进行分析,谐振频率分别为166.38 Hz和3487.9 Hz。

根据提出的SVDFS计算方法计算出谐振频率对各参数的敏感程度。为了便于不同类型参数进行比较及对灵敏度大小进行排序,还给出了归一化后的计算结果,如表2所示。

从表2可知,在谐振频率为166.38 Hz时,归一化后的线路电感 L_{2-6} 、 L_{1-2} 和 L_{1-3} 具有更高的频率灵敏度;而在谐振频率为3487.9 Hz时,归一化后的线路对地分布电容 C_{1-42} 、 C_{1-22} 和线路电感 L_{4-12} 具

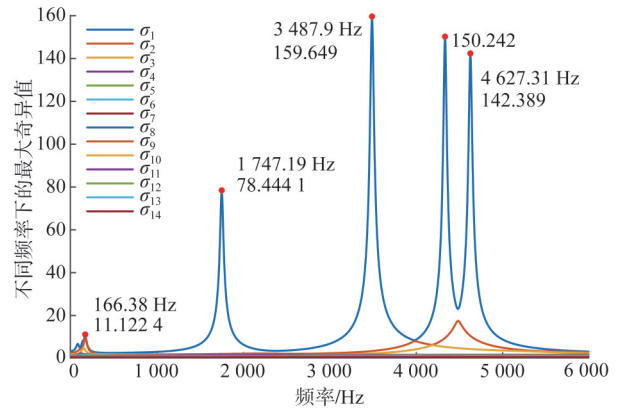


图3 IEEE14 节点配电网络奇异值分解分析结果

Fig. 3 Results of singular value decomposition analysis of IEEE 14-node distribution networks

表 2 IEEE 14 节点配电网络部分参数的频率灵敏度

Tab. 2 Frequency sensitivity of selected parameters of IEEE 14-node distribution networks

参数名称	谐振频率 166.38 Hz		谐振频率 3487.9 Hz	
	归一化前	归一化后	归一化前	归一化后
L_{2-6}/mH	-16.41	-0.1910	-1.028	-0.012
L_{1-2}/mH	-4.041	-0.04275	-0.02257	-0.00024
L_{1-3}/mH	-1.406	-0.01636	-0.003512	-0.00004
L_{4-12}/mH	-1.057	-0.005138	-14.98	-0.1902
R_{13}/Ω	-15.38	-0.001941	-134.1	-0.00081
R_{10}/Ω	17.26	0.00062	-28.84	-0.00005
$C_{1-42}/\mu\text{F}$	-17.25	-0.000261	-29330.0	-0.4423
$C_{1-22}/\mu\text{F}$	-20.49	-0.000259	-17090.0	-0.2147

注: 灵敏度为负数表示参数增大时,谐振频率减小;反之增大。

有更高的频率灵敏度。

通过仿真验证如下,在0.2 s时分别向节点1注入频率为166.38 Hz和3487.9 Hz的谐波电流,各电气元件的响应如图4—5所示。

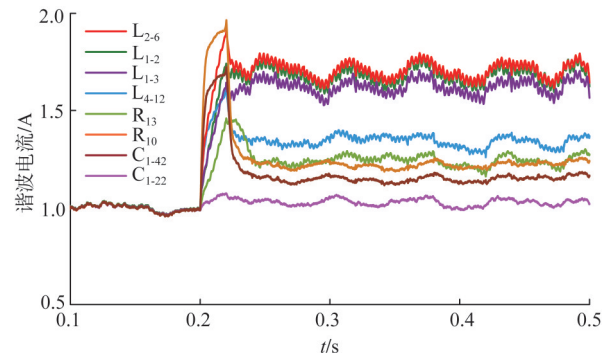


图4 注入166.38 Hz谐波电流主要元件谐振的谐波电流

Fig. 4 Harmonic currents of the main components resonating when injected with 166.38 Hz harmonic currents

如图 4 中所示, 注入 166.38 Hz 的谐波电流扰动后, L_{2-6} 、 L_{1-2} 和 L_{1-3} 的谐波电流明显高于其他元件; 如图 5 中所示, 注入 3 487.9 Hz 的谐波电流扰动后, 线路对地分布电容 C_{1-42} 、 C_{1-22} 和线路电感 L_{4-12} 的谐波电流明显高于其他元件, 且各元件的谐波电流大小顺序与表 2 中归一化后的频率灵敏度绝对值的大小顺序一致, 从而可以确定引起此谐振的主要元件。

