

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240877

基于 s 域节点导纳矩阵的直流馈入交流系统谐振灵敏度分析

王顺亮¹, 傅美霓¹, 马俊鹏¹, 周诗丁², 张岩¹, 刘天琪¹, 彭茂兰³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610094;
3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广东 广州 510663)

摘要: 由于含直流系统馈入的交流系统中含有换流设备, 谐振分析的建模过程更加复杂, 无法同时兼顾系统的整体性和节点元件建模的多样性。基于此, 提出了基于 s 域节点导纳矩阵的系统振荡风险分析方法。首先以系统工频等值电路节点导纳矩阵为基础, 提出了一种元件等值化简后生成系统 s 域节点导纳矩阵的方法, 并据此求解系统谐振模式。然后基于此构造交流元件参数在系统谐振模式下的振荡风险灵敏度模型, 将直流系统简化后接入交流系统, 分析振荡频段区内元件参数、网络结构与谐振模式之间的灵敏度关系。最后在 PSCAD/EMTDC 平台搭建含直流系统馈入的交流系统模型, 验证了所提元件参数灵敏度分析方法的正确性和有效性。

关键词: 谐振模式; s 域节点导纳矩阵; 灵敏度分析; 振荡风险预判

Resonance sensitivity analysis of DC-fed AC systems based on s -domain nodal admittance matrix

WANG Shunliang¹, FU Meini¹, MA Junpeng¹, ZHOU Shiding², ZHANG Yan¹, LIU Tianqi¹, PENG Maolan³

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Tianfu New Area Power Supply Company, Chengdu 610094, China; 3. EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Due to the presence of converter equipment in DC-fed AC systems, the modeling process for resonance analysis becomes more complex, making it challenging to simultaneously account for both the overall system behavior and the diversity of individual node component models. To address this, this paper proposes a method for analyzing system oscillation risk based on the s -domain nodal admittance matrix. First, from the nodal admittance matrix of the system's power frequency equivalent circuit, a method is introduced to derive the system's s -domain nodal admittance matrix after component equivalence simplification, and the system resonance modes are solved accordingly. Then, a sensitivity model is developed to assess the oscillation risk of AC component parameters under system resonance conditions. After simplifying the DC system, it is integrated into the AC system, and the sensitivity relationships among component parameters, network structure, and resonance modes within oscillatory frequency ranges are analyzed. Finally, an AC system model with DC feed-in is built on the PSCAD/EMTDC platform to verify the accuracy and effectiveness of the proposed component parameter sensitivity analysis method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977135).

Key words: resonance mode; s -domain nodal admittance matrix; sensitivity analysis; oscillation risk prediction

0 引言

目前我国东部电网已形成了多直流馈入、交直流并联运行的交直流高度耦合新形态, 电力电子设备的大规模接入使得电力系统的动态特性日益复杂, 由此带来的交直流谐振风险日益突出^[1-3]。随着

直流、新能源变流器等电力电子设备的接入, 交直流混联电网宽频带范围内的动态稳定问题得到广泛的关注和研究^[4-5]。高压直流换流器在实际运行中不可避免地产生谐波, 在交流侧产生谐波电流, 在直流侧产生谐波电压, 且谐波幅值随着输送直流功率的增加而增加, 若直流侧发生串联谐振, 其频率与交流侧的谐振频率存在相互影响, 导致情况变得更加严重^[6]。实际工程表明电力电子设备引入电力系

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977135)

统不仅会引起低频振荡问题,还会引起电力系统次/超同步以及宽频振荡^[7-9]。例如 2010 年在我国的沽源地区发生过几次 3~10 Hz 的次同步振荡^[10]。2014 年,我国牛寨-从西直流输电工程多次因谐波电流过大而导致直流线路 50 Hz 保护动作^[11]。2017 年,我国鲁西柔性直流工程广西的换流站附近出现了频率为 1270 Hz 的高频振荡现象^[12]。

电力系统发生谐振时,会引起过电压、过电流,甚至造成机网复合共振,严重威胁系统的安全稳定运行^[13]。文献[14-18]采用特征值分析法分析了新能源并网以及高压直流输电系统的振荡问题,但特征值分析法依赖于系统的状态空间模型,在分析高比例电力电子系统的宽频振荡问题时存在工作量大、状态空间模型难建立等问题。文献[19-23]基于阻抗分析法研究了逆变器并网时的稳定性问题,但其主要分析单个逆变器并网的稳定性问题,对于整个系统而言不够全面。文献[24]最先提出采用 s 域节点导纳矩阵的概念和方法来分析电力系统稳定性。文献[25]则对 s 域节点导纳矩阵方法进行了完善和总结,但其研究主要针对交流系统进行,并未考虑直流系统加入后在交流系统中的谐振情况。文献[26]详细分析了含高比例电力电子设备的电网面临的技术挑战和可能的解决方案,针对宽频谐振问题,提出可用 s 域节点导纳矩阵法分析其稳定性,但是并未给出具体方法。目前针对 s 域节点导纳矩阵的研究多基于直流电网或交流电网本身,缺少对于直流馈入交流系统中的实际应用研究。

基于此本文首先详细研究了 s 域节点导纳矩阵法,理论推导了 s 域节点导纳矩阵法的可行性,提出了以系统工频等值电路节点导纳矩阵为基础,将元件等值化简后生成系统 s 域节点导纳矩阵的方法,对于大部分含有大量参数元件的电力系统具有普适性。其次,提出了基于 s 域节点导纳矩阵法的含直流馈入的交流系统谐振问题分析方法,建立系统元件参数和交流网络结构对振荡风险的灵敏度模型,以便对振荡风险进行预判。最后,基于 IEEE9 节点系统构造含电网换相型高压直流输电(line commutated converter based HVDC, LCC-HVDC)馈入的交流系统,并对此系统的谐振问题进行分析。

1 s 域节点导纳矩阵法

节点导纳矩阵是用来描述电力系统结构的一种常用方法,由于其具有构建方便、概念清晰以及变量独立完备等优势而得到广泛应用。在 s 域建立的元件模型能很清晰地表达出动态元件的阻抗特性,且 s 域节点导纳矩阵的形式简洁、易于建立。

1.1 s 域节点导纳矩阵法理论推导

电力系统的状态空间描述如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为系统状态向量; \mathbf{A} 为系统状态空间矩阵; \mathbf{B} 为一维列向量; \mathbf{C} 为一维行向量; $u(t)$ 为节点的输入电流; $y(t)$ 为节点的输出电压。

将式(1)进行拉普拉斯变换可得

$$\begin{cases} s\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}u(s) \\ \mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(s) \end{cases} \quad (2)$$

