

含恒功率负载的弱电网线路阻抗稳定区间辨识： 阻抗技术

王睿¹, 孙秋野^{1*}, 秦德豪², 胡伟³, 马大中¹, 李相科⁴

- (1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819; 2. 克莱姆森大学工程、计算与应用科学学院, 美国 南卡罗来纳州 29405; 3. 湖南大学机械与运载工程学院, 湖南省 长沙市 410082; 4. 南洋理工大学能源研究所, 新加坡 637141)

Stability-oriented Line Impedance Domain Assessment for Weak Grids With Constant Power Loads: An Impedance-based Approach

WANG Rui¹, SUN Qiuye^{1*}, QIN Dehao², HU Wei³, MA Dazhong¹, LI Xiangke⁴

- (1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China;
2. College of Engineering, Computing and Applied Sciences, Clemson University, 29405, South Carolina, USA;
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;
4. Energy Research Institute, Nanyang Technological University, 637141, Singapore)

ABSTRACT: Weak grids are gaining considerable attention since power generation resources are remote from power loads, which results in low-frequency/harmonic oscillation. However, the conventional impedance-based approach pays more attention to the identification of line impedance stable operating points and the stability margin of the return-ratio matrix, but it cannot provide detailed system parameter stability region. Thus, this paper proposed a line impedance stability region analysis method for the weak grid to provide the guidance for practical system planning and related stabilization method researches. Firstly, the source impedance and load admittance matrices for the AC weak grid were separately built. Then, the forbidden region was constructed for the above interconnected system, and it was further transformed into the stability operation region. Compared with the norm-based impedance criteria, the conservatism of the proposed stability region is significantly reduced. Moreover, the solution process of the line impedance stability region was switched as the identification problem regarding Hurwitz matrix through mirror, translation and rotation mapping of the interconnected system return-ratio matrix, and the line impedance stability region was directly obtained by guardian map theory. Eventually, the simulation and experimental results

verified the conservatism and effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: weak grid; stability domain; stability forbidden region; impedance-based approach

摘要: 弱电网因其易发生低频振荡和谐波振荡现象而被广泛研究。然而,传统的阻抗方法更侧重于线路阻抗稳定运行点的辨识和回比矩阵的稳定裕度,而不能提供具体的线路阻抗稳定区间。因此,文中提出一种基于安全保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定区间辨识方法,以求为实际系统规划和相关回稳方法研究提供指导。首先,分别建立交流弱电网的源侧阻抗矩阵和载侧导纳矩阵。然后,对上述互联系统建立稳定禁止区域,并进一步转化为稳定运行区域。其与基于范数的阻抗准则相比,该稳定区间的保守性显著降低。进而,通过镜像、平移和旋转映射互联系统的回比矩阵将线路阻抗稳定区间的求解过程转化为Hurwitz矩阵的辨识问题,并且通过安全保护映射理论直接得到线路阻抗稳定运行区间。最后,通过仿真和实验结果验证该方法的保守性和有效性。

关键词: 弱电网; 稳定裕度; 禁止区域; 阻抗技术

0 引言

随着可再生能源渗透率的不断提升,以风电场^[1]、电动汽车充电站^[2]和微电网^[3]等为基础的电力电子化电力系统已经越来越被人们所熟知。然而,电力电子变换器所构建的系统兼具负阻尼、低惯量和负阻抗等特性,以致电力系统电磁时间尺度的低

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 国家自然科学基金项目(U20A20190, 62073065)。

National Key R&D Program of China (2018YFA0702200); National Natural Science Foundation of China (U20A20190, 62073065)。

频振荡和谐波振荡问题成为了困扰电力系统可持续发展的关键性问题^[4]。同时，大量的可再生能源接入电力系统或负荷单元位于偏远地区都易引起供电网络的线路阻抗增加，最小短路比(short circuit ratios, SCR)降低以至于系统失稳。因此，本文提出了基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定裕度评估方法以辨识线路阻抗的安全运行区域。

目前，电力电子化电力系统电磁时间尺度稳定性分析已经取得了诸多研究成果^[5-22]。常见的电力系统稳定性分析方法可以分为以下3个大类：基于状态方程的稳定性分析方法^[5-11]，基于闭环传递函数的稳定性分析方法^[12-15]和基于阻抗技术的稳定性分析方法^[16-21]。其中，基于状态方程的稳定性分析方法首先从各个电力电子变换器件及其连接线路的角度出发构建整个系统的状态方程，其主要热点及难点问题在于构建整个状态方程时考虑延时、锁相环耦合等问题。文献[5]提出通过柏德近似等方法对上述问题进行化简。此外，当电力变换器的数量增多时，整体的状态方程将变得十分复杂，目前有效的解决方法是对整体的状态方程进行降阶，如奇异值摄动法^[6]、Schur 变换法^[7]和 Kron 降阶法^[8]等。基于闭环传递函数的稳定性分析方法是建立整个系统的小信号模型并利用根轨迹等判别系统的稳定性^[9]，然而基于闭环传递函数的根轨迹法也存在复杂的计算量，因此，该稳定性分析方法也需要降阶处理，其常见的方法有奇异值摄动法等^[10]。然而，状态方程法和闭环传递函数法都要求熟知每个变换器详尽的内部控制信息，并且随着可再生能源的渗透率不断地提高，整个电力网络的状态方程或传递函数难以构建^[11]。

