

引用格式:陈波,斯琪,谌艳红,等.基于广义奈奎斯特判据的新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):129-140.

Citation: CHEN Bo, SI Qi, CHEN Yanhong, et al. Identification of grid-connected units with the weakest small-signal stability in multiple renewable energy stations based on generalized Nyquist criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 129-140.

# 基于广义奈奎斯特判据的新能源多场站系统 小信号稳定薄弱并网单元辨识

陈波<sup>1,6</sup>, 斯琪<sup>2</sup>, 谌艳红<sup>3</sup>, 陶翔<sup>1,6</sup>, 王凯<sup>3</sup>,  
朱晓娟<sup>2</sup>, 吴志平<sup>4</sup>, 张永生<sup>5</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 3. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 4. 国家电投集团江西电力有限公司新能源发电分公司, 江西 南昌 330038; 5. 华能江西清洁能源有限责任公司, 江西 南昌 330038; 6. 江西省新能源与储能安全运行控制工程研究中心, 江西 南昌 330096)

**摘要:**大量新能源并网变流器接入电网极易引发小信号失稳,严重威胁系统的安全与稳定。现有的阻抗法小信号稳定性分析基于多机等效机制,仅能给出稳定性的影响因素分析,无法识别关键的稳定薄弱并网单元。该文提出一种基于广义奈奎斯特判据(generalized Nyquist criterion, GNC)的新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识方法。先基于GNC的稳定性分析思路,将多个不同控制参数的新能源场站解耦成多组单场站子系统;再构建每个子系统的稳定判据,分析各子系统的小信号稳定性;最后,依据子系统的小信号稳定性,找出稳定性最薄弱的子系统。研究表明,相较于现有方法,该方法能更准确、快速地识别小信号稳定薄弱并网单元,为系统稳定性的提升提供针对性的指导建议。

**关键词:**并网变流器;新能源多场站系统;小信号稳定;稳定薄弱并网单元;广义奈奎斯特判据

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.014 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0129-12

## Identification of grid-connected units with the weakest small-signal stability in multiple renewable energy stations based on generalized Nyquist criterion

CHEN Bo<sup>1,6</sup>, SI Qi<sup>2</sup>, CHEN Yanhong<sup>3</sup>, TAO Xiang<sup>1,6</sup>, WANG Kai<sup>3</sup>,  
ZHU Xiaojuan<sup>2</sup>, WU Zhiping<sup>4</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>5</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330077, China; 4. New Energy Power Generation Branch, State Power Investment Group Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 5. Huaneng Jiangxi Clean Energy Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 6. Jiangxi New Energy and Storage Safety Operation Control Engineering Research Center, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The integration of a large number of renewable energy grid-connected converters into the power grid can easily trigger small-signal instability, posing a serious threat to the safety and stability of the system. The existing small-signal stability analysis using the impedance method, based on a multi-machine equivalent mechanism, can only provide an analysis of the factors influencing stability and cannot identify the key weak grid-connected units that affect stability. This paper proposes a method for identifying small-signal stability weak grid-connected units in a renewable energy multi-site system based on the generalized Nyquist criterion (GNC). Firstly, based on the stability analysis approach of GNC, multiple renewable energy sites with different control parameters are decoupled into multiple single-

收稿日期:2023-09-21;修回日期:2024-03-19

基金项目:国网江西省电力有限公司科技项目(521820220006)

通信作者:斯琪(1999—),女,硕士研究生,主要从事新能源并网稳定性分析等方面的研究;E-mail:s2018112358@my.swjtu.edu.cn

site subsystems. Then, a stability criterion is constructed for each subsystem to analyze the small-signal stability of each subsystem. Finally, the subsystem with the weakest stability is identified based on the small-signal stability of each subsystem. The research results show that, compared with existing methods, this method can more accurately and quickly identify small-signal stability weak grid-connected units, providing targeted guidance and suggestions for improving system stability

**Key words:** grid-connected converter; multiple renewable energy stations system; small-signal stability; grid-connected units with small-signal stability weakest; generalized Nyquist criterion

在“双碳”背景下,越来越多的风电、光伏等新能源通过并网变流器接入电力系统。但并网变流器的宽频动态特性导致其易与电网交互,引发系统小信号失稳<sup>[1-3]</sup>。尤其在新能源多场站系统中,网源交互更剧烈,潜在失稳因素更多,这些增加了系统的不稳定风险<sup>[4-5]</sup>。对新能源多场站系统进行准确的小信号稳定性分析,并在数量众多的并网单元中辨识出小信号稳定薄弱并网单元,是提升系统小信号稳定性的基础和关键。

现有变流器并网系统小信号稳定性分析方法主要分为时域仿真分析方法、短路比法、特征值分析法和阻抗分析法<sup>[6]</sup>。时域仿真分析法可通过实验的方式辨识系统中的稳定薄弱并网单元。对于多台新能源发电系统,该方法要求多台电磁暂态模型同时进行仿真,对仿真软件的运算速度要求较高<sup>[7]</sup>;且该方法不适用于小信号稳定性机理的分析,更适合对理论分析结果的验证<sup>[8]</sup>。短路比法<sup>[9]</sup>主要用于度量交流系统电网强度。但现有短路比的研究大多针对的是单变流器并网系统的小信号稳定性问题,这些研究成果不适用于多变流器并网系统。特征值分析法通过建立变流器并网系统的状态空间模型,利用特征值分解,得到系统的特征值、特征向量,从中获取丰富的系统振荡模式信息,并通过定义参与因子,揭示状态变量的动态贡献,定位系统不稳定的源,该方法可提高系统稳定性<sup>[10]</sup>。但随着新能源多场站系统中变流器数量的增加,系统的状态空间矩阵的阶数增长到百级以上,这会造成维数灾难<sup>[8]</sup>,导致算法不能及时、准确地辨识系统中的稳定薄弱并网单元。

阻抗分析法因其模块化和可扩展性优势逐渐在并网系统中得到了广泛应用。阻抗分析方法通过分析变流器子系统(变流器)和电网子系统(网络阻抗和无穷大电网)等效阻抗的比值来判断并网系统的稳定性<sup>[11]</sup>。新能源多场站系统的不同场站间的并网变流器控制参数存在差异,且传输线路复杂,这使得传统的单变流器并网系统小信号稳定性分析方法(如奈奎斯特判据<sup>[12]</sup>)不再适用。现有的

多变流器并网系统小信号稳定性分析方法主要分为基于广义奈奎斯特判据(generalized nyquist criterion, GNC)的稳定性分析方法<sup>[13]</sup>和基于GNC改进的稳定性分析方法<sup>[14-15]</sup>两类。文献[13]提出了基于GNC的多变流器并网系统稳定性分析方法,该方法通过分析系统阻抗比矩阵特征值的奈奎斯特曲线来判断系统的稳定性,但随着多变流器并网系统阻抗矩阵阶数的增加,GNC中特征值解析难度也会随之增加。文献[14]、[16-17]都对GNC进行了改进,提出了基于范数判据、盖尔圆盘定理的稳定性分析方法。这些方法不必求解出多变流器并网系统具体的特征值,方法简单,但判据的保守性可能会造成误判,即可能存在将稳定系统判定为不稳定的情况。文献[15-18]提出了小环路分析法,将多变流器并网系统等效的开环传递函数矩阵分解成多个单输入、单输出的小环路传递函数模型,用传统的奈奎斯特方法分析每个小环路的稳定性,降低了多变流器并网系统稳定性分析的复杂度。