得到系统的传递函数阵 $\mathbf{G}(s)$ 为

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (3)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。可得系统的转移阻抗 Z_{ij} 为

$$Z_{ij}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{C} \frac{\mathbf{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} \mathbf{B} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{adj}(\cdot)$ 为矩阵的伴随矩阵; $\det(\cdot)$ 为矩阵的行列式。

由式(4)可知,转移阻抗的分母为关于 s 的多项式,电力系统的 s 域节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}(s)$ 描述为

$$\mathbf{Y}(s)\mathbf{V}(s) = \mathbf{I}(s) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{V}(s)$ 为节点电压向量; $\mathbf{I}(s)$ 为节点注入电流向量。设节点 j 上的注入电流为 $I_j(s)$, 在节点 i 上的输出电压为 $V_i(s)$, 则由式(5)可得

$$\begin{cases} \mathbf{Y}(s)\mathbf{V}(s) = \mathbf{B}'I_j(s) \\ V_i(s) = \mathbf{C}'\mathbf{V}(s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{B}' 为一维列向量; \mathbf{C}' 为一维行向量。

因此 s 域下转移阻抗 $Z_{ij}(s)$ 为

$$Z_{ij}(s) = \frac{V_i(s)}{I_j(s)} = \mathbf{C}'[\mathbf{Y}(s)]^{-1}\mathbf{B}' = \mathbf{C}' \frac{\mathbf{adj}[\mathbf{Y}(s)]}{\det[\mathbf{Y}(s)]} \mathbf{B}' \quad (7)$$

对于同一个电力系统而言,转移阻抗的值是不变的,用状态空间和 s 域节点导纳矩阵描述的转移阻抗的表达式是相等的,则 $\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \det[\mathbf{Y}(s)]$, 由此可知, $\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})$ 与 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 具有相同的零点。而 $\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})$ 为系统的特征多项式,其零点为系统的特征值,对应电力系统的所有谐振模式。于是, s 域节点导纳矩阵的行列式零点值也能反映电力系统的谐振模式^[27]。

1.2 s 域节点导纳矩阵法的谐振结构

可以用 s 域节点导纳矩阵行列式的零点表示电力系统的网络谐振模式,如式(8)所示。

$$s_k = -\sigma_k + j\omega_k \quad (8)$$

式中: s_k 为矩阵 $\mathbf{Y}(s)$ 行列式的第 k 个零点,同时也表示系统的第 k 个谐振模式,其表达形式是一对共

根； σ_k 为衰减因子； ω_k 为角频率。 s_k 谐振模式下的节点电压振型向量由复常数矩阵 $Y(s_k)$ 的零特征根的右特征向量表示，如式(9)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{s_k} = [\mathbf{r}_{1,s_k} \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{k,s_k} \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{n,s_k}]^T \\ \left\{ \mathbf{r}_{s_k} \mid \mathbf{Y}(s_k) \mathbf{r}_{s_k} = 0 \times \mathbf{r}_{s_k}, \mathbf{r}_{s_k}^T \mathbf{r}_{s_k} = 1 \right\} \end{cases} \quad (9)$$

式中： \mathbf{r}_{s_k} 为 s_k 谐振模式下节点导纳矩阵零特征值所对应的右特征列向量； \mathbf{r}_{k,s_k} 为 s_k 谐振模式下第 k 个节点导纳矩阵零特征值所对应的右特征列向量。

由于 s_k 为 s 域节点导纳矩阵 $Y(s)$ 行列式的第 k 个零点，因此矩阵 $Y(s_k)$ 的行列式为零，矩阵 $Y(s_k)$ 存在零特征值，由此可知，与零特征值相对应的模态变量在幅值上远大于其他模态变量，将其视为第 k 个谐振模式的主导模态变量。矩阵特征值的右特征向量反映了特征值所对应的模态变量在各实际变量中的表现程度，所以可用矩阵 $Y(s_k)$ 的零特征值对应的右特征列向量反映 s_k 谐振模式下各节点电压的相对振荡形式。

1.3 s 域节点导纳矩阵的形成

在求取系统导纳矩阵时，通常以工频下交流系统等值电路的节点导纳矩阵为基础，生成交流系统的 s 域节点导纳矩阵。进行电路等值时首先将系统元件分为电源、输电线路等，求出其等值导纳，随后将网络划分为外部网络和内部网络，内部网络包括研究中所关注的节点，等值模型时保留原结构，只对不需要的外部网络进行化简。使用矩阵处理消除式中的外部节点，消除公式如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{EE} & \mathbf{Y}_{EB} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{BE} & \mathbf{Y}_{BB} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_E \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{EQ} &= \mathbf{Y}_{BB} - \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} \mathbf{Y}_{EB} \\ \dot{I}_{EQ} &= \dot{I}_B - \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} \dot{I}_E \end{aligned} \quad (11)$$

式中： \mathbf{Y}_{EE} 、 \mathbf{Y}_{BB} 、 \mathbf{Y}_{II} 分别为系统的外部节点、边界节点、内部节点的导纳矩阵；其余矩阵为节点间的导纳矩阵； \dot{V}_E 、 \dot{V}_B 、 \dot{V}_I 分别为外部节点、边界节点、内部节点的输出电压； \dot{I}_E 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_I 分别为外部节点、边界节点、内部节点的输入电流； \mathbf{Y}_{EQ} 为外部网络转化为边界节点后的等效支路矩阵； \dot{I}_{EQ} 为外部节点功率等效为边界节点后等效注入的电流。等值后，系统节点矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{EQ} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_B \\ \dot{V}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{EQ} \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} \quad (12)$$

随后分别对各支路进行化简求解。节点导纳矩

阵为对称阵，非对角元素为互导纳 $Y_h = M + jN$ ，其值为节点间连接支路的导纳值的负数。节点间连接支路一般包括电阻串联电感、电阻串联电容、电阻串联电感和单独电感支路^[28]。

$$-\frac{1}{R + j\omega L} = M + jN \quad (13)$$

式中： R 为线路电阻； L 为线路电感。可得电阻串联电感支路的 s 域表达式为

$$Y_{hRL}(s) = \frac{1}{\frac{|M^2 - N^2| - M^2 - N^2}{2M(M^2 + N^2)} + s \frac{N}{\omega(M^2 + N^2)}} \quad (14)$$

将 ωL 替换为 $-1/(\omega C)$ ，得到电阻串联电容支路的 s 域表达式为

$$Y_{hRC}(s) = \frac{1}{\frac{|M^2 - N^2| - M^2 - N^2}{2M(M^2 + N^2)} - \frac{N\omega}{s(M^2 + N^2)}} \quad (15)$$

式中： C 为线路电容。得到电阻串联电感电容支路的 s 域表达式为

$$Y_{hRLC}(s) = \frac{1}{\frac{|M^2 - N^2| - M^2 - N^2}{2M(M^2 + N^2)} + s \left(\frac{N}{\omega(M^2 + N^2)} + \frac{1}{\omega^2 C} \right) + \frac{1}{sC}} \quad (16)$$