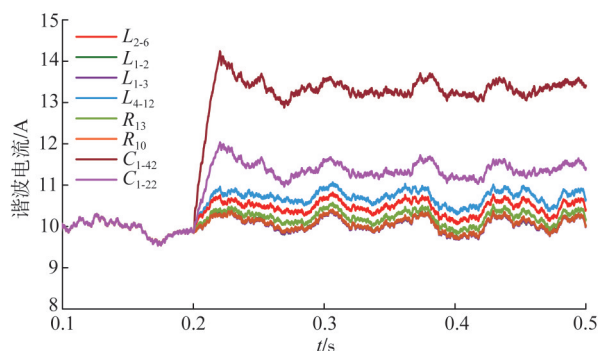


图 5 注入 3 487.9 Hz 谐波电流主要元件谐振的谐波电流
Fig. 5 Harmonic currents of the main components resonating when injected with 3 487.9 Hz harmonic currents

图 3 表明 IEEE14 节点配电网系统在 3 487.9 Hz 时存在谐振。根据表 2 所示的频率灵敏度结果, 在谐振频率为 3 487.9 Hz 时, 线路对地分布电容 C_{1-42} 具有最大的频率灵敏度指标, 是缓解当前谐振的最佳选择。图 6 显示了对地分布电容 C_{1-42} 变化对谐振频率的影响。电容值的增加将使谐振频率移到一个较小的值, 这一结果与负频率灵敏度指标一致。

正如第 1 节所述, $\partial u_1^T / \partial f$ 和 $\partial w_1 / \partial f$ 这两个关键

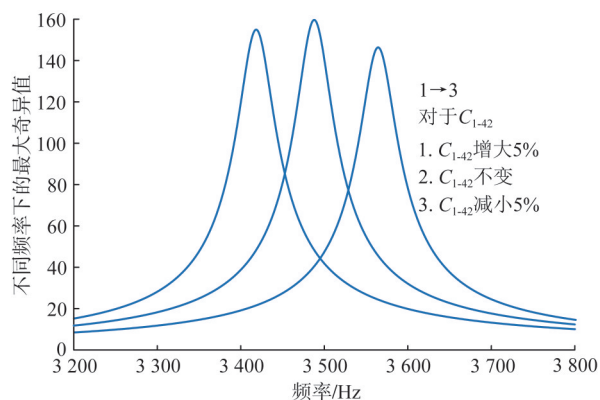


图 6 线路对地分布电容 C_{1-42} 对 3 487.9 Hz 谐振模式的影响
Effect of line-to-ground distributed capacitances C_{1-42} on 3 487.9 Hz resonant mode

变量均为未知数, 只能通过将其近似为 $\Delta u_1^T / \Delta f$ 和 $\Delta w_1 / \Delta f$, 此时灵敏度 S 的计算结果受 Δf 分辨率的影响。为说明本文方法相比于近似方法在“频率分辨率”上的优势且使对比效果明显, 同样以谐振频率为 3 487.9 Hz 下的线路对地分布电容 C_{1-42} 为例, 在图 7 中, 近似计算下不同频率分辨率的方法用蓝色散点表示, 本文所提方法计算结果用红线表示。从图 7 可以看出, 本文方法的计算结果是恒定的, 而近似方法的计算结果随着频率分辨率的提高而不断变化并逐渐接近本文方法的结果。

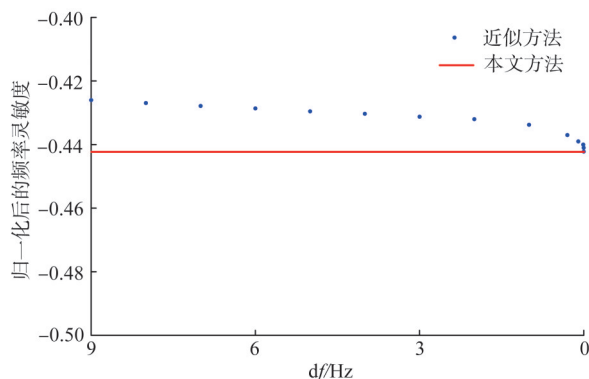


图 7 本文方法与近似方法的比较

Fig. 7 Comparison of the methods in this paper with approximate methods

若在低频下会产生相对于实际值较大比例的计算误差和随机误差, 这将不可避免的影响频率灵敏度计算结果的正确性, 由于本文所提出的频率灵敏度计算方法只需要一个频率点, 不受频率分辨率的影响, 比近似方法具有更高的精度。