目前,采用阻抗分析法的新能源多场站系统小信号稳定性分析通常难以针对性地提出指导系统稳定性提升的建议。其原因在于:这些采用阻抗分析法的新能源多场站系统稳定性分析通常基于多机等效<sup>[19-20]</sup>,其仅能给出系统稳定性的判定结果,但不能辨识诱发系统振荡的稳定薄弱并网单元,对新能源多场站系统稳定性提升也缺乏理论指导。因此,本文基于GNC,提出一种新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识方法,将新能源多场站系统解耦成多个单场站子系统,将新能源多场站系统的稳定性分析问题转化为稳定薄弱并网单元(稳定性最差子系统)的稳定性分析问题。该法可为后续系统的稳定性提升奠定基础。

为实现新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识,本文构建了新能源多场站系统的小信号阻抗比模型,运用GNC分析新能源多场站系统的稳定性,在系统不稳定或稳定裕度不足的情况下,将新能源多场站系统解耦成多个单场站子系统,并通过类比新能源多场站系统的GNC,构建每

个子系统的 GNC,分析各子系统的小信号稳定薄弱程度。其中,稳定性最薄弱的子系统会被认定为稳定薄弱并网单元。

### 1 新能源多场站系统阻抗比模型

为分析新能源多场站系统的小信号稳定性,本文以图 1 所示的  $n$  场站系统为例进行推导。在图 1 中,风电或光伏等新能源通过变流器实现并网。先建立  $dq$  坐标系下变流器子系统和电网子系统的阻抗模型,再根据两个子系统之间端口的电压与电流的关系推导整个新能源多场站系统的阻抗比模型。

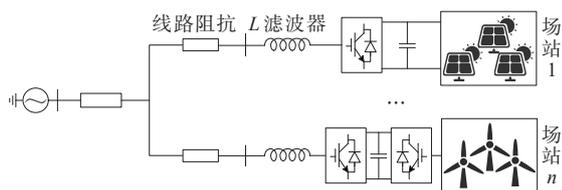


图 1 新能源多场站系统典型拓扑

Figure 1 Typical topology of the multiple renewable energy stations

对图 1 中的新能源多场站系统进行等效变换,根据系统端口电压电流的特性,将并网变流器用诺顿电路进行等效变换,传输线路可用 RLC 线路等值表示<sup>[13]</sup>,如图 2 所示。同一个场站中的并网变流器控制参数和设备容量,与以设备自身容量为基准的主电路参数相同。因此,一个场站中的并网变流器可聚合成同一个变流器<sup>[21]</sup>。在图 2 中, $Z_0$  表示为并网点到电网的线路阻抗矩阵, $Z_i$  表示为第  $i$  个场站到并网点的馈线阻抗矩阵, $U_g$  是电网电压的小信号扰动向量, $I_i, U_i (i=1, 2, \dots, n)$  分别为场站  $i$  中并网变流器端口电流、电压的小信号扰动向量, $I, U$  分别为变流器子系统端口输出电流向量和端口电压向量, $I_{si}, Y_i (i=1, 2, \dots, n)$  分别为并网变流器中等效的电流源矩阵和导纳模型矩阵<sup>[22]</sup>。

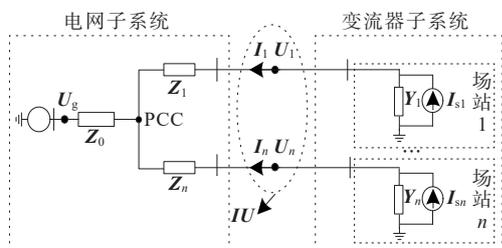


图 2 新能源多场站系统等效拓扑

Figure 2 Equivalent topology of the multiple renewable energy stations

变流器子系统和电网子系统的阻抗表达式的推导过程如下。

变流器子系统中任一场站  $i$  中并网变流器可等效为双输入双输出的诺顿电路:

$$I_i = I_{si} - Y_i U_i \tag{1}$$

因此,变流器子系统中  $I$  与  $U$  的关系式为

$$I = I_s - YU \tag{2}$$

式中, $I_s, Y$  分别为变流器子系统的等效电流源向量、等效导纳向量, $I = [I_1, \dots, I_n]^T, I_s = [I_{s1}, \dots, I_{sn}]^T, Y = \text{diag}(Y_1, \dots, Y_n), U = [U_1, \dots, U_n]^T$ 。

在电网子系统中,端口电压向量  $U$ 、电流向量  $I$  的关系之间的关系式为

$$U = Z_L I + U_g \tag{3}$$

式中, $Z_L$  是网络阻抗矩阵。

在实际工程中,新能源多场站系统的传输网络可等价转换为树状结构<sup>[23-24]</sup>。因此,传输网络的阻抗模型<sup>[25]</sup>(即电网子系统的阻抗模型)可表示为

$$Z_{L,jk} = \sum Z_1, \sum Z_1 \in M_j \cap M_k \tag{4}$$

式中, $M_j, M_k$  分别为第  $j, k$  个场站到电网的路径; $Z_{L,jk}$  为支路  $j, k$  之间的阻抗矩阵,其是一个  $2 \times 2$  阶矩阵; $\sum Z_1$  表示路径  $M_j$  与路径  $M_k$  所共有的支路阻抗。

由式(2)~(3),可推导出  $I$  的表达式,即

$$I = \frac{E_{2n}}{E_{2n} + YZ_L} I_s - \frac{Y}{E_{2n} + YZ_L} U_g \tag{5}$$

式中, $E_{2n}$  是  $2n \times 2n$  阶的单位矩阵。

定义新能源多场站系统的阻抗比  $L$ :

$$L = YZ_L \tag{6}$$

新能源多场站系统的小信号稳定性可进一步通过 GNC 进行判断分析。

### 2 新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识

本节先基于 GNC,将新能源多场站系统解耦成等效的单场站子系统,再通过分析子系统的小信号稳定性,辨识出小信号稳定性最差的子系统,该子系统即为系统中的稳定性薄弱并网单元。

#### 2.1 新能源多场站系统稳定性判据

根据式(5)、(6),构建新能源多场站系统的闭环传递函数:

$$T_F = E_{2n} / (E_{2n} + L) \tag{7}$$

为判断新能源多场站系统的小信号稳定性,定义  $T_F$  的分母项  $F$  为系统的回差矩阵:

$$F = E_{2n} + L \tag{8}$$

根据系统回差矩阵,新能源多场站系统的小信号稳定性可用基于行列式的GNC判断<sup>[26]</sup>:

$$P(T_F) = P(L) - N_{(0,0)}(\det(F)) \quad (9)$$

式中, $P$ 表示右半平面(right half plane,RHP)极点数; $N_{(0,0)}$ 表示奈奎斯特曲线在复平面上逆时针环绕(0,0)点的圈数与其顺时针环绕(0,0)点的圈数的差值。