得到电感支路的 s 域表达式，如式(17)所示。

$$Y_{hL}(s) = \frac{N\omega}{s} \quad (17)$$

节点导纳矩阵中的对角元素为自导纳 $Y_s = E + jF$ ，其值为所连接节点的所有支路导纳之和。于是并联在节点 i 的支路导纳值 Y_i 为

$$Y_i = (E - \sum M) + j(F - \sum N) \quad (18)$$

根据计算得到的自导纳、互导纳，可以求出系统的 s 域导纳矩阵。

2 含直流馈入的交流系统谐振问题分析

当直流馈入交流系统时，需分析元件参数和网络结构改变对振荡的影响程度，以便对系统振荡进行预判和抑制。

2.1 含直流馈入的交流系统等值过程

为保证完整交流系统稳定性分析的准确性，获取包含直流馈入在内的交流系统完整导纳信息至关重要，本文通过对系统进行阻抗建模的方式求取 LCC-HVDC 系统的等效阻抗。

如图 1 所示，采取模块化方式对控制系统和一次回路进行小信号建模，通过求取各模块电压电流

关系得到等值阻抗^[29]。分别求取整流侧换流器直流侧等值阻抗 Z_{dc_r} 、直流线路阻抗 Z_{dc_l} 与 Z_{dc_r} 串联得到的逆变站直流侧等值阻抗 Z_{dc_i} ，最终对逆变侧进行建模求得 LCC-HVDC 系统在交流母线处的等值阻抗 Z_{ac_LCC} 和直流系统等值导纳 Y_{ac_LCC} ，分别如式(19)和式(20)所示。

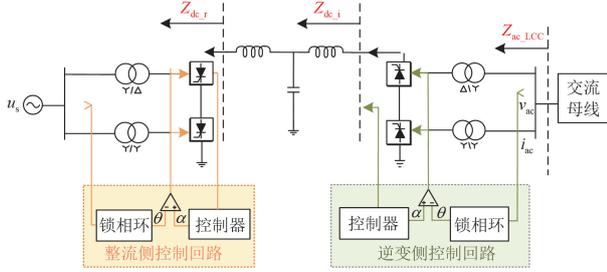


图1 LCC-HVDC 系统

Fig. 1 LCC-HVDC system

$$Z_{ac_LCC} = \frac{v_{ac}}{i_{ac}} \quad (19)$$

$$Y_{ac_LCC} = \frac{1}{Z_{ac_LCC}} \quad (20)$$

式中： v_{ac} 为交流母线电压； i_{ac} 为交流母线电流。

2.2 元件参数的灵敏度建模

实际工程中对电力系统进行运行方式规划时，需要排除一些可能引发谐振的运行工况，此时需要对系统进行风险预判。通过求解网络元件对关键特征值的灵敏度值，可以获得系统在某频率下发生谐波谐振时，系统中各元件对此次谐波谐振的参与程度。通过选取灵敏度较高的元件进行观察，适当调整这些参与程度较高的元件，可以削弱谐波谐振，降低谐振风险，实现风险预判。电力系统网络谐振模式的节点参与因子矩阵 \mathbf{P}_{s_k} 定义如式(21)所示。

$$\mathbf{P}_{s_k} = \mathbf{r}_{s_k} \mathbf{l}_{s_k} = \mathbf{i} \begin{matrix} & & & j & & \\ \begin{pmatrix} \mathbf{r}_{s_k,1} \mathbf{l}_{s_k,1} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,1} \mathbf{l}_{s_k,j} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,1} \mathbf{l}_{s_k,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{r}_{s_k,i} \mathbf{l}_{s_k,1} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,i} \mathbf{l}_{s_k,j} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,i} \mathbf{l}_{s_k,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{r}_{s_k,n} \mathbf{l}_{s_k,1} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,n} \mathbf{l}_{s_k,j} & \cdots & \mathbf{r}_{s_k,n} \mathbf{l}_{s_k,n} \end{pmatrix} & & & & & \end{matrix} \quad (21)$$

式中： \mathbf{l}_{s_k} 为 s_k 谐振模式下节点导纳矩阵的零特征值对应的左特征行向量。 \mathbf{P}_{s_k} 中元素的绝对值越大，表明谐振模式下该元素所对应的列节点注入电流对其所对应的行节点电压的激励作用越强，参与谐振模式的程度越高。

由特征值和特征向量定义可知

$$\mathbf{l}_{s_k} \mathbf{Y}(s_k) = \lambda_{s_k} \times \mathbf{l}_{s_k} \quad (22)$$

式中： λ_{s_k} 为 s_k 谐振模式下接近于零的特征值。

假设 a 为网络元件参数，式(22)等式两边对 a 求偏导得

$$\mathbf{l}_{s_k} \frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial a} \mathbf{r}_{s_k} + \frac{\partial \mathbf{l}_{s_k}}{\partial a} \mathbf{Y}(s_k) \mathbf{r}_{s_k} = \frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial a} \mathbf{l}_{s_k} \mathbf{r}_{s_k} + \lambda_{s_k} \frac{\partial \mathbf{l}_{s_k}}{\partial a} \mathbf{r}_{s_k} \quad (23)$$

由于有

$$\mathbf{Y}(s_k) \mathbf{r}_{s_k} = \lambda_{s_k} \times \mathbf{r}_{s_k} \quad (24)$$

联立式(22)一式(24)可得

$$\frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial a} = \mathbf{l}_{s_k} \frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial a} \mathbf{r}_{s_k} \quad (25)$$

式(25)表明，特征值对元件参数的灵敏度可由节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}(s_k)$ 对元件参数的偏导求出。节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}(s_k)$ 对导纳矩阵中第 i 行、 j 列的元素 Y_{ij} 的偏导为

$$\frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial Y_{ij}} = \mathbf{i} \begin{matrix} & & & j & & \\ \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} & & & & & \end{matrix} \quad (26)$$

由式(26)可得

$$\frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial Y_{ij}} = \mathbf{l}_{s_k} \frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial Y_{ij}} \mathbf{r}_{s_k} = \mathbf{l}_{s_k,i} \mathbf{r}_{s_k,j} \quad (27)$$