4 结语

为了更全面的分析元件参数对谐振频率的影响, 本文利用奇异值分解法可以分解任意矩阵的数学特性, 采用非齐次公式求解关键变量表达式, 提出了一种基于奇异值分解的电网谐振频率灵敏度分析方法, 避免了频率分辨率的影响, 提高了计算精度, 并有效克服了模态频率灵敏度不能分析支路电流谐振特点的不足。以 IEEE14 节点配电网为例研究了支路电流谐振分析中元件参数对谐振频率的影响, 其中考虑了配电网内的恒功率负载、单调谐波滤波器、传输线路及以 3 条传输线路为例的对地分布电容等网络元件参数。通过案例对该方法进行验证, 仿真结果表明该方法合理有效。本文方法可以

量化元件参数对谐振频率的影响,为识别引起谐振的主要元件和设计谐振抑制方案提供了理论基础和依据。

仿真分析论证了本文方法的准确性和有效性,后续研究工作将会把所提理论方法应用于工程实际。

参考文献

- [1] 唐雨晨,林毅,王仁顺,等.基于变分模态分解的高比例新能源电网调频储能需求计算方法[J].南方电网技术,2023,17(3):146-155.
TANG Yuchen, LIN Yi, WANG Renshun, et al. Demand calculation method of energy storage in high-proportion new energy power system frequency regulation based on variational modal decomposition [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 146-155.
- [2] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.
- [3] 张东辉,康重庆,卢洵,等.高比例新能源系统中储能配置规模论证[J].南方电网技术,2022,16(4):3-11.
ZHANG Donghui, KANG Chongqing, LU Xun, et al. Demonstration on the scale of energy storage deployment in high-proportion new energy power systems [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 3-11.
- [4] 张旭,李阳,刘晓,等.含高渗透率新能源的新型交直流储能系统的配电网规划[J].南方电网技术,2022,16(4):60-67.
ZHANG Xu, LI Yang, LIU Xiao, et al. Distribution network planning of new AC/DC energy storage system with high penetration new energy [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 60-67.
- [5] 谢东,刘明波,徐立新.含分布式能源电力系统输配协调优化研究综述及展望[J].南方电网技术,2023,17(4):25-37.
XIE Dong, LIU Mingdong, XU Lixin. Review and prospect of transmission-distribution co-optimization of power systems with distributed energy resources [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 25-37.
- [6] 李玉龙,杨明,杨倬,等.抑制谐波谐振的并网逆变器机侧电流反馈的CVFAD设计方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(18):125-136.
LI Yulong, YANG Ming, YANG Zhuo, et al. Design method for CVFAD of grid-connected inverter inverter-side current feedback with harmonic resonance suppression [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 125-136.
- [7] 楚焱,涂春鸣,罗安,等.不同类型谐波源综合补偿的串联混合型APF设计[J].电力系统自动化,2013,37(8):123-128.
CHU Lang, TU Chunming, LUO An, et al. A series hybrid APF design for integrated compensation of different types of harmonic sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 123-128.
- [8] 王鹤,李国庆,李耀峰,等.多逆变型分布式电源协调的微电网谐波控制方法[J].电力系统自动化,2014,38(23):33-39.
WANG He, LI Guoqing, LI Yaofeng, et al. A coordination control method of harmonic in microgrid based on multiple inverter interfaced distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 33-39.
- [9] SHUAI Z, LIU D, SHEN J, et al. Series and parallel resonance problem of wideband frequency harmonic and its elimination strategy [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 29(4): 1941-1952.
- [10] YANG S, XIANG W, LI R, et al. An improved DC fault protection algorithm for MMC HVDC grids based on modal domain analysis [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4086-4099.
- [11] XU W, HUANG Z, CUI Y, et al. Harmonic resonance mode analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.
- [12] XIE X, ZHANG Y. General step-index optical fiber modal characteristic and sensitivity analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 40(3): 785-796.
- [13] HUANG Z, 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.
- [14] HE Z, HU H, ZHANG Y, et al. Harmonic resonance assessment to traction power supply system considering train model in China high speed railway [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1735-1743.
- [15] CUI Y, WANG X. Modal frequency sensitivity for power system harmonic resonance analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 1010-1017.
- [16] HU H, HE Z, ZHANG Y, et al. Modal frequency sensitivity analysis and application using complex nodal matrix [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 969-971.
- [17] SUN X, LEI W, DAI Y. Improved implementation and analysis of modal frequency sensitivity [C]// 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference, May 28-30, 2021, Wuhan, China. New York: IEEE, 2021:1-5.
- [18] WANG P, DAI H. Eigensensitivity of symmetric damped systems with repeated eigenvalues by generalized inverse [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2016, 96(1): 201-210.
- [19] WANG Y, XU Y, TAO S, et al. A modified modal sensitivity method for resonance analysis in power electronic systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(147): 1-9.
- [20] 李杨,程莹,刘洋,等.基于奇异值分解理论的谐波放大分析方法[J].电力系统自动化,2017,41(8):16-21.
LI Yang, CHENG Ying, LIU Yang, et al. Analytic method of harmonic amplification based on singular value decomposition theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 16-21.
- [21] LI Y, SHUAI Z, SHEN J, et al. Harmonic resonance analysis method based on singular value decomposition theory [C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, USA. New York: IEEE, 2017:1-5.
- [22] SHUAI Z, LI Y, SHEN J, et al. Application of singular value sensitivity on harmonic resonance analysis for inverter-based power systems [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 01-05, 2017, Cincinnati,