在分析并网变流器与非理想电网的交互作用时,假设变流器和电网单独运行时均处于稳定状态,变流器导纳 $Y$ 和树状传输网络阻抗 $Z_L$ 均不存在RHP极点<sup>[13]</sup>。 $L$ 的极点与 $Y$ 、 $Z_L$ 的极点相同,故 $L$ 也不存在RHP极点,即 $P(L)=0$ 。因此,GNC可简化:若新能源多场站系统回差矩阵行列式 $\det(F)$ 的奈奎斯特曲线在复平面上按逆时针方向环绕(0,0)点的圈数减去其按顺时针方向环绕(0,0)点的圈数后的结果等于零,则系统处于稳定状态。

虽然该方法可将新能源多场站系统中的并网变流器看作统一的变流器子系统,分析系统整体的小信号稳定性,但其无法辨识系统中稳定薄弱并网单元,难以快速、有效地提升系统的稳定性。因此,进一步提出一种基于新能源多场站系统解耦的稳定薄弱并网单元辨识方法,为系统稳定性提升提供理论基础。

## 2.2 新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识

由式(4)可知,传输网络阻抗矩阵 $Z_L$ 中的元素 $Z_{L,jk}$ 为支路 $j,k$ 路径上共有的支路阻抗之和。文献[25]指出 $Z_L$ 对角阻抗元素的模值最大,故其成为阻抗矩阵对新能源多场站系统稳定性的主导影响因素。因此,忽略非对角元素阻抗的影响, $Z_L$ 可近似为

$$Z_L \approx \begin{bmatrix} Z_1 + Z_0 & & \\ & \ddots & \\ & & Z_n + Z_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(2)可知,多场站阻抗矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 & & \\ & \ddots & \\ & & Y_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此,由式(6)可知,新能源多场站系统阻抗比可近似为

$$L = YZ_L \approx \begin{bmatrix} Y_1 Z_{L,11} & & \\ & \ddots & \\ & & Y_n Z_{L,nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $L$ 是对角矩阵; $E_{2n}$ 是对角矩阵。因此, $E_{2n} + L$ 亦是对角矩阵。对角矩阵的行列式为主对角线上的各元素的乘积,即

$$\det(F) = \det(E_{2n} + L) = \underbrace{\det(E_2 + L_1)}_{\det(F_1)} \cdots \underbrace{\det(E_2 + L_n)}_{\det(F_n)} \quad (13)$$

式中, $E_2$ 为二阶单位矩阵; $F_i$ 为第 $i$ 个单场站子系统的回差矩阵; $L_i$ 为第 $i$ 个场站单独接入电网时系统的阻抗比,是一个 $2 \times 2$ 阶矩阵,即

$$L_i = \begin{bmatrix} L_{2i-1,2i-1} & L_{2i-1,2i} \\ L_{2i,2i-1} & L_{2i,2i} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中, $L$ 的下标表示该元素在矩阵 $L$ 中的行、列位置。

对比式(14)的左、右两边,不难发现新能源多场站系统回差矩阵行列式中的每个因式与单场站子系统回差矩阵的行列式相同。因此,新能源多场站系统回差矩阵的行列式可以看作 $n$ 个单场站子系统回差矩阵行列式的乘积。

新能源多场站系统的特性可通过 $F$ 的特征值表示<sup>[26]</sup>,其特征值的求解表达式为

$$\det(\lambda E_{2n} - F) = 0 = \det(\lambda_i E_2 - F_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中, $\lambda$ 为新能源多场站系统的特征值; $\lambda_i$ 为等效后第 $i$ 个单场站子系统的特征值。

比较式(14)的左、右两边,不难发现在新能源多场站系统 $F$ 特征值求解中,每个因式和单场站子系统 $F_i$ 特征值求解表达式完全相同。因此,新能源多场站系统回差矩阵的特征值和解耦后多个单场站子系统回差矩阵的特征值相同。新能源场站系统的特性可通过 $F$ 的特征值表示,所以图1中含 $n$ 个场站的系统可以解耦成图3中 $n$ 个完全独立的单场站子系统,并 $S_i$ 来表示所定义等效的第 $i$ 个场站子系统。

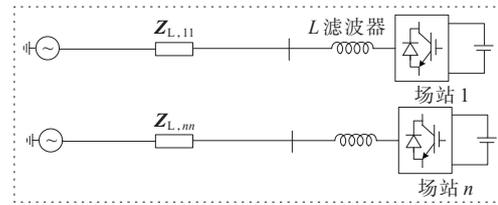


图3 新能源多场站系统解耦示意

Figure 3 Decoupling schematic diagram of multiple renewable energy stations

类比式(8),可得单个场站子系统的小信号稳定性判据,并基于GNC可判断其稳定性,即

$$P(T_{Fi}) = P(L_i) - N_{(0,0)}(\det(F_i)), i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中, $T_{Fi}$ 为等效的第 $i$ 个场站单独接入系统时的闭环传递函数。其中, $T_{Fi} = F_{ii}^-$ ,  $F_i = E_2 + L_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

基于  $\det(F)$ , 现有文献[27]提出一种更直接的方法计算包围复平面上  $(0,0)$  点的圈数的方法:  $(0,0)$  点周围顺时针环绕的净圈数由  $\det(F)$  在频率  $f \rightarrow +\infty$  的最终相位反映。如果  $\angle \det(F)|_{f \rightarrow +\infty} = 0^\circ$ , 则新能源多场站系统稳定; 如果  $\angle \det(F)|_{f \rightarrow +\infty} = -180^\circ \times m (m > 0)$ , 则系统包含  $m$  个 RHP 极点, 新能源多场站系统不稳定。综上所述, 式(8)中  $-N_{(0,0)}(\det(F))$  的计算式可表达为

$$-N_{(0,0)}(\det(F)) = \frac{\angle \det(F)|_{f \rightarrow +\infty}}{-180^\circ} \quad (16)$$

由式(13)可知,  $\det(F)$  的相位角为  $\det(F_{i=1,2,\dots,n})$  的相位之和, 故可以得到下述定理。

**定理** 设  $A$  为  $2n$  阶矩阵,  $A_i$  为子矩阵,  $\det(A)$  的相位角为  $\theta$ ,  $\det(A_i)$  的相位角为  $\theta_i, i=1, 2, \dots, n$ 。若  $\det(A) = \sum \det(A_{i=1,2,\dots,n})$ , 则  $\theta = \sum \theta_{i=1,2,\dots,n}$ 。

**证明** 相位角可用复数的指数形式表示, 则  $\angle \det(A) = e^{j\theta}, \angle \det(A_i) = e^{j\theta_i}$ 。根据指数的运算规则可知:

$$\begin{aligned} \angle \det(A) &= e^{j\theta} = e^{j\theta_1} \times e^{j\theta_2} \dots \times e^{j\theta_n} = e^{j(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)} \\ \theta &= \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n \end{aligned} \quad (17)$$

**证毕。**

$\det(F)$  相位角的递减是由于  $\det(F_i)$  引起的。因此, 引起系统不稳定的并网单元即为第  $i$  个场站。定义行列式  $\det(F)$  距离复平面上  $(0,0)$  的距离为稳定裕度<sup>[28]</sup>。在分析引起系统振荡的并网单元中, 距离  $(0,0)$  点最远的子系统(稳定性最差的子系统)为稳定薄弱并网单元。此时, 新能源多场站系统小信号稳定条件是  $n$  个等效子系统都必须均处于稳定状态, 且系统的稳定性取决于等效子系统中稳定性最薄弱的并网单元, 该流程如图 4 所示。