由式(26)和式(27)可知，特征值对节点导纳矩阵元素 Y_{ij} 的偏导可由节点参与因子矩阵求得。因此可定义节点参与因子矩阵 $\mathbf{P}_{s_k,ji}$ 为特征值 λ_{s_k} 的灵敏度矩阵，如式(28)所示。

$$\mathbf{P}_{s_k,ji} = \frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial Y_{ij}} = \mathbf{l}_{s_k,i} \mathbf{r}_{s_k,j} \quad (28)$$

s_k 谐振模式的节点参与因子矩阵由接近零的特征值 λ_{s_k} 对应的左、右特征向量求得，因此可用特征值模对元件参数的灵敏度来反映元件参数对振荡的影响程度。系统中的元件主要分为两类，一类为母线的并联元件，仅对导纳矩阵的对角元素起作用；另一类为母线之间的串联元件，对导纳矩阵中的对角元素、非对角元素都起作用。因此求取元件参数的特征值时，可以分别对并联元件导纳 $y_p = G + jQ$ 和串联元件阻抗 $z_s = R + jX$ 的灵敏度进行求取。其中： G 为电导； Q 为电纳； X 为电抗。

$$\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial G} = \frac{S_r \lambda_r + S_i \lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} = \mu \quad (29)$$

$$\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial Q} = \frac{S_r \lambda_i - S_i \lambda_r}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} = \nu \quad (30)$$

$$\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial R} = \frac{\mu(X^2 - R^2) + 2\nu RX}{(R^2 + X^2)^2} \quad (31)$$

$$\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial X} = \frac{-2\mu RX + \nu(X^2 - R^2)}{(R^2 + X^2)^2} \quad (32)$$

式中： $\lambda_{s_k} = \lambda_r + j\lambda_i$ ； S_r 和 S_i 分别为 $S_{\lambda_{s_k},ii}$ 的实部和虚部； μ 、 ν 均为中间变量。另外需注意的是，并联元件仅影响节点自导纳，串联元件影响自导纳和互导纳，于是有

$$\frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial y_p} = \mathbf{l}_k \frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial y_p} \mathbf{r}_k = S_{\lambda_{s_k},ii} \quad (33)$$

$$\frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial z_s} = \mathbf{l}_k \frac{\partial \mathbf{Y}(s_k)}{\partial z_s} \mathbf{r}_k = S_{\lambda_{s_k},ii} - S_{\lambda_{s_k},ij} - S_{\lambda_{s_k},ji} + S_{\lambda_{s_k},jj} \quad (34)$$

按式(29)一式(34)计算所得元件参数灵敏度值仅仅反映实际网络元件与关键特征值幅值的关系，但其可比性较差，无法揭示相对影响程度。如需了解各元件参数对谐振模式的相对影响程度，需进行归一化处理，其计算公式如式(35)所示。

$$\left. \frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial a} \right|_n = \frac{\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial a}}{\frac{|\lambda_{s_k}|}{a}} = \frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial a} \times \frac{a}{|\lambda_{s_k}|} \quad (35)$$

式中： $\frac{\partial |\lambda_{s_k}|}{\partial a} / |\lambda_{s_k}|$ 和 $\frac{a}{|\lambda_{s_k}|}$ 分别表示特征值和网络元件参数的相对变化，归一化后灵敏度分析变得更具有可比性。

直流馈入交流系统的振荡风险预判研究方法流程如图2所示。图中， ε 为一个接近0的实数。步骤(1)—步骤(3)首先构建直流馈入交流系统的 s 域节点导纳矩阵，步骤(4)应用实部-虚部交叉迭代法求解 s 域节点导纳矩阵行列式的零点，直到求出的 σ_k 以及 ω_k 达到精度要求后停止迭代计算^[30]。步骤(5)—步骤(8)通过求取对应矩阵零特征值的特征向量来分析系统的网络谐振模式，最后步骤(9)、(10)根据求取的归一化灵敏度模型对系统进行风险预判。

2.3 网络结构的灵敏度建模

由于交流系统的运行方式不是唯一的，因此有必要对交流系统关键网络结构变化 $N-1$ 、 $N-2$ 等不同工况下的振荡风险进行研究。设原交流系统网络的节点阻抗矩阵为 \mathbf{Z} ，支路 k 两端的节点为 m 、

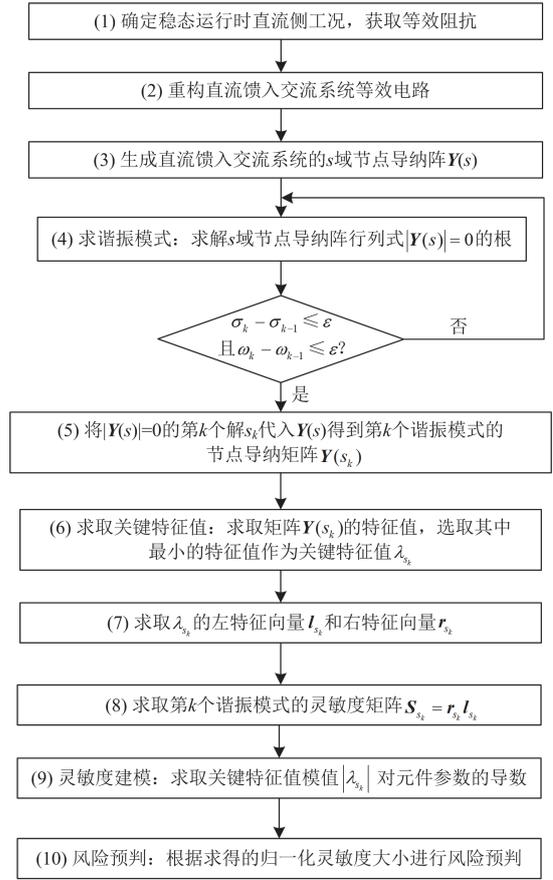


图2 直流馈入交流系统的振荡风险预判研究流程
Fig. 2 Research process of oscillation risk prediction of DC fed AC system

n ，当支路 k 增加一条电抗为 z_k 的线路时，形成新的网络，则新的节点阻抗矩阵 \mathbf{Z}' 为

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z} - \frac{\mathbf{Z} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z}^T}{z_k + \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z} \mathbf{e}_k} = \mathbf{Z} + \beta_k \mathbf{Z} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z} \quad (36)$$

其中

$$\beta_k = -1/(z_k + x_k) \quad (37)$$

$$x_k = \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z} \mathbf{e}_k = z_{mm} + z_{nn} - 2z_{mn} \quad (38)$$

$$\mathbf{e}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \quad (39)$$

式中： z_{mm} 、 z_{nn} 分别为节点 m 、 n 处的自导纳； z_{mn} 为节点 m 、 n 间的互导纳。

当网络断开支路 k 时, 令 z_k 的值为断开支路 k 的阻抗值的负值, 即可得到 $N-1$ 工况下的修正节点阻抗矩阵 \mathbf{Z}' , 于是可得到 $N-1$ 工况下修正后的系统节点导纳矩阵 \mathbf{Y}' , 随后得到修正后的 s 域节点导纳矩阵。