因此，基于阻抗技术的电力系统电磁时间尺度稳定性分析越来越得到研究者的关注。基于阻抗技术的稳定性分析方法是建立整个系统的阻抗模型并利用广义奈奎斯特曲线^[12]或广义逆奈奎斯特曲线^[13]等判别系统的稳定性。此外，随着兼具双向能流交/直流混合微电网的不断发展，文献[14]首先提出了 $Z+Z$ 型阻抗评估判据。同时，为了消弭现有文献中复杂的广义奈奎斯特判据，相关学者提出了大量的研究以提供交流或直流系统的简化稳定判据^[15-17]，如 D-信道稳定判据、奇异值判据等^[15-16]。其中，根据不同范数类别和判据区间范围，将基于范数的阻抗判据分为3类，即 G 范数判据、无穷范数判据和无穷-1 范数判据^[17]。另外一系列的稳定判

据则基于禁止区域，如 Middlebrook 判据、增益和相位裕度判据、Opposing Argument 判据等^[18-19]。然而上述阻抗稳定性分析方法多关注于稳定运行点的辨识和所构建的回比矩阵的稳定裕度，而无法提供确保系统稳定运行时，某一系统参数的变化区域。随着弱电网输出线路阻抗不断增加，即最小短路比不断减少，探究基于阻抗技术的电力系统线路阻抗稳定运行区域显得异常重要。

为确定弱电网线路阻抗稳定运行区域，本文提出一种基于保护映射理论的阻抗稳定性分析方法。本文的主要特点和优点如下：

1) 本文提出了一种新型的阻抗禁止区域判据以获得系统能保持稳定运行的电磁时间尺度稳定区域的补空间。相较于前人成果，该禁止区域判据能够降低保守性。

2) 通过镜像映射、旋转映射和平移映射将稳定运行子区域转换为 Hurwitz 矩阵，并通过并运算得到整个系统的稳定运行区域。从而将线路阻抗稳定域的求解问题转化为等效回比矩阵为 Hurwitz 的辨识问题。

3) 利用基于 Bialternate 积的保护映射理论能够获得电力系统线路阻抗稳定运行区域以指导实际系统规划和相关回稳方法研究。

1 网络阻抗模型构建

图1为常见的弱电网供电系统拓扑图^[17-20]，其中整流器为传统的电压-电流双闭环控制器。锁相环通常用以获得 $d-q$ 旋转坐标系下的角速度。在稳定运行条件下，三相空间角速度可描述如下：

$$\omega = G_{PLL}(s)V_{cq} \quad (1)$$

式中： G_{PLL} 为锁相环的比例-积分控制器； V_c 为交流侧的交流电压；式(1)~(3)中，下标 d 、 q 分别表示在 $d-q$ 旋转坐标系下的分量。电压源型整流器的

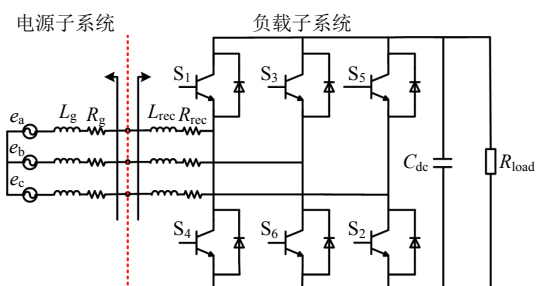


图1 弱电网供电系统拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of power supply system in weak grid

动态模型可以由以下状态方程表示:

$$V_{cd} = sI_{recd}L_{rec} - \omega I_{recq}L_{rec} + D_d V_{dc} \quad (2)$$

$$V_{cq} = sI_{recq}L_{rec} + \omega I_{recd}L_{rec} + D_q V_{dc} \quad (3)$$

$$sC_{dc}V_{dc} + I_{dc} = 1.5(D_d I_{recd} + D_q I_{recq}) \quad (4)$$

$$V_{dc} = I_{dc}R_{load} \quad (5)$$

式中: I_{rec} 为整流器输入交流电流; L_{rec} 为输入交流滤波器的等效电感; D 为整流器占空比; V_{dc} 为整流器输出直流电压; C_{dc} 为整流器输出侧电容; R_{load} 为整流器输出端负载; s 为拉普拉斯算子; ω 为角速度。图中 R_{rec} 为寄生电阻, 数值极少可以被忽略^[17]。将 PI 电压控制器和 PI 的电流控制器应用于式(2)、(3)中。因此, 受控信号的稳态值如下:

$$I_{recd}^{\#} = (V_{dc}^{\#} - V_{dc})G_v^{rec}(s) \quad (6)$$

$$I_{recq}^{\#} = 0 \quad (7)$$

$$D_d V_{dc} = -(I_{recd}^{\#} - I_{recd})G_i^{rec}(s) + V_{cd} + \omega L_{rec} I_{recq} \quad (8)$$

$$D_q V_{dc} = -(I_{recq}^{\#} - I_{recq})G_i^{rec}(s) + V_{cq} - \omega L_{rec} I_{recd} \quad (9)$$