综上所述, 新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识的具体步骤如下。

1) 构建新能源多场站系统的阻抗比模型。利用 GNC 判断新能源多场站系统的稳定性: 若系统不稳定或稳定裕度不满足要求, 则将系统解耦成多个单场站子系统  $S_i$ ; 否则, 流程结束。

2) 利用 GNC 分别判断  $S_i$  的稳定性。其中, 子系统的奈奎斯特曲线复平面上包围  $(0,0)$  点并且距离  $(0,0)$  点越远的单元就是系统中的稳定薄弱并网单元。

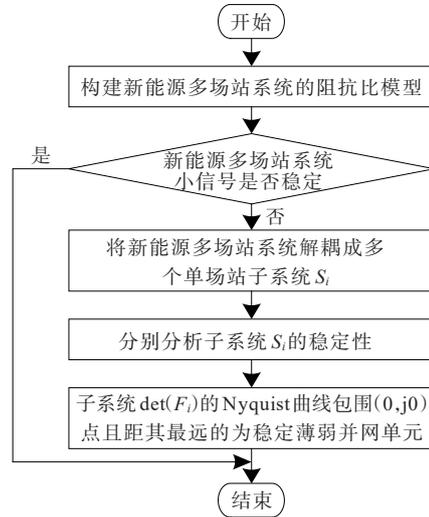


图 4 小信号稳定薄弱并网单元辨识流程

Figure 4 Identification flowchart of grid-connected units with the weakest small-signal stability

### 3 算例分析

#### 3.1 案例 1: 3 场站系统

##### 3.1.1 系统描述

为验证新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识方法的有效性, 针对 3 场站系统拓扑进行案例分析, 突出并网变流器部分, 并将一个场站中所有的并网变流器聚合成一个并网变流器, 如图 5 所示。

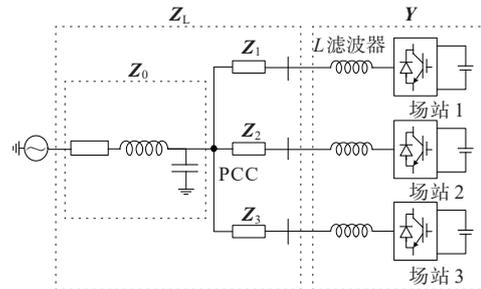


图 5 3 场站系统拓扑示意

Figure 5 Topology of three renewable energy stations

差异化设置新能源多场站系统中并网变流器的控制参数来体现不同场站之间的差异性, 场站中并网变流器的线路参数和控制参数分别见表 1、2。

表 1 3 场站系统线路参数

Table 1 Control parameters of grid-connected converters in the system with three stations

变量符号	描述	数值及单位
$r_0, l_0, c_0$	电网线路阻抗	0.2 mΩ, 0.02 mH, 3.6 mF
$r_1, l_1$	场站 1 馈线阻抗	1.0 mΩ, 0.2 mH
$r_2, l_2$	场站 2 馈线阻抗	2.0 mΩ, 0.2 mH
$r_3, l_3$	场站 3 馈线阻抗	1.5 mΩ, 0.2 mH

表2 3个场站系统中并网变流器控制参数

Table 2 Parameters of transmission lines in the system with three stations

场站编号	变量符号	描述	数值及单位
1	$L_1$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip1}, K_{ii1}$	电流环比例、积分参数	10、1
	$K_{pll1}, K_{pli1}$	锁相环比例、积分参数	20、20
2	$L_2$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip2}, K_{ii2}$	电流环比例、积分参数	14、1
	$K_{pll2}, K_{pli2}$	锁相环比例、积分参数	0.5、20.0
3	$L_3$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip3}, K_{ii3}$	电流环比例、积分参数	10、1
	$K_{pll3}, K_{pli3}$	锁相环比例、积分参数	0.4、20.0

### 3.1.2 解耦验证

根据式(11)、(19),绘制3场站系统的阻抗比 $L$ 与解耦等效后的单场站子系统的阻抗比 $L_{i(i=1,2,3)}$ 的特征值的奈奎斯特曲线,结果如图6所示。在奈奎斯特曲线中,未包围 $(-1,0)$ 点的特征值不会导致系统小信号失稳,故图6中仅展示了包围 $(-1,0)$ 点特征值的奈奎斯特曲线。

图6给出了新能源多场站系统和等效的单场站子系统的特征值奈奎斯特曲线。从图6中可看出,该3场站系统和解耦的单场站子系统的特征值奈奎斯特曲线具有较高的重合度。特征值曲线与单位圆的交点表示系统的振荡频率,且离 $(-1,0)$ 点更近的交点对系统的稳定性影响更大<sup>[29]</sup>。从图6中还可以看出,原始3场站系统和解耦后单场站子系统计算得到的振荡频率分别为771.0、773.9 Hz,两者的计算结果相近。从这些分析结果可知,解耦后的单场站子系统可替代3场站系统来进行系统稳定性分析。

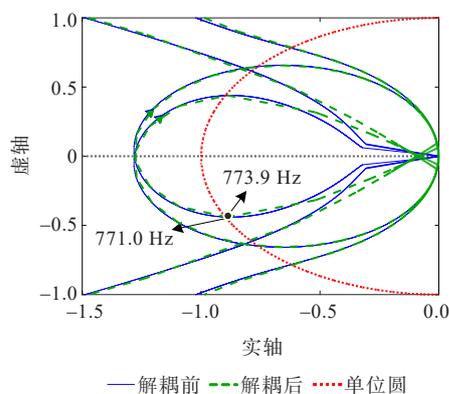
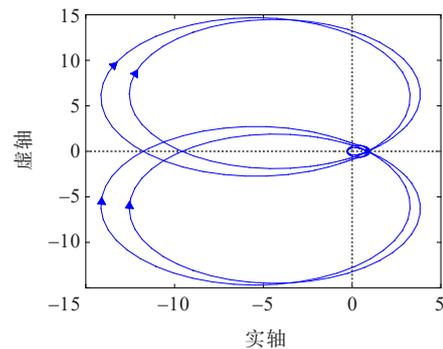


图6 3场站系统特征值奈奎斯特曲线对比

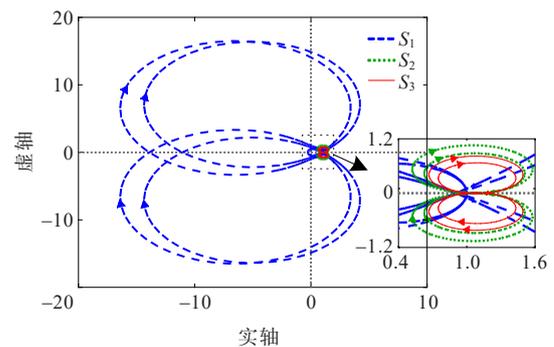
Figure 6 Comparison of Nyquist curves for eigenvalues in the system with three stations