可得 $N-1$ 工况下振荡风险的灵敏度为

$$S_{\lambda_{s_k}, j_i} = \frac{\partial \lambda_{s_k}}{\partial Y_{ij}} = I_{s_k} \frac{\partial Y(s_k)}{\partial Y_{ij}} r_{s_k} \quad (40)$$

按 $N-1$ 的方法求取 $N-2$ 工况下的修正节点阻抗阵, 即可得 $N-2$ 工况下的 s 域节点导纳矩阵, 同理可得 $N-m$ 工况下的灵敏度模型。

3 仿真验证

3.1 关键参数振荡风险预判验证

为验证本文所提振荡风险预判研究方法的有效性, 本文基于 IEEE9 节点系统构造了含直流馈入的交流系统, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了如图 3 所示的系统仿真模型, 其中直流输电系统连接到 IEEE9 节点测试系统的 Bus 2 母线上, 内部示意图如图 4 所示。图中 R_1-R_3 、 L_1 、 L_2 、 C_1 分别为线路电阻、电感和电容, 系统工频 $f_0 = 50 \text{ Hz}$, 直流电压为 500 kV , 直流输电线路参数可根据长度、线径等参数计算得到, 如表 1 所示^[31]。稳态运行时, 通过阻抗建模法将直流系统等效为阻抗 $Z_{ac_LCC} = 12.1995 - j19.5371$ 后加入系统。

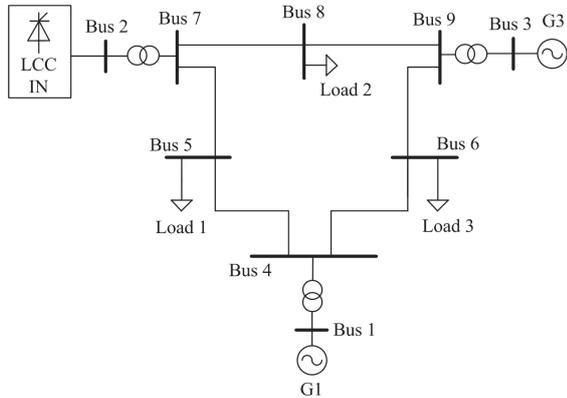


图 3 IEEE9 节点测试系统

Fig. 3 IEEE9-bus test system

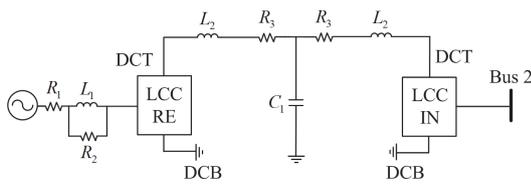


图 4 HVDC 系统

Fig. 4 HVDC system

表 1 直流侧 12 脉动 LCC 系统参数

Table 1 System parameters of 12 pulse LCC at DC side

参数	数值
R_1/Ω	3.737
L_1/H	0.151
R_2/Ω	2160.633
L_2/H	0.5968
R_3/Ω	2.5
$C_1/\mu\text{F}$	26

首先对本文建立的 s 域导纳矩阵进行验证。如图 3 所示, IEEE9 节点系统中在 1—3 母线上存在注入电流, 其余节点未与电源直接相连, 因此默认节点注入电流为 0。在 PSCAD 中对稳态电流进行傅里叶分解, 可以获取 1—3 母线注入电流的幅值与相位。由式(6)可以根据构建的系统导纳矩阵获取 1—3 母线的电流值, 获取其幅值和相角后, 与仿真得到的实际值进行对比。如图 5 所示, 根据 s 域导纳矩阵计算得到的电流与 PSCAD 仿真模型得到的电流基本一致, 验证了本文构建 s 域导纳矩阵方法的正确性。

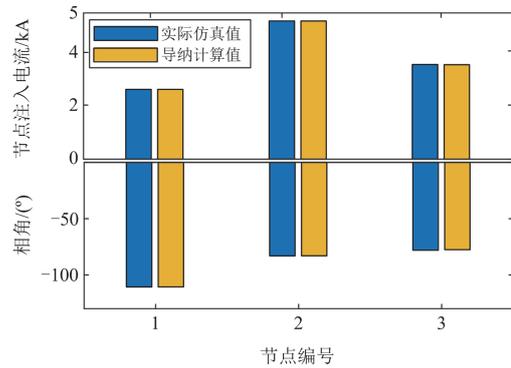


图 5 注入电流验证

Fig. 5 Injection current verification

按照本文所提方法进行谐振结构分析, 其谐振模式有 6 个, 具体谐振结构信息如表 2 所示。为验证灵敏度建模的准确性, 本文对谐振模式 1 的元件

表 2 直流侧 LCC 馈入 IEEE9 节点系统谐振模式

Table 2 Resonant mode of IEEE9-bus system fed by LCC at DC side

序号	衰减因子/ s^{-1}	谐振频率/Hz
1	0.0025	59.91
2	1.6922	61.35
3	1.7095	62.06
4	37.7850	483.59
5	27.4550	518.29
6	22.2526	692.23

参数灵敏度进行验证。节点参与因子矩阵元素的模值表示节点导纳值对该谐振模式的参与程度，能反

映该谐振模式的主要影响区域。谐振模式 1 下系统的节点参与因子矩阵元素模值如表 3 所示。

表 3 谐振模式 1 下系统的节点参与因子矩阵元素模值

Table 3 Magnitude of the elements in the node participation factor matrix of the system under resonant mode 1

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9.114×10^{-4}	9.4119×10^{-4}	7.086×10^{-4}	0.0127	0.0126	0.0126	0.0120	0.0120	0.0118	9.411×10^{-4}
2	9.411×10^{-4}	9.7178×10^{-4}	7.316×10^{-4}	0.0131	0.0130	0.0130	0.0124	0.0124	0.0122	9.717×10^{-4}
3	7.086×10^{-4}	7.3166×10^{-4}	5.508×10^{-4}	0.0099	0.0098	0.0098	0.0093	0.0093	0.0092	7.316×10^{-4}
4	0.0127	0.0131	0.0099	0.1771	0.1762	0.1754	0.1676	0.1676	0.1646	0.1754
5	0.0126	0.0131	0.0098	0.1762	0.1752	0.1745	0.1668	0.1668	0.1638	0.1745
6	0.0126	0.0130	0.0098	0.1754	0.1745	0.1737	0.1660	0.1661	0.1631	0.1737
7	0.0120	0.0124	0.0093	0.1676	0.1668	0.1660	0.1586	0.1587	0.1559	0.1660
8	0.0120	0.0124	0.0093	0.1676	0.1668	0.1661	0.1587	0.1587	0.1559	0.1661
9	0.0118	0.0122	0.0092	0.1646	0.1638	0.1631	0.1559	0.1559	0.1531	0.1631
10	9.411×10^{-4}	9.7178×10^{-4}	7.316×10^{-4}	0.0131	0.0131	0.0130	0.0124	0.0124	0.0122	9.717×10^{-4}