对式(1)~(3)进行小扰动建模, 可得:

$$\Delta V_{cd} = sL_{rec}\Delta I_{recd} - G_{PLL}(s)L_{rec}V_{cq}^{\#}\Delta I_{recq} + D_d^{\#}\Delta V_{dc} + \Delta D_d V_{dc}^{\#} - G_{PLL}(s)L_{rec}\Delta V_{cq}I_{recq}^{\#} \quad (10)$$

$$\Delta V_{cq} = sL_{rec}\Delta I_{recq} + G_{PLL}(s)L_{rec}V_{cd}^{\#}\Delta I_{recd} + D_q^{\#}\Delta V_{dc} + \Delta D_q V_{dc}^{\#} + G_{PLL}(s)L_{rec}\Delta V_{cd}I_{recd}^{\#} \quad (11)$$

式中上标“#”表示稳态值。为方便获取负载子系统的输入导纳矩阵, 将式(10)、(11)改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix}_{2 \times 2} = [A2]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{recd} \\ \Delta I_{recq} \end{bmatrix} + [A4]_{2 \times 1} \Delta V_{dc} + [A3]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} [A1]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recq}^{\#} \\ 0 & 1 - G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recd}^{\#} \end{bmatrix} \\ [A2]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} sL_{rec} & -G_{PLL}(s)L_{rec}V_{cq}^{\#} \\ G_{PLL}(s)L_{rec}V_{cd}^{\#} & sL_{rec} \end{bmatrix} \\ [A3]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} V_{dc}^{\#} & 0 \\ 0 & V_{dc}^{\#} \end{bmatrix} \\ [A4]_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} D_d^{\#} \\ D_q^{\#} \end{bmatrix} \end{cases}$$

利用类似的分析, 式(5)~(9)的小信号建模可以

如下表示:

$$\Delta V_{dc} = [A5]_{1 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{recd} \\ \Delta I_{recq} \end{bmatrix} + [A6]_{1 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{bmatrix} = [A7]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{recd} \\ \Delta I_{recq} \end{bmatrix} + [A8]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + [A9]_{2 \times 1} \Delta V_{dc} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} [A5]_{1 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{1.5D_d^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} & \frac{1.5D_d^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} \\ \frac{1.5I_{recd}^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} & \frac{1.5I_{recd}^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} \end{bmatrix} \\ [A6]_{1 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{1.5I_{recd}^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} & \frac{1.5I_{recd}^{\#}R_{load}}{C_{dc}R_{load}s + 1} \\ \frac{1}{V_{dc}^{\#}} \begin{bmatrix} G_i(s) & \omega^{\#}L_{rec} \\ -\omega^{\#}L_{rec} & G_i(s) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ [A7]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{1 - G_v(s)G_i(s)}{V_{dc}^{\#}} & \frac{G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recq}^{\#}}{V_{dc}^{\#}} \\ 0 & \frac{1 - G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recd}^{\#}}{V_{dc}^{\#}} \end{bmatrix} \\ [A8]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{1 - G_v(s)G_i(s)}{V_{dc}^{\#}} & \frac{G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recq}^{\#}}{V_{dc}^{\#}} \\ 0 & \frac{1 - G_{PLL}(s)L_{rec}I_{recd}^{\#}}{V_{dc}^{\#}} \end{bmatrix} \\ [A9]_{2 \times 1} = \frac{1}{V_{dc}^{\#}} \begin{bmatrix} G_v(s)G_i(s) - D_d^{\#} \\ -D_d^{\#} \end{bmatrix} \end{cases}$$

将式(13)代入式(12), 可得:

$$[A1]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} = ([A1]_{2 \times 2} + [A4]_{2 \times 1}[A5]_{1 \times 2}) \begin{bmatrix} \Delta I_{recd} \\ \Delta I_{recq} \end{bmatrix} + ([A3]_{2 \times 2} + [A4]_{2 \times 1}[A6]_{1 \times 2}) \begin{bmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(13)代入式(14), 可得:

$$([1]_{2 \times 2} - [A9]_{2 \times 1}[A6]_{1 \times 2}) \begin{bmatrix} \Delta D_d \\ \Delta D_q \end{bmatrix} = [A8]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + ([A1]_{2 \times 2} + [A9]_{2 \times 1}[A5]_{1 \times 2}) \begin{bmatrix} \Delta I_{recd} \\ \Delta I_{recq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

移除 $[\Delta D_d \ \Delta D_q]^T$, 整流器的输入导纳矩阵如下所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{recin} &= \begin{bmatrix} Y_{recdd} & Y_{recdq} \\ Y_{recqd} & Y_{recqq} \end{bmatrix} = \\ & \left\{ ([A4][A6] + [A3])([1] - [A9][A6])^{-1} \right\}^{-1} \cdot \\ & \left\{ ([A7] + [A9][A5]) + [A4][A5] + [A2] \right\} \cdot \\ & \left\{ [A1] - ([A4][A6] + [A3]) \right\} \cdot \\ & \left\{ ([1] - [A9][A6])^{-1}[A8] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