### 3.1.3 小信号稳定薄弱并网单元辨识

依据图4,对新能源多场站系统进行小信号稳定薄弱并网单元辨识,绘制图7。其中,图7(a)给出了在表1、2参数下的3场站系统 $\det(F)$ 的奈奎斯特曲线。从图7(a)中看出,系统的奈奎斯特曲线包围 $(0,0)$ 点,这表明该系统不稳定。图7(b)给出了等效后单场站子系统 $S_i \det(F_i)$ 的奈奎斯特曲线。从图7(b)中看出, $S_1$ 的奈奎斯特曲线包围 $(0,0)$ 点, $S_2$ 、 $S_3$ 的奈奎斯特曲线不包围 $(0,0)$ 点,这说明场站1为3场站系统中的稳定薄弱并网单元。



(a) 3场站系统的奈奎斯特曲线



(b) 单场站子系统的奈奎斯特曲线

图7 3场站系统中小信号稳定薄弱并网单元辨识

Figure 7 Identification of grid-connected units with the weakest small-signal stability in the system with three stations

新能源场站中并网变流器锁相环的控制带宽通常只有几赫兹到几十赫兹,电流环的控制带宽为几百赫兹<sup>[30]</sup>。从图6中可看出,该新能源多场站系统的振荡频率为771.0 Hz。这说明系统的振荡是由场站中并网变流器的电流环控制参数不匹配造成的。因此,后续分析将忽略锁相环控制参数,仅考虑电流环控制参数对系统稳定性的影响。

为验证场站1为该3场站系统中的稳定薄弱并网单元,采用GNC分析不同场站中电流环参数的变化对系统奈奎斯特曲线的影响程度。当对系统稳定性影响更大的场站的电流环参数发生变化时,

系统的奈奎斯特曲线变化将更明显。图 8 给出了不同场站在不同电流环控制参数下该 3 场站系统的奈奎斯特曲线。从图 8 中可看出,在相同变化程度的电流环控制参数下,当场站 1 电流环比例参数发生变化时,系统的奈奎斯特曲线变化最明显;而场站 1 电流环积分参数和场站 2、3 电流环比例、积分参数变化时,系统的奈奎斯特曲线几乎不变。这说明场站 1 对系统的稳定性影响最大,该场站为小信号稳定薄弱并网单元。该辨识结果与图 7 稳定薄弱并网单元辨识结果一致。基于这些分析,不难发现:场站 1 是新能源多场站系统的小信号稳定薄弱并网单元。

在识别出稳定薄弱并网单元为场站 1 的基础上进行关键控制参数辨识,如图 9 所示。从图 9 中可看出,在相同变化程度的电流环控制参数下,相比于积分参数,比例参数发生变化时的  $S_1$  的奈奎斯特曲线变化更明显,比例参数对  $S_1$  的稳定性影响更大。场站 1 的比例参数为关键控制参数,且随着场站 1 电流环比例参数的减小,  $S_1$  的奈奎斯特曲线越来越靠近  $(0,0)$  点。这表明  $S_1$  的稳定性在提高。因此,场站 1 电流环比例参数的修正方向是减小的。

为使新能源多场站系统能快速稳定下来,需优化新能源多场站系统中稳定薄弱并网单元的电流环控制参数,即减小该试验中场站 1 的电流环比例

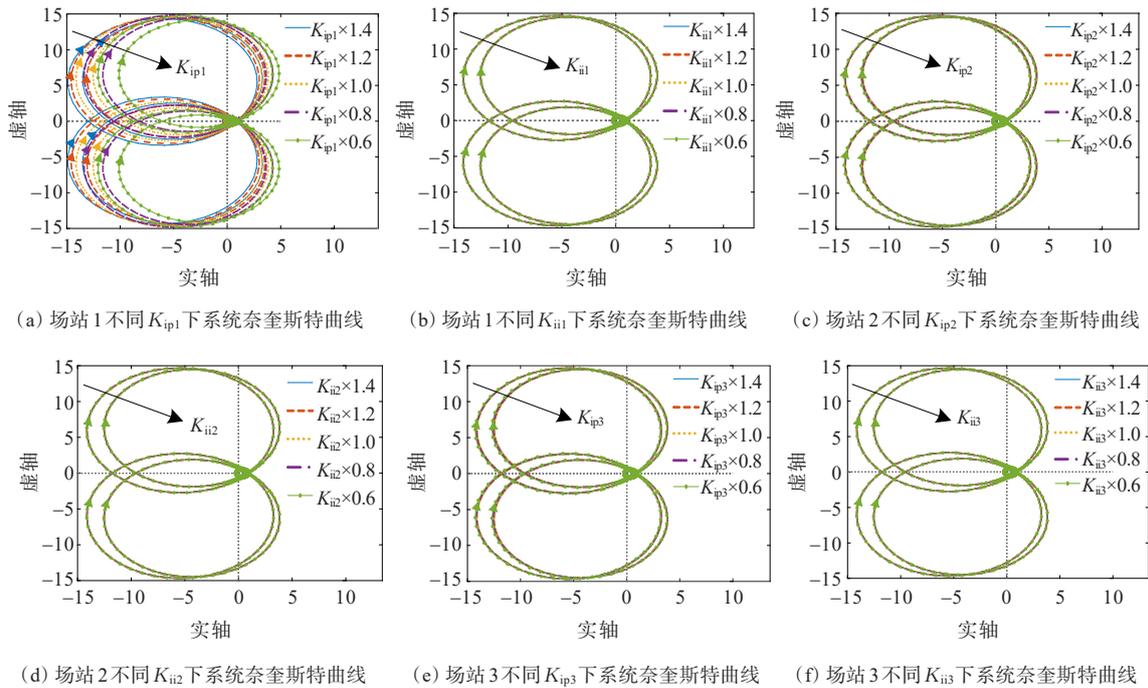


图 8 不同电流环比例、积分参数下 3 场站系统的奈奎斯特曲线

Figure 8 Nyquist curves of the system with three stations under different proportional and integral parameters of current control loop

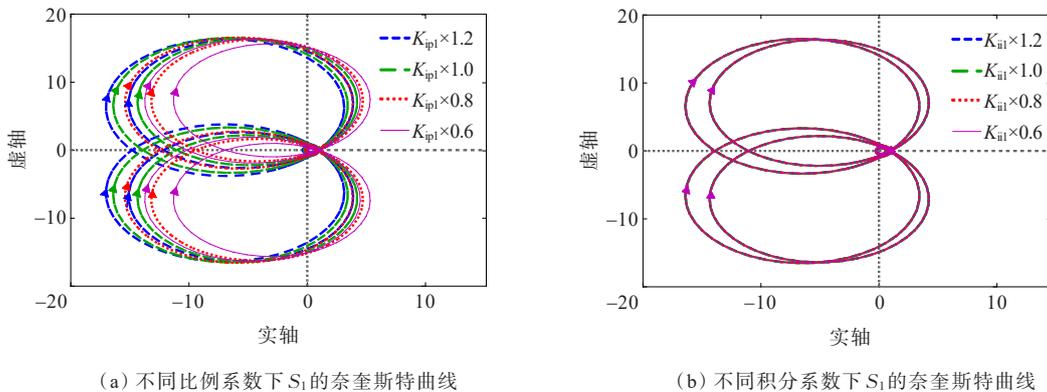
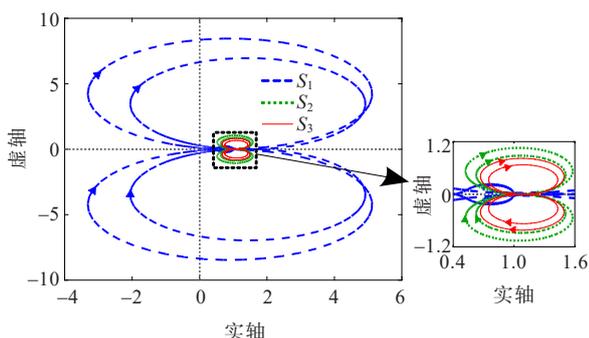