通过分析节点参与因子矩阵中的主要元素较大值，可以发现谐振模式 1 的主要参与节点是节点 4—9。由于电力系统一般并联元件为电容，因此通过式(32)和式(34)分别计算系统各节点并联电容参数对谐振模式 1 的灵敏度和归一化灵敏度，计算结果如表 4 所示。

表 4 谐振模式 1 下各节点并联电容灵敏度

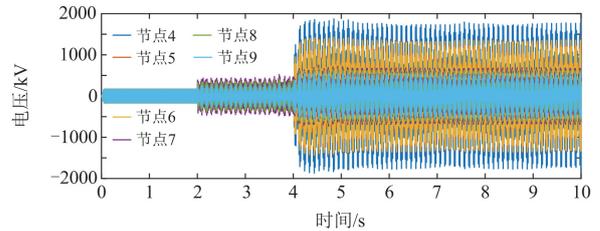
Table 4 Sensitivity of parallel capacitance of each node in resonance model

节点	灵敏度	归一化灵敏度
4	0.1460	8.1412×10^{12}
5	0.1446	8.6428×10^9
6	0.1435	9.1818×10^9
7	0.1329	6.2198×10^{12}
8	0.1331	5.9088×10^9
9	0.1287	8.5408×10^{12}

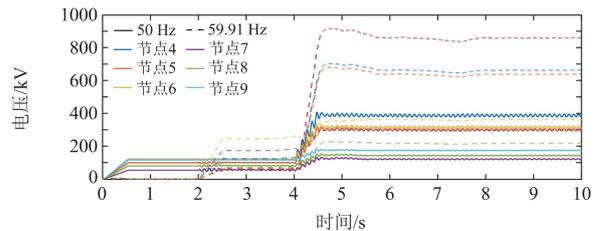
为仿真验证计算灵敏度的准确性，系统运行 2 s 时在并网点注入幅值为 50 kV、频率为 59.91 Hz 的谐波电流。仿真验证时，系统运行 4 s 时在节点处并联投入 100 μ F 的电容来模拟节点元件参数的变化。本文分别在节点 4—9 并联电容并进行仿真，所得波形如图 6—图 11 所示。各母线节点仿真波形中，上图为各母线节点电压波形，下图实线为 50 Hz 电压幅值波形、虚线为注入 59.91 Hz 谐波电流后电压幅值波形。通过观察投入电容后谐波电压的畸变程度，来衡量改变一条母线节点的并联元件参数对其他母线节点的影响。

由仿真数据得到注入 59.91 Hz 谐波且未改变母线并联参数时，节点 4—9 的谐波电压畸变率分别为：48%、125%、52%、453%、217%、61%。

在仿真运行 4 s 时，分别改变各母线并联元件参数后，母线节点 4—9 的谐波电压畸变率如表 5 所示。其中，每行表示改变该母线节点并联元件参数时，对其他母线节点的影响以谐波电压畸变率进行衡量。



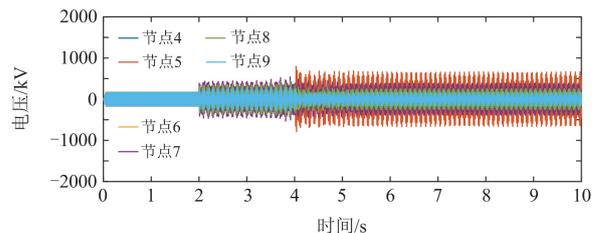
(a) 节点4—9电压波形



(b) 节点4—9谐波电压幅值波形

图 6 节点 4 并联电容仿真波形

Fig. 6 Node 4 parallel capacitance simulation waveform



(a) 节点4—9电压波形

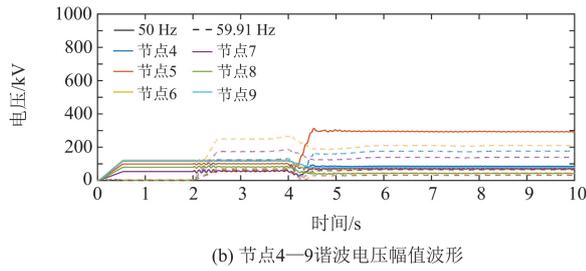


图 7 节点 5 并联电容仿真波形

Fig. 7 Node 5 parallel capacitance simulation waveform

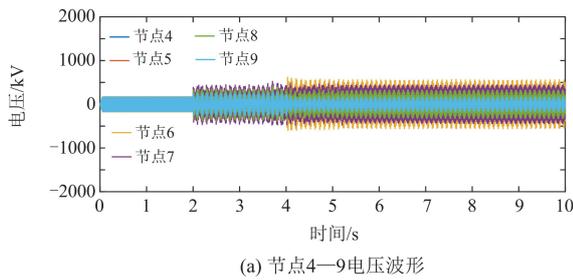


图 8 节点 6 并联电容仿真波形

Fig. 8 Node 6 parallel capacitance simulation waveform

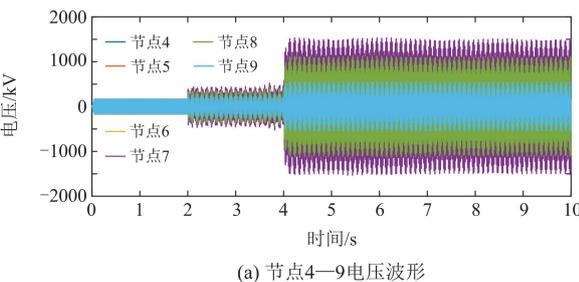


图 9 节点 7 并联电容仿真波形

Fig. 9 Node 7 parallel capacitance simulation waveform

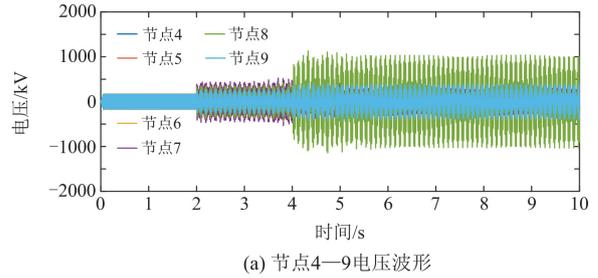


图 10 节点 8 并联电容仿真波形

Fig. 10 Node 8 parallel capacitance simulation waveform

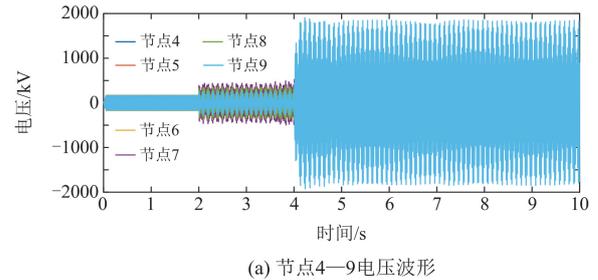
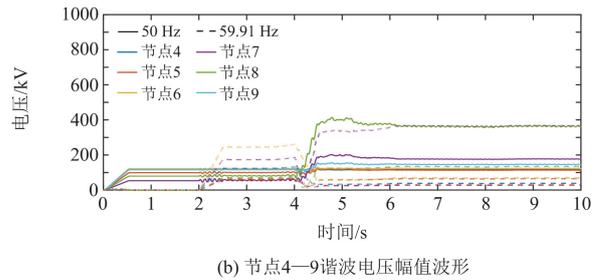