由图 1 可知, 电源子系统的输出阻抗矩阵由线路电感和电阻构成, 其可如下表示:

$$\mathbf{Z}_{\text{gout}} = \begin{bmatrix} L_g s + R_g & -L_g \omega^\# \\ L_g \omega^\# & L_g s + R_g \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据文献[21]可知，系统最小短路比可以近似表示为 $SCR = 1/L_g(\text{pu})$ 。因此线路阻抗电感值的变化可以有效反应系统的最小短路比。进而互联系统的回比矩阵可以表示如下：

$$\mathbf{T}_{\text{RRM}} = \mathbf{Z}_{\text{gout}} \mathbf{Y}_{\text{recin}} \quad (19)$$

阻抗分析技术是分析电力系统电磁时间尺度稳定性的有效工具，其中表征电力系统特征的阻抗模型是应用阻抗分析技术前提条件^[21]。为更好地体现本文提出方法的有效性和实用性，所研究的互联系统可以被扩展到如图 2 所示的多个恒功率负载系统，其中单台恒功率负载的输入导纳矩阵可以被重新定义为 $\mathbf{Y}_{\text{rec},i}$ ，其可以充分表征物理系统的相关特性。根据文献[19]可知，含多个负载子系统的等效双端口网络模型的输入导纳矩阵可以表征为 $\mathbf{Y}_{\text{rec}} = \mathbf{Y}_{\text{rec},1} // \mathbf{Y}_{\text{rec},2} // \dots // \mathbf{Y}_{\text{rec},i} // \mathbf{Y}_{\text{rec},N}$ ，其中 N 表示恒功率负载的个数。因此，该级联系统的回比矩阵可以被定义为 $\mathbf{T}_{\text{RRM}} = \mathbf{Z}_{\text{gout}} \mathbf{Y}_{\text{rec}}$ ，该回比矩阵是后续阻抗判据的模型基础和应用前提，也可以有效表征、系统拓扑特性。

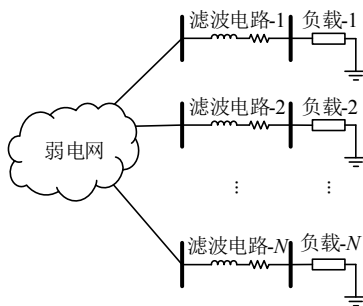


图 2 含 N 个恒功率负载的级联系统

Fig. 2 Cascaded system with N paralleled CPLs

2 基于阻抗技术的稳定运行禁止区域

上述的弱电网供电系统可以等效为如图 3 所示的同步旋转坐标系下(dq 轴)的戴维南等效电路^[2]。相关电源/负载阻抗已经在 1 节中被等效建模($\mathbf{Z}_s =$

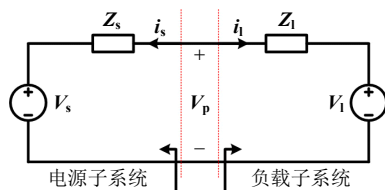


图 3 戴维南等效源/负载子系统模型

Fig. 3 Thevenin equivalent source/load subsystem model

$\mathbf{Z}_{\text{gout}}(s)$ 和 $\mathbf{Z}_l = \mathbf{Y}_{\text{rec}}(s)^{-1}$)。图中： V_s 、 i_s 和 \mathbf{Z}_s 分别为电源子系统的电压、电流和阻抗； V_l 、 i_l 和 \mathbf{Z}_l 分别表示负载子系统的电压、电流和阻抗； \mathbf{Z}_s 和 \mathbf{Z}_l 是 dq 轴下 2×2 的矩阵； V_s 、 i_s 、 V_l 、 i_l 是 2×1 的向量。假设电源子系统在空载时是稳定的，即当负载为开路时互联系统稳定；负载子系统由理想电压源供电时互联系统稳定。则连接总线的输出电压^[18]为

$$V_p = \frac{\mathbf{Z}_l}{\mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}_l} V_s + \frac{\mathbf{Z}_s}{\mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}_l} V_l = \frac{V_s + \mathbf{Z}_s \mathbf{Y}_l V_l}{\mathbf{E} + \mathbf{Z}_s \mathbf{Y}_l} \quad (20)$$

式中 \mathbf{E} 表示单位矩阵，因此，当且仅当 $\mathbf{E} + \mathbf{Z}_s \mathbf{Y}_l$ 没有右极点时，互联系统是稳定的。换言之，可以得到互联系统稳定性的充要条件是回比矩阵($\mathbf{T}_{\text{RRM}} = \mathbf{Z}_s \mathbf{Y}_l$)的奈奎斯特曲线不包围 $(-1, j0)$ 点。根据此概念，系统的稳定性可以通过回比矩阵的特征值(λ_{T_i} , $i = 1, 2$)位于某些禁止区域外以保证系统的稳定性。因此，如图 4 所示，一种新型的 λ_{T_i} 禁止区域被提出，其如下所示：