- USA. New York: IEEE, 2017:2969 – 2974.
- [23] 罗新,牛海清,宋廷汉,等. 基于S变换和概率神经网络的局部放电特征提取及放电识别方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7):17 – 23.
- LUO Xin, NIU Haiqing, SONG Tinghan, et al. S transform and probabilistic neural network based partial discharge feature extraction and discharge recognition method [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 17 – 23.
- [24] 唐拥军,刘东,肖志怀,等. 基于卷积神经网络与奇异值分解的水电机组故障诊断方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2021, 460(2): 175 – 181.
- TANG Yongjun, LIU Dong, XIAO Zhihui, et al. Fault diagnosis of hydropower units based on convolutional neural network and singular value decomposition [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, 460(2): 175 – 181.
- [25] 古庭赞,高云鹏,吴聪,等. 基于改进小波阈值函数和奇异值分解的电能质量扰动检测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 111 – 118.
- GU Tingyun, GAO Yunpeng, WU Cong, et al. Power quality disturbance detection based on improved wavelet threshold function and singular value decomposition [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 111 – 118.
- [26] 毛洪山. 浅谈谐波无源滤波器的设计[J]. 建筑电气, 2009, 28(2): 36 – 39.
- MAO Hongshan. Elementary discussion about the design of passive filter for harmonics [J]. Building Electricity, 2009, 28(2): 36 – 39.

收稿日期: 2023-07-03; 网络首发日期: 2024-04-20

作者简介:

朱远哲(1994), 男, 工程师, 博士, 研究方向为电能质量监测与治理、电磁场计算与仿真, zhuyz060452@163.com;

要若天(1992), 男, 通信作者, 工程师, 博士, 研究方向为电能质量监测与治理, yaort@csg.cn;

王玲(1986), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电能质量分析与控制, 360409837@qq.com。

(上接第 73 页 Continued from Page 73)

- [23] YING Z, YOU J, MORRIS C, et al. Hierarchical graph representation learning with differentiable pooling [C]// Advances in Neural Information Processing Systems, December 3 – 8, 2018, Montreal, Canada. Cambridge: MIT Press, 2018:4800 – 4810.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [25] SUNITHA R, SREERAMA K R, ABRAHAM T M. Development of a composite security index for static security evaluation [C]// TENCON 2009: 2009 IEEE Region 10 Conference, November 23 – 26, 2009, Singapore. New York: IEEE, 2009: 1 – 6.
- [26] KIPF T N, WELLMING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks [C]// International Conference on Learning Representations, April 24 – 26, 2017, Vancouver, Canada. Ithaca: ICLR, 2017: 102 – 106.
- [27] HOU Z, LIU X, DONG Y, et al. Graphmae: self-supervised masked graph autoencoders [C]// Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, August 14 – 18, Seattle, WA, USA. New York: ACM, 2022: 594 – 604.
- [28] BIANCHI F M, GRATTAROLA D, ALIPPI C. Spectral clustering with graph neural networks for graph pooling [C]// International Conference on Machine Learning, July 13 – 18, 2020, Vienna, Austria. Berlin: Springer, 2020: 874 – 883.

收稿日期: 2023-07-11; 网络首发日期: 2024-04-19

作者简介:

马遵(1995), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析、运行控制, zunma@vip.qq.com;

李永哲(2000), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析, liyongzhe51@qq.com;

何鑫(1990), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为新能源并网稳定分析, 424217127@qq.com。