图 11 节点 9 并联电容仿真波形

Fig. 11 Node 9 parallel capacitance simulation waveform

表 5 各母线节点谐波电压畸变率

Table 5 Harmonic voltage distortion rate of each bus node

	%					
节点	4	5	6	7	8	9
4	218	217	199	296	195	123
5	75	60	46	298	336	56
6	20	136	27	734	345	68
7	160	352	175	664	510	201
8	25	34	53	39	101	93
9	150	213	221	375	328	288

改变各母线并联元件参数前后各母线谐波电压畸变率的相对变化倍数如表 6 所示, 每行表示改变该母线节点并联元件参数前后, 其他母线节点谐波电压畸变率的相对变化。

表 6 各母线节点谐波电压畸变率的相对变化倍数

Table 6 Relative change multiple of harmonic voltage distortion rate of each bus node

节点	4	5	6	7	8	9
4	4.54	1.74	3.83	0.65	0.89	2.02
5	1.56	0.48	0.88	0.66	1.55	0.92
6	0.42	1.08	0.52	1.62	1.59	1.11
7	3.33	2.82	3.37	1.47	2.35	3.30
8	0.52	0.27	1.02	0.09	0.47	1.52
9	3.13	1.70	4.25	0.83	1.51	4.72

由于工程实际误差可在 10% 之内, 按相对变化倍数大于 0.9 的值求取平均数表示各节点改变并联元件参数对谐振模式的相对影响程度, 其结果如表 7 所示。由表 7 可知, 各节点改变并联元件参数对谐振模式的相对影响程度的大小排序为: 节点 9、节点 4、节点 7、节点 6、节点 5、节点 8。仿真验证结果和表 4 计算得出的归一化灵敏度结果保持一致。

表 7 各母线节点相对影响程度

Table 7 Relative influence degree of each bus node

节点	相对影响程度
4	3.03
5	1.34
6	1.35
7	2.77
8	1.27
9	3.06

3.2 网络结构振荡风险预判验证

本节以 $N-1$ 工况为例, 进行网络结构对直流馈入的振荡风险预判验证。断开节点 4—6 间线路的 $N-1$ 工况下, 导纳矩阵中节点 4—6 的自导纳与互导纳发生变化, 生成系统新的 s 域导纳矩阵。按照 2.3 节的方法, 求解其行列式为零的根, 可以得到新的零点值, 即为断开节点 4—6 之间线路的 $N-1$ 工况下的谐振模式。可以看出系统断开节点 4—6 之间线路后, 谐振模式发生了改变, 如表 8 所示。

在断开节点 4—6 之间线路的 $N-1$ 工况下, 将谐振频率 59.91 Hz 对应的特征值代入 s 域节点导纳矩阵, 可以得到该谐振模式下的节点导纳矩阵。因为本文主要关注直流馈入并网点即节点 2 的谐振风险, 所以只需关注灵敏度矩阵第二行的元素。

为仿真验证以上分析的准确性, 系统运行 1 s 时在并网点注入幅值为 10 kV、频率为 484 Hz 的谐

波电流。仿真验证时, 系统运行 2 s 时在节点 4—6 动作断路器模拟节点 4—6 之间线路断开。图 12 为以上过程的傅里叶分解波形, 含有工频 50 Hz 和谐振频率 484 Hz 频率波形, 其中红线为系统初始状态下节点 7 的电压傅里叶分析图, 蓝线为注入 484 Hz 电流后节点 7 的电压傅里叶分析图, 绿线为动作断路器断开节点 4—6 之间线路后的节点 7 的电压傅里叶分析图。

表 8 $N-1$ 工况(断节点 4—6 之间线路)系统谐振模式变化
Table 8 Resonance mode change of the system for $N-1$ condition (broken lines 4—6)

衰减因子/ s^{-1}		谐振频率/Hz	
断线前	断线后	断线前	断线后
0.0025	0.0021	59.91	59.92
1.6922	0.5371	61.35	60.48
1.7095	1.7255	62.06	62.05
22.2526	22.2598	692.23	692.25
27.4550	27.4548	518.29	518.30
37.7850	43.2506	483.59	344.04

由图 12 可以看出, 断开节点 4—6 之间线路后, 系统在 484 Hz 的谐振模式发生改变, 节点 7 在 484 Hz 的电压幅值降低了 8 kV。由此可以得出结论, 断开节点 4—6 之间线路可以抑制系统在 484 Hz 下的谐振风险, 当系统受到雷击从而被注入 484 Hz 的电流时, 便可以通过断开节点 4—6 之间线路进而抑制该冲击电流的影响。

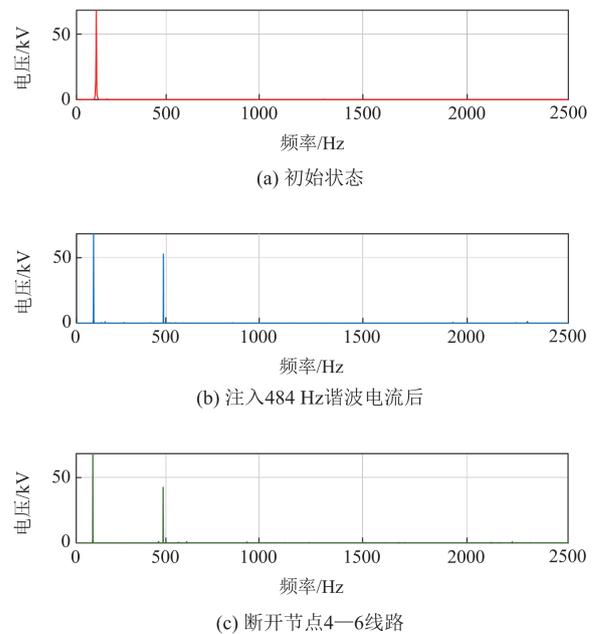


图 12 3 种状态下节点 7 电压的傅里叶分析图

Fig. 12 Fourier analysis of node 7 voltage for three states

4 结论

本文提出了一种基于 s 域节点导纳矩阵分析直流馈入交流系统的振荡风险方法, 通过建立系统元件参数和交流网络结构对振荡风险的灵敏度模型, 对振荡风险进行预判。得到结论如下:

1) 对于含直流馈入的交流系统, 可以应用 s 域导纳矩阵 $Y(s)$ 对其系统谐振稳定性进行分析。

2) 本文提出的归一化灵敏度模型相比传统的灵敏度求取, 可以更加精准地衡量单条母线的元件参数发生改变时对其他母线的影响。

3) 灵敏度越大的元件及线路, 其参数改变或结构改变对系统带来的影响越大。通过适当调整高灵敏度的元件分布, 以及断开高灵敏度的线路可以降低谐振风险的影响。

本文仅探讨了单节点直流系统馈入交流系统后的谐振风险分析方法, 而对于交流系统中多节点直流系统馈入后如何对系统谐振风险进行分析有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变侧交流故障特性分析及协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 54-64.
DENG Nan, HAO Liangliang, HE Jinghan, et al. AC fault characteristics analysis and coordinated control strategy on the inverter side of a receiving-end hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 54-64.
- [2] 王立强, 陶军, 阿敏夫, 等. 抑制新能源并网系统谐振的逆变器阻抗适配支路参数设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 74-83.
WANG Liqiang, TAO Jun, A Minfu, et al. Parameter design method for the impedance adaptation branch of an inverter to suppress resonance in new energy grid-connected systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 74-83.
- [3] 董毅峰, 王彦良, 韩佳, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2213-2231, 2532.
DONG Yifeng, WANG Yanliang, HAN Ji, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2213-2231, 2532.
- [4] 吴显, 于德硕, 刘子俊, 等. 基于调制切换的逆变器高频谐振故障穿越方法[J]. 供用电, 2024, 41(5): 96-102.
WU Xian, YU Deshuo, LIU Zijun, et al. High-frequency resonance fault ride-through for inverter based on modulation switching[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(5): 96-102.
- [5] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 1-13.
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.
- [6] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 直驱风电并网系统中锁相环引起次同步振荡的开环模式谐振机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1935-1950, 2209.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Mechanism analysis of open-loop modal resonance on subsynchronous oscillations caused by PLL in power systems with integrated PMSGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1935-1950, 2209.
- [7] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 3-9.
XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9.
- [8] LIU Hui, CHENG Yundan, XU Yanhui, et al. Localization method of subsynchronous oscillation source based on high-resolution time-frequency distribution image and CNN[J]. Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 1-13.
- [9] 蔡晖, 郭瀚临, 张文嘉, 等. 电力电子化受端省级电网宽频谐振稳定性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(增刊 1): 159-165, 207.
CAI Hui, GUO Hanlin, ZHANG Wenjia, et al. Research on broadband resonance stability of receiving-end provincial power grid with high penetration of power electronic devices[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 159-165, 207.
- [10] TAN Zhongfu, CHEN Kangting, JU Liwei, et al. Issues and solutions of China's generation resource utilization based on sustainable development[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 147-160.
- [11] 杨汾艳, 朱韬析, 丁晓兵, 等. 考虑涌流影响的直流线路 50 Hz 分量机理性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3363-3371.
YANG Fenyan, ZHU Taoksi, DING Xiaobing, et al. Research on 50 Hz component in HVDC transmission lines considering the influence of inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3363-3371.
- [12] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.
- [13] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.

- [14] 郭春义, 彭意, 徐李清, 等. 考虑延时影响的 MMC-HVDC 系统高频振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 119-126.
GUO Chunyi, PENG Yi, XU Liqing, et al. Analysis on high-frequency oscillation mechanism for MMC-HVDC system considering influence of time delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 119-126.
- [15] FAN Lingling, ZHU Chanxia, MIAO Zhixin, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [16] 申丹枫, 王冠中, 吴浩, 等. 基于全特征值轨迹多项式逼近的双馈风机并网宽频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 39-49.
SHEN Danfeng, WANG Guanzhong, WU Hao, et al. Grid-connected wide-band oscillation analysis of DFIG-based wind turbine based on polynomial approximation of all eigenvalue trajectories[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 39-49.
- [17] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑 PLL 和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.
- [18] FAN Lingling, MIAO Zhixin. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 807-809.
- [19] LÜ Jing, CAI Xu, MOLINAS M. Frequency domain stability analysis of MMC-based HVDC for wind farm integration[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 141-151.
- [20] KHAZAEI J, BEZA M, BONGIORNO M. Impedance analysis of modular multi-level converters connected to weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4015-4025.
- [21] LIU Bin, HU You, SU Wuyang, et al. Stability analysis of DFIG wind turbine connected to weak grid based on impedance modeling[C] // IEEE Power Energy Society General Meeting(PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA: 1-5.
- [22] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, WU Weimin. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [23] SEMLYEN A I. S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 132-137.
- [24] JR S G, MARTINS N, PORTELA C. Modal analysis applied to s-domain models of AC networks[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 28-February 1, 2001, Columbus, OH, USA: 1305-1310.
- [25] 邢法财. 含非同步机电源电力系统的宽频谐振问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
XING Facai. Research on broadband resonance problems of power system with non-synchronous generators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [26] 邢法财, 徐政, 王世佳. 非同步机电源接入电网后的谐振问题分析及抑制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 71-79.
XING Facai, XU Zheng, WANG Shijia. Analysis and suppression of resonance problem in power system with unconventional generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 71-79.
- [27] 徐政. 基于 s 域节点导纳矩阵的谐振稳定性分析方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 1-8.
XU Zheng. Resonance stability analysis method based on s-domain nodal admittance matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 1-8.
- [28] 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, 2010.
YANG Caixia. Application of model analysis on harmonic resonance problem and its sensitivity analysis in power system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [29] CHEN Xiang, MA Junpeng, WANG Shunliang, et al. An accurate impedance model of line commutated converter with variable commutation overlap[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 2(1): 562-572.
- [30] 徐政, 王世佳, 邢法财, 等. 电力网络的谐振稳定性分析方法研究[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 1-8.
XU Zheng, WANG Shijia, XING Facai, et al. Qualitative analysis method of electric network resonance stability[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 1-8.
- [31] 崔嘉滢, 刘天琪, 王顺亮, 等. 一种基于三端直流输电系统的架空线路谐波电流计算方法[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 37-46.
CUI Jiaying, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. A calculation method for line harmonic current based on three-terminal HVDC transmission system[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 37-46.

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-10-03

作者简介:

王顺亮(1987—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高压直流输电、电力电子、新能源并网等; E-mail: slw_scu@163.com

傅美霓(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电; E-mail: 1351697241@qq.com

马俊鹏(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电系统建模及分析、新能源并网逆变器建模及控制、微网逆变器协调控制、大功率阻抗测量装备基础理论。

(编辑 周金梅)