$$|\arg(\lambda_{T_i})| \leq 180^\circ - \theta_{\text{PM}} \quad (21)$$

$$\text{Re}(\lambda_{T_i}) \geq -\varepsilon_{\text{GM}} \quad (22)$$

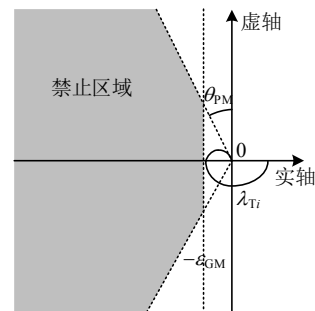


图 4 新型回比矩阵特征值禁止区域

Fig. 4 Novel eigenvalue forbidden region of return-ratio matrix

通过将 λ_{T_i} 维持在该禁止区域之外，可以得到相位裕度(θ_{PM})和增益裕度(ε_{GM})进而实现系统电磁时间尺度的稳定性。其中，多选取 $\theta_{\text{PM}} = 60^\circ$ 和 $\varepsilon_{\text{GM}} = 0.5$ ^[22]。与基于范数的禁止区域判据(如 Middlebrook 判据、增益和相位裕度判据、Opposing Argument 判据等)相比，基于回比矩阵特征值的稳定禁止区域显然具有更低的保守性。为进一步降低判决的保守性，本文选取 $\theta_{\text{PM}} = 85^\circ$ 和 $\varepsilon_{\text{GM}} = 0.95$ 。其可以进一步得到定理 2.1。

定理 2.1 如果互联系统回比矩阵的相反数($-\mathbf{T}_{\text{RRM}}$)不包围 $(1, j0)$ 点，则互联系统的电磁时间尺度稳定性可以得到保证。

证明：分别对 T_{RRM} 和 $-T_{RRM}$ 矩阵进行约当化处理，得到：

$$T_{RRM} = \Gamma^T \begin{bmatrix} \lambda_{T1} & 0 \\ * & \lambda_{T2} \end{bmatrix} \Gamma \quad (23)$$

$$-T_{RRM} = \Gamma^T \begin{bmatrix} -\lambda_{T1} & 0 \\ * & -\lambda_{T2} \end{bmatrix} \Gamma \quad (24)$$

式中： Γ 为酉矩阵；“*”表示任意常数。如果 $-T_{RRM}$ 的奈奎斯特曲线不包围(1,j0)点，则式(25)可以得到满足，进而推导得到：

$$\det(-T_{RRM} - E) \neq 0 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \det(\Gamma^T \begin{bmatrix} -\lambda_{T1} & 0 \\ * & -\lambda_{T2} \end{bmatrix} \Gamma - \Gamma^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Gamma) \neq 0 \Rightarrow \\ \det(\Gamma^T \begin{bmatrix} -(\lambda_{T1} + 1) & 0 \\ * & -(\lambda_{T2} + 1) \end{bmatrix} \Gamma) \neq 0 \Rightarrow \\ \det \begin{bmatrix} -(\lambda_{T1} + 1) & 0 \\ * & -(\lambda_{T2} + 1) \end{bmatrix} \neq 0 \Rightarrow \\ (\lambda_{T1} + 1)(\lambda_{T2} + 1) \neq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

相似分析可被应用于原回比矩阵以证明 T_{RRM} 不包围(-1,j0)点，即系统是稳定的。

$$\begin{aligned} \det(T_{RRM} + E) &= \det(\Gamma^T \begin{bmatrix} \lambda_{T1} & 0 \\ * & \lambda_{T2} \end{bmatrix} \Gamma + \Gamma^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Gamma) = \\ \det(\Gamma^T \begin{bmatrix} \lambda_{T1} + 1 & 0 \\ * & \lambda_{T2} + 1 \end{bmatrix} \Gamma) = \\ \det \begin{bmatrix} \lambda_{T1} + 1 & 0 \\ * & \lambda_{T2} + 1 \end{bmatrix} &= (\lambda_{T1} + 1)(\lambda_{T2} + 1) \neq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

定理 2.1 得证。

因此，互联系统电磁时间尺度稳定运行区域可以通过 $-T_{RRM}$ 得到(如图 5 中绿色区域所示)。进而，稳定运行区域可以由 3 个子区域的并集得到(如图 6 中绿色区域所示)，即 $A_{-TRRM} = A_{RRM1} \cup A_{RRM2} \cup A_{RRM3}$ 。其中 A_{RRM1} 可以通过平移映射将原矩阵转化为 Hurwitz 矩阵(T_{NRRM1})所构成的空间平面， A_{RRM2} 和 A_{RRM3} 可以分别通过转映射将原矩阵转化为 Hurwitz 矩阵(T_{NRRM2} 和 T_{NRRM3})，可以将 T_{NRRM1} 、 T_{NRRM2} 和 T_{NRRM3} 定义为类回比矩阵，具体表达式如下：