图 9 场站 1 不同电流环控制参数下  $S_1$  的奈奎斯特曲线

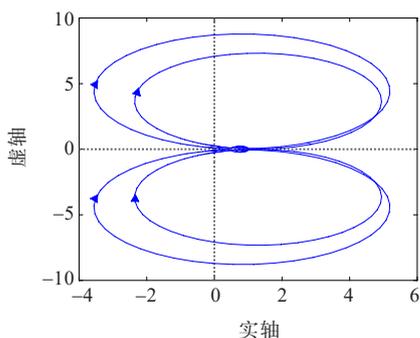
Figure 9 Nyquist curves of  $S_1$  under different proportional and integral parameters of current control loop

参数。图10给出了场站1的电流环比例参数 $K_{ip1}$ 减小时的新能源多场站系统的奈奎斯特曲线。分析图10(a)可知, $S_1$ 的奈奎斯特曲线不包围(0,0)点,这表明 $S_1$ 稳定性得到了提升,此时所有子系统均处于稳定状态。这时对应的3场站系统的奈奎斯特曲线如图10(b)所示。在图10(b)中,奈奎斯特曲线未包围(0,0)点,表明该系统处于稳定状态。

综上所述,该理论证明该方法可有效地辨识新能源多场站系统中小信号稳定性最薄弱的并网单元,提升新能源多场站系统的稳定性。



(a) 等效单场站子系统的奈奎斯特曲线



(b) 3场站系统的Nyquist曲线

图10 参数优化后的Nyquist曲线图(3场站系统)

Figure 10 Nyquist curves of the system with three stations after parameters optimization

### 3.1.4 仿真验证

为验证该理论分析的正确性,本研究在MATLAB/Simulink仿真平台中按照表1、2的参数,搭建了新能源多场站系统的仿真模型,并进行了仿真验证。图11给出了该3场站系统并网点电压波形。

从图11中可看出,在1.15 s前,系统处于振荡状态。在1.15 s时刻,场站1的电流环比例参数调整为1.5,系统恢复稳定。这表明减小场站1的电流环比例参数可提高系统的小信号稳定性。进一步地,图12、13分别给出了场站2、3的电流环控制参数变化与并网点电压波形。在场站2、3的电流环比例参数及积分参数调整过程中,并网点电压振荡模

态保持不变。这表明调整场站2、3的电流环控制参数对系统小信号稳定性没有明显影响。

图11~13的仿真结果与图7、10中的理论分析结果基本一致。该3场站系统小信号稳定薄弱并网单元为场站1,且该系统的稳定性提升方式为减小

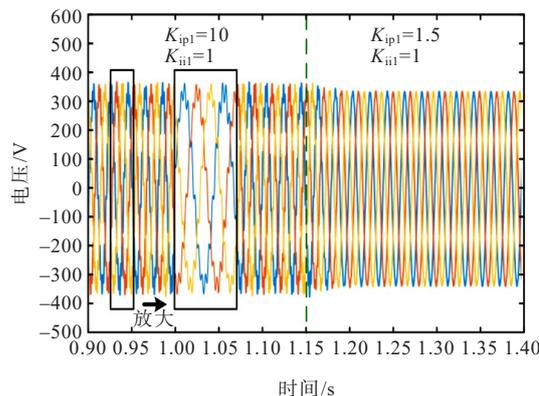


图11 修改场站1电流环参数后并网点电压波形

Figure 11 Waveforms of PCC voltage after modifying current loop parameters of station 1

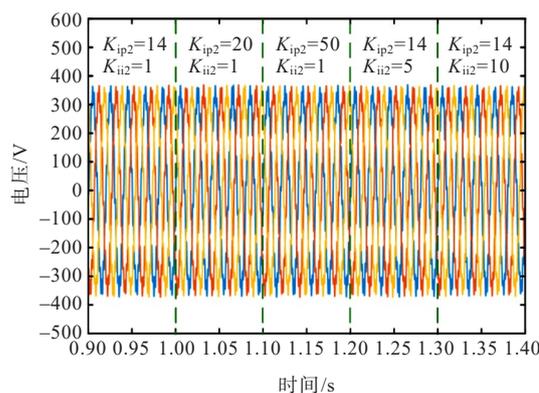


图12 修改场站2电流环参数后并网点电压波形

Figure 12 Waveforms of PCC voltage after modifying current loop parameters of station 2

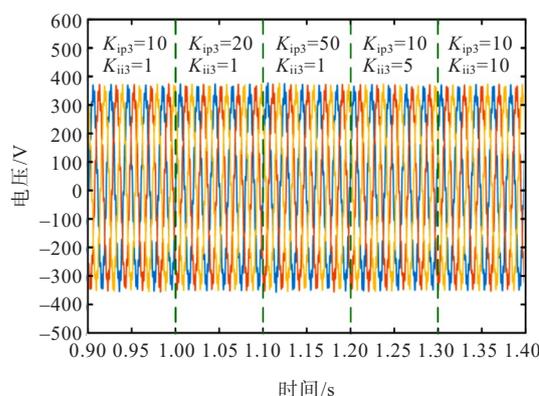


图13 修改场站3电流环参数后并网点电压波形

Figure 13 Waveforms of PCC voltage after modifying current loop parameters of station 3

其电流环比例参数。

### 3.2 案例 2:6 场站系统

#### 3.2.1 系统描述

为进一步验证新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识方法的有效性和正确性,针对 6 场站系统进行案例分析。在该 6 场站系统中,场站 1、2、3 的变流器参数和线路参数和案例 1 中的相同,新增加的场站 4、5、6 的变流器参数和线路参数分别见表 3、4。

表 3 新增场站系统新增并网变流器控制参数

Table 3 Control parameters of added grid-connected converters in the system with six stations

场站编号	变量符号	描述	数值及单位
4	$L_4$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip4}, K_{ii4}$	电流环比例、积分参数	10、1
	$K_{pll4}, K_{plli4}$	锁相环比例、积分参数	0.5、20.0
5	$L_5$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip5}, K_{ii5}$	电流环比例、积分参数	9、1
	$K_{pll5}, K_{plli5}$	锁相环比例、积分参数	0.8、20.0
6	$L_6$	滤波电感	1 mH
	$K_{ip6}, K_{ii6}$	电流环比例、积分参数	8、1
	$K_{pll6}, K_{plli6}$	锁相环比例、积分参数	1、20