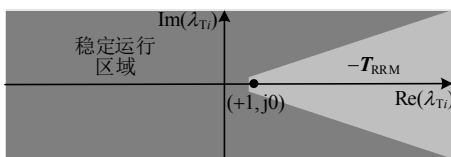


图 5 稳定运行区域

Fig. 5 Stable operation region

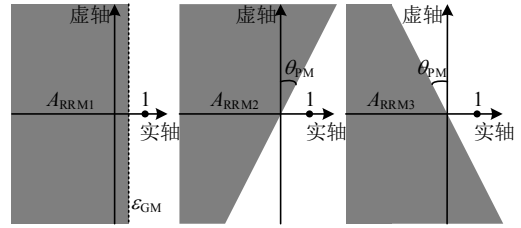


图 6 稳定运行区域集合

Fig. 6 Stable operation region set

$$A_{RRM1}: T_{NRRM1} = -T_{RRM} - \epsilon_{GM} E \quad (28)$$

$$A_{RRM2}: T_{NRRM2} = -T_{RRM} e^{j\theta_{PM}} \quad (29)$$

$$A_{RRM3}: T_{NRRM3} = -T_{RRM} e^{-j\theta_{PM}} \quad (30)$$

式中 T_{NRRM1} 、 T_{NRRM2} 和 T_{NRRM3} 为 Hurwitz 矩阵。

本文提出的稳定禁止区域基于 GMPM Criterion 判据与 Opposing Argument Criterion 判据的组合。一方面，这种禁区设计可以有效地降低传统禁区判据的保守性；另一方面，该禁止区域的提出是为后续稳定区间辨识技术提供预处理。稳定禁止区域需要通过镜像映射将其转化为稳定运行区域，紧接着通过平移和旋转映射将其转化为 Hurwitz 矩阵所构成的空间平面，从而得到弱电网线路阻抗稳定区间。然而上述过程可以实现的前提条件是稳定禁止区域可以分解为几个梯形或矩阵空间。因此传统的 GMPM Criterion 判据与 Opposing Argument Criterion 判据将不再适用，因此本文提出了如图 4 所示的稳定禁止区域，其可以分解为如图 6 所示的 3 个稳定运行子区域。

3 线路阻抗稳定运行区域

本节将根据保护映射理论，提出系统电磁时间尺度稳定运行区域的计算方法。根据上述分析，如果通过镜像映射、旋转映射和平移映射而得到的 T_{NRRM1} 、 T_{NRRM2} 和 T_{NRRM3} 是 Hurwitz 矩阵，则互联系统将保持稳定。进而可以将稳定运行区域求解过程转换为对应矩阵为 Hurwitz 的辨识问题。本节使用了几个定义和引理，具体如下所示：

定义 1 (保护映射理论)假设 $D \subseteq \mathbf{R}^{n \times n}$ 是开集合，若映射 $f: \mathbf{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbf{R}$ 使得对全部 $T \in D$ ，有 $f(D) \neq 0$ 且对全部 $T \in \partial D$ ，有 $f(D) = 0$ ，则映射 f 称作 D 的保护映射。其中 ∂D 表示集合 D 的边界^[23]。

定义 2 对于给定矩阵 $T \subseteq \mathbf{R}^{n \times n}$ ，令 $\bar{\lambda}_i(T)$ ($i = 1, 2, \dots, k$)表示矩阵 T 的不重复非零特征根实部，且 $r_0 = -\infty$ 、 $r_{k+1} = \infty$ 和 $r_i = -1 / \bar{\lambda}_i(T)$ ，则相关顺序集可以定义为 $\Theta(T) = \{r_0, r_1, \dots, r_{k+1}\}$ ，其中 $r_i < r_{i+1}$ ^[23]。

引理 1 假设 $T \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 则 $\text{mspec}(T \odot T) = \text{mspec}(\bar{T}) = \{\lambda_i(T) + \lambda_j(T), i=2, 3, \dots, n \text{ 和 } j=1, 2, \dots, i-1\}$, 其中 \odot 表示 Bialternate 积^[24]。

引理 2 对于矩阵 $\bar{T} = T \odot T$, 假设 T 是 Hurwitz 的, 则 \bar{T} 是 Hurwitz 的, 并且 $\det(\bar{T}) \neq 0$ ^[24]。

第 3 部分所构建的类回比矩阵 ($T = T_{\text{NRRM1}}, T_{\text{NRRM2}}, T_{\text{NRRM3}}$) 可以表示为如下形式:

$$T = T_0 + \rho T_z \quad (31)$$

式中: T_0 表示稳定运行点的类回比矩阵; T_z 表示线路阻抗波动而产生的变化矩阵, 由式(19)可知, 线路阻抗变化与回比矩阵成线性关联, 因此其易于得到, ρ 表示扰动参数。

定理 3.1 对于给定开区间 $\Omega \in \mathbf{R}$ 且 $T_0, T_z \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 定义 $\bar{T}_0 \triangleq 2T_0 \odot E$, $\bar{T}_z \triangleq 2T_z \odot E$. 则对于所有的 $\rho \in \Omega$ 且 $0 \in \Omega$ 使得 $T = T_0 + \rho T_z$ 是 Hurwitz 矩阵的充要条件是 T_0 为 Hurwitz 矩阵且 $0 \in \Omega \in \Theta(T_0^{-1} T_z) \cap \Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)$ 。

充分性证明: 相关证明可以通过反证法得到, 假设 T_0 是 Hurwitz 矩阵且 $0 \in \Omega \in \Theta(T_0^{-1} T_z) \cap \Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)$, 但是存在 $\rho \in \Omega$, 使得 $T = T_0 + \rho T_z$ 不是 Hurwitz 矩阵, 即 $\exists \rho_1$ 使得 $\text{Re}[\lambda_i(T_0 + \rho_1 T_z)] \geq 0$ 。如果 $\rho_1 = 0$, 显然出现矛盾, 证明完成。如果 $\rho_1 \neq 0$, 不妨假设 $\rho_1 > 0$ ($\rho_1 < 0$ 可以通过相同分析得到)。根据文献[23]可知, $T = T_0 + \rho T_z$ 是跟随 ρ 值连续变化的。鉴于 $\text{Re}[\lambda_i(T_0)] < 0$, 故而存在 $\exists \rho_2 \in [0, \rho_1] \in \Omega$ 使得 $\text{Re}[\lambda_i(T_0 + \rho_2 T_z)] = 0$ 。因而可以分为两种情况进行讨论:

1) 当 $T_0 + \rho_2 T_z$ 的特征值位于坐标原点, 则 $\det(T_0 + \rho_2 T_z) = 0$, 进而得到 $\det(E + T_0 + \rho_2 T_z) = 1$, 显然 $\rho_2 \in \Omega$ 与 $\Omega \in \Theta(T_0^{-1} T_z)$ 矛盾;

2) 当 $T_0 + \rho_2 T_z$ 的特征值位于非坐标原点的虚轴上, 即 $\lambda_i(T_0 + \rho_2 T_z) = j\omega_2$, 则必然存在共轭根即 $\lambda_j(T_0 + \rho_2 T_z) = -j\omega_2$ 。由引理 1 可知, 必然存在 $\bar{\lambda}_m(\bar{T}_0 + \rho_2 \bar{T}_z) = \lambda_i(T_0 + \rho_2 T_z) + \lambda_j(T_0 + \rho_2 T_z) = 0$ 。进而 $\rho_2 \in \Omega$, $\det(\bar{T}_0 + \rho_2 \bar{T}_z) = 0$ 。由引理 2 可知, T_0 是 Hurwitz 矩阵, 则 $\det(\bar{T}_0) \neq 0$, 即 \bar{T}_0^{-1} 客观存在, 可以进一步得到:

$$\det(\bar{T}_0 + \rho_2 \bar{T}_z) = 0 \Rightarrow \det(\bar{T}_0) \det(E + \rho_2 \bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) = 0 \quad (32)$$

因而, $\rho_2 \lambda_i(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) = -1$, 很明显 $\rho_2 \in \Omega$ 与 $\Omega \in \Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)$ 矛盾。

必要性证明: 由于所有的 $\rho \in \Omega$ 且 $0 \in \Omega$ 使得

$T = T_0 + \rho T_z$ 是 Hurwitz 矩阵。因此, 当 $\rho = 0$ 时, 可以得到 T_0 是 Hurwitz 矩阵。根据引理 2 可知, 对于所有的 $\rho \in \Omega$, $\det(\bar{T}) \neq 0$, 故而:

$$0 \neq \det(\bar{T}_0 + \rho \bar{T}_z) = \det[\bar{T}_0(E + \rho \bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)] \Rightarrow \det(\bar{T}_0) \det(E + \rho \bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) \neq 0 \quad (33)$$

因此, 对于所有的 $\rho \in \Omega$, 有 $\det(E + \rho \bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) \neq 0$, 故而式(34)成立。

$$\begin{cases} \forall \rho \in \Omega \\ \rho \lambda_i(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) \neq -1 \end{cases} \quad (34)$$

1) 如果 $\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z$ 不存在实根或者实根位于坐标原点上, 则 $\Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) = (-\infty, +\infty)$, 因此, $\Omega \in \Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)$ 必然成立;

2) 如果 $\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z$ 存在非零实根, 包涵 $\rho = 0$ 且满足 $\rho \lambda_i(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z) \neq -1$ 的最大连续开区间为 $\Omega \in \Theta(\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z)$ 。

由于 $\det(T_0 + \rho T_z) \neq 0$, 相似的分析可以得到, 即 $\Omega \in \Theta(T_0^{-1} T_z)$ 。故而必要性可以得到证明。

定理 3.1 得证。

同时, Kronecker 和运算虽然常被用以构建保护映射, 然而 Bialternate 积相较于 Kronecker 和运算具备更低的计算复杂度, 其计算 $\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z$ 中 \bar{T}_0^{-1} 是 $0.5n(n-1) \times 0.5n(n-1)$ 矩阵而非 Kronecker 和运算中的 $n^2 \times n^2$ 矩阵。因此, 本文利用计算复杂度更低的 Bialternate 积构建保护映射。

从式(19)可知, 互联系统的回比矩阵是频率的函数, 当系统的频率确定时, 回比矩阵可以认为是阻抗依赖型线性时不变矩阵, 文献[25]给出了影响系统稳定性的相关频率集合, 即 $f_{\text{tab}} = [f_1, f_2, \dots, f_p]$ 。因此, 对于给定回比矩阵及稳定运行状态, 线路阻抗稳定运行区域求解步骤如下:

初始化:

U_1 是全集, $f = f_1$, $T = T_{\text{NRRM1}}$ 。

迭代: ($i \leq p$)

1) 根据互联系统当前稳定运行点得到 f_i 频率下的类回比矩阵 T_0 和变化矩阵 T_z ;

2) 计算 \bar{T}_0 、 \bar{T}_z 和 $\bar{T}_0^{-1} \bar{T}_z$ 的特征值;

3) 根据定义 2 构建 $\Theta(T) = \{r_0, r_1, \dots, r_{k+1}\}$;

4) 对 $\rho_i \in (r_i, r_{i+1})$ 辨识 $T_0 + \rho_i T_z$ 是否为 Hurwitz 矩阵, 若是, 则该开区间内系统均在负半平面稳定;

5) 对全部稳定的开区间取并集, 得到线路阻抗稳定域 U_{1i} ;

6)对频率表内稳定的开区间取交集 $U_1=U_1 \cap U_{1i}$;

7) 令 $i=i+1$ 。

利用相同的流程可以得到基于 T_{NRRM2} 和 T_{NRRM3} 的互联系统稳定运行区域 U_2 和 U_3 。因此, 电力系统线路阻抗稳定运行区域为 $U=U_1 \cup U_2 \cup U_3$ 。

4 仿真验证

为了验证所提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法的保守性和有效性, 对如图 2 所示的常规弱电网供电系统进行仿真验证^[17,20]。具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真/实验系统参数图
Table 1 Parameter diagram of simulation/experiment system

参数	数值	参数	数值
$G_{PLL}(s)$	$k_{pp}=0.58, k_{pi}=10$	R_{load}/Ω	10
$G_v(s)$	$k_{vp}=2, k_{vi}=10$	C_{dc}/mF	20
$G_i(s)$	$K_{ip}=0.4, k_{ii}=30$	$\omega^\#$	100π
L_{rec}/mH	1	$V_{dc}^\# /V$	600
R_g/Ω	0.5	$I_{rec}^\# /A$	60

4.1 保守性验证

本节选取 $N=1, \theta_{PM}=60^\circ$ 和 $\varepsilon_{GM}=0.5$ 。在初始时刻, 我们选择弱电网的线路电感 $L_g=0.1mH$, 当频率变化范围在 $(0, 10]kHz$ 内的类回比矩阵 T_{NRRM1} 的 T_0 在频率为 $38Hz$ 处取得特征值实部最大值为 -0.2739 , 因此 T_0 为 Hurwitz 矩阵并且系统稳定性可以得到保证。根据文献[26]可构造互联系统基于阻抗无穷范数稳定判据, 如图 7 所示, 根据文献中的判据可知, 当回比矩阵无穷范数值大于 1 时, 系统的稳定性将无法得到确认, 故而该互联系统的稳定性无法得到判断, 而本文提出的稳定运行区间却可以得到系统必然稳定的结论, 根据图 8 中的时域电压电流仿真波形图可知, 互联系统是稳定的, 因此本文提出的稳定禁止区域的保守性更低。

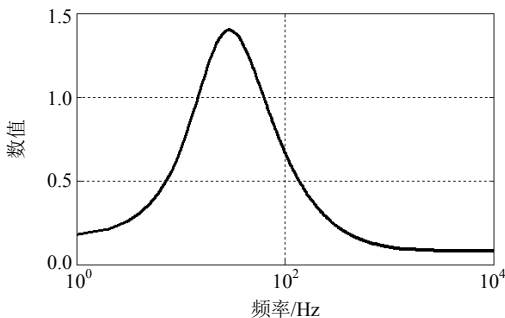


图 7 互联系统无穷范数判据
Fig. 7 Infinite norm criterion for the interconnected systems

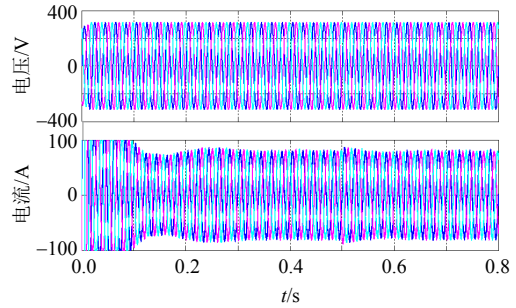


图 8 初始条件三相电压电流仿真波形图
Fig. 8 Simulated waveform of three-phase voltage and current under initial conditions

4.2 有效性验证

在本部分, 首先选取 $N=1, \theta_{PM}=85^\circ$ 和 $\varepsilon_{GM}=0.95$ 。根据文献[25]可以选取相关频率集合如等式(35)所示, 进一步观察图 7 可知, 相关频率集合可以进一步简化为等式(36)^[26]。

$$f_{tab} = [2, 6, 14, 38, 104, 278, 746, 2000]Hz \quad (35)$$

$$f_{tab} = [14, 30, 38, 104, 278]Hz \quad (36)$$

当然相关频率集合也可以选取为频率的全集 $f_{tab}=(1, 2, \dots, 10000)Hz$, 然而线路阻抗稳定区间评估方法的计算复杂度将会增加。由于互联系统稳定性随线路电感递减而提高, 因此本文仅仅选取线路阻抗增加的区间, 根据第 3 部分可以依次得到该互联系统的 3 个稳定运行区间, 针对上述 3 个稳定子区间取并集运算可以得到该互联系统的线路阻抗稳定区间为 $L_g=[0, 1.228]mH$ 。特别注意本文得到的稳定区间是充分不必要条件, 即线路阻抗在该区间内互联系统必然稳定, 而在该区间外也存在互联系统稳定的可能性。

在初始时刻, 本文选取互联系统的线路电感值为 $L_g=0.5mH$, 互联系统线路电感显然在所提出的稳定运行区间内, 互联系统应该保持稳定运行, 通过图 9 可知, 互联系统的时域电压和电流均可以稳定运行, 故而该条件下的互联系统是稳定的。因此, 本文提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法的有效性可以得到证实。进而改变互联系统的线路电感值, 使其电感值从 $L_g=0.5mH$ 增加到 $L_g=2.6mH$ 。由于互联系统线路电感值位于稳定运