表 4 6 场站系统新增线路参数

Table 4 Parameters of added transmission lines in the system with six stations

变量符号	描述	数值及单位
$r_4, l_4$	场站 4 馈线阻抗	1.0 mΩ、0.2 mH
$r_5, l_5$	场站 5 馈线阻抗	2.0 mΩ、0.2 mH
$r_6, l_6$	场站 6 馈线阻抗	1.5 mΩ、0.2 mH

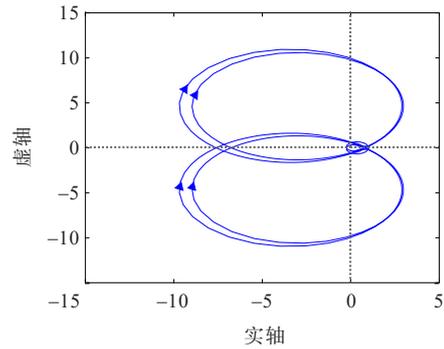
#### 3.2.2 小信号稳定薄弱并网单元辨识

依据新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识的分析流程,首先分析 6 场站系统的小信号稳定性。图 14(a)给出了 6 场站系统  $\det(F)$  的奈奎斯特曲线。在图 14 中,奈奎斯特曲线包围(0,0)点,表明该系统不稳定。此时,将该 6 场站系统解耦,分析 6 个子系统的稳定性,从而识别出稳定薄弱并网单元。图 14(b)展示了这 6 个子系统  $\det(F_i)$  的奈奎斯特曲线。在图 14(b)中, $S_1$  的奈奎斯特曲线包围(0,0)点,表明其所代表的子系统失稳; $S_2$  到  $S_6$  的奈奎斯特曲线均未包围(0,0)点,表明其代表的子系统稳定。因此,该新能源场站 1 为稳定薄弱并网单元。

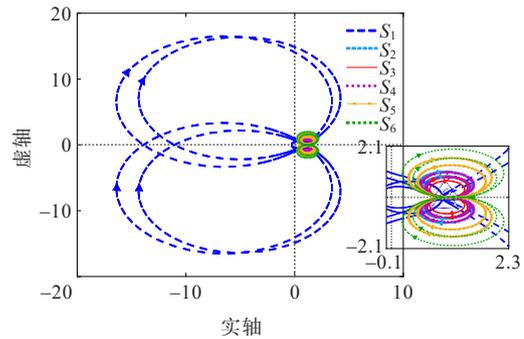
子系统特征值奈奎斯特曲线如图 15 所示。从图 15 中可看出, $S_1$  特征值的奈奎斯特曲线和单位圆的交点,由此可分析出  $S_1$  的振荡频率为 772.3 Hz,这

表明系统的振荡是由电流环的参数不匹配造成的。

现有研究表明,电流环比例参数对系统的稳定性影响更大<sup>[31]</sup>。因此,可通过修改稳定薄弱并网单元场站 1 的电流环比例参数使系统达到稳定。该场站 1 在不同电流环比例参数下  $S_1 \det(F_1)$  的奈奎斯特曲线如图 16 所示。从图 16 中可看出,随着电流环比例参数的减小,  $\det(F_1)$  的奈奎斯特曲线逐渐靠近(0,0)点,直至  $K_{ip1}$  减小至 1.8,奈奎斯特曲线才不再包围(0,0)点,此时  $S_1$  稳定。这说明了  $S_1$  中电流环比例参数与子系统稳定性水平呈负相关。



(a) 6 场站系统奈奎斯特曲线



(b) 单场站子系统奈奎斯特曲线

图 14 小信号稳定薄弱并网单元辨识(6 场站系统)

Figure 14 Identification of grid-connected units with the weakest small-signal stability in the system with six stations

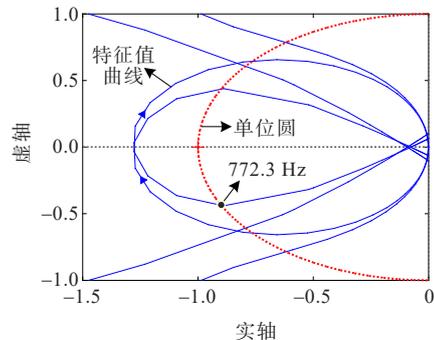


图 15 子系统特征值奈奎斯特曲线

Figure 15 Nyquist curves of subsystem eigenvalues

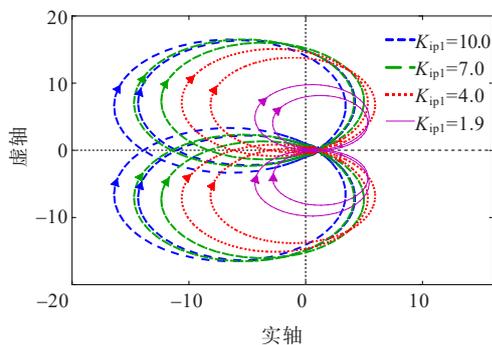


图16 场站1不同电流环比例参数下子系统1的奈奎斯特曲线

Figure 16 Nyquist curves of S1 under different proportional parameters of current control loop

为实现该6场站系统的稳定,需优化稳定薄弱并网单元的电流环比例参数,即将该系统中场站1的电流环比例参数减小为1.8。参数优化后的该6场站系统 $\det(F)$ 的奈奎斯特曲线如图17所示。从图17中可看出, $\det(F)$ 的奈奎斯特曲线不包围 $(0,0)$ 点,该系统稳定。

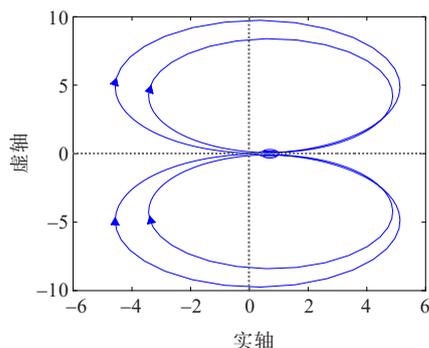


图17 参数优化后的奈奎斯特曲线(6场站)

Figure 17 Nyquist curves of the system with six stations after parameters optimization

### 3.2.3 仿真实证

类似地,在MATLAB/Simulink仿真平台中搭建了该6场站系统的仿真模型,并进行仿真分析与验证。

该6场站系统并网点电压波形图如图18所示。从图18中可看出,在1.15 s前,该系统处于振荡状态。在1.15 s时,对识别出的稳定薄弱并网单元即场站1进行参数优化,将电流环比例参数从10.0减小到1.8,系统恢复稳定。

该6场站和该3场站案例的仿真分析结果均验证了该方法可有效辨识稳定薄弱并网单元,并可通过对稳定薄弱并网单元进行参数优化提升子系统的稳定性,从而提升整个系统的稳定性。

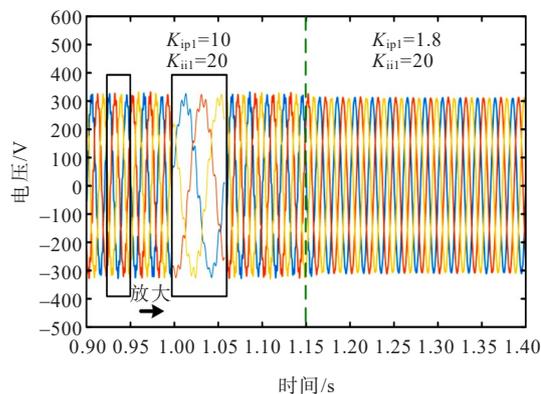


图18 6场站系统并网点电压波形

Figure 18 Waveforms of PCC voltage after modifying current loop parameters of station 1

## 4 结语

目前,新能源多场站系统的小信号稳定分析通常采用并网变流器整体聚合方法。这种方法难以确定系统关键失稳因素,更难以优化相应参数。本文采用多场站等值解耦的思路,提出了基于GNC的新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识方法。相较于现有研究,本文所提方法可明确新能源多场站系统小信号失稳的关键影响并网单元,为系统小信号稳定性提升提供高效的理论指导。得到的主要结论如下:

1) 通过基于行列式的GNC改进判据,可将新能源多场站系统解耦成具有相同特征值的多个等效单场站子系统,进而将小信号稳定性薄弱并网单元辨识问题转化为单场站子系统小信号稳定性分析问题;

2) 解耦的单场站子系统的小信号稳定程度决定了各场站的稳定薄弱程度,对稳定薄弱并网单元进行参数优化才可有效提升新能源多场站系统整体小信号稳定水平。

### 参考文献:

- [1] 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):4720-4732.  
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):4720-4732.
- [2] 乔志杰,马临超.适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J].高压电器,2022,58(12):75-84+91.  
QIAO Zhijie, MA Linchao. Research on large-scale

- energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(12):75-84+91.
- [3] 陈露洁,徐式蕴,孙华东,等.高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7):2297-2310.
- CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7):2297-2310.
- [4] 曹芸凯,赵涛,朱爱华,等.计及电网和线路阻抗的并联逆变器谐振抑制方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(2):188-196.
- CAO Yunkai, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Resonance suppression method for parallel inverters considering the grid and line impedance[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(2):188-196.
- [5] 赵鹏,黄云辉,王栋,等.基于有源阻尼控制的区域电网新能源基地次同步振荡抑制的研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(4):85-90+115.
- ZHAO Peng, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Subsynchronous oscillation suppression of new energy base in regional power grid based on active damping control[J]. *Smart Power*, 2024, 52(4):85-90+115.
- [6] 张东辉,陈新.基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述[J/OL]. *中国电机工程学报*:1-20[2023-11-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365>.
- ZHANG Donghui, CHEN Xin. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-20[2023-11-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365>.
- [7] 王磊,邓新昌,侯俊贤,等.适用于电磁暂态高效仿真的变流器分段广义状态空间平均模型[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(11):3130-3140.
- WANG Lei, DENG Xinchang, HOU Junxian, et al. A piecewise generalized state space model of power converters for electromagnetic transient efficient simulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(11): 3130-3140.
- [8] 姜齐荣,王玉芝.电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7185-7201.
- JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22):7185-7201.
- [9] 郭小江,郭剑波,王成山.考虑直流输电系统外特性影响的多直流馈入短路比实用计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(9):2143-2151.
- GUO Xiaojiang, GUO Jianbo, WANG Chengshan. Practical calculation method for multi-infeed short circuit ratio influenced by characteristics of external characteristics of DC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(9):2143-2151.
- [10] FARROKHABADI M, CAÑIZARES C A, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1):13-29.
- [11] KAZEM BAKHSHIZADEH M, WANG X F, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modeling of grid-connected converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10): 6792-6796.
- [12] SUN J. Small-signal methods for AC distributed power systems - a review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(11):2545-2554.
- [13] LI Y, SHUAI Z K, LIU X, et al. Stability analysis and location optimization method for multiconverter power systems based on nodal admittance matrix[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(1):529-538.
- [14] 刘方诚,刘进军,张昊东,等.基于G-范数和sum-范数的三相交流级联系统稳定性判据[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(24):4092-4100.
- LIU Fangcheng, LIU Jinjun, ZHANG Haodong, et al. G-norm and sum-norm based stability criterion for three-phase AC cascade systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(24):4092-4100.
- [15] YANG D S, SUN Y. SISO impedance-based stability analysis for system-level small-signal stability assessment of large-scale power electronics-dominated power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(1):537-550.
- [16] 赵文梦,陈鹏伟,姜文伟,等.基于导纳矩阵与圆盘估计的多节点直流配电系统谐振稳定性分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(16):6242-6255.
- ZHAO Wenmeng, CHEN Pengwei, JIANG Wenwei, et al. A method for resonance stability analysis of multi-bus DC distribution system based on admittance matrix and disc estimation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(16): 6242-6255.
- [17] 雷傲宇,汪林光,梅勇,等.多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7):54-60.
- LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC networks[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7):54-60.
- [18] 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.
- [19] 李绍阶, 王玮, 唐芬, 等. 基于阻抗模型的并网变流器低频振荡机理研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2787-2798.  
LI Shaojie, WANG Wei, TANG Fen, et al. Low frequency oscillation mechanism of grid-connected converter based on impedance model[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2787-2798.
- [20] 刘华坤, 谢小荣, 何国庆, 等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4002-4007+4278.  
LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Guoqing, et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 4002-4007+4278.
- [21] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(22): 6013-6027.  
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [22] WEN B, BORROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1): 675-687.
- [23] 刘雨昕, 彭克, 赵子达, 等. 多虚拟同步发电机并联系统功率低频振荡机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(19): 89-100.  
LIU Yuxin, PENG Ke, ZHAO Zida, et al. Mechanism analysis of power low-frequency oscillations in parallel system of multiple virtual synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(19): 89-100.
- [24] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2821-2828, 3133.  
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2821-2828, 3133.
- [25] 朱宇昕, 赵晋斌, 毛玲, 等. 并网系统的广义阻抗比及其稳定性分析与研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7240-7249.  
ZHU Yuxin, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. Generalized impedance ratio and stability analysis for grid-connected systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7240-7249.
- [26] JIANG S, ZHU Y, KONSTANTINOU G. Settling angle-based stability criterion for power-electronics-dominated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(3): 2972-2984.
- [27] CAO W C, MA Y W, WANG F, et al. Low-frequency stability analysis of inverter-based islanded multiple-bus AC microgrids based on terminal characteristics[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 3662-3676.
- [28] 李彪. 基于谐波线性化的三相并网逆变器系统建模和稳定性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
LI Biao. Modeling and stability analysis of three-phase grid-connected inverter system based on harmonic linearization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [29] 高英瀚. 三相LCL型并网变流器控制性能分析及改进[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
GAO Yinghan. Control performance analysis and improvement of three-phase LCL grid-connected converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [30] 年珩, 庞博, 许国东, 等. 应对并补电网下DFIG系统高频谐振的宽频阻抗重塑策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(18): 48-56.  
NIAN Heng, PANG Bo, XU Guodong, et al. Reshaping strategy of wide frequency impedance for DFIG system to suppress high frequency resonance under parallel compensation grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(18): 48-56.
- [31] 李杨. 多变换器系统小信号稳定性分析与提升方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
LI Yang. Study on small signal stability analysis and lifting method of multi-converter system[D]. Changsha: Hunan University, 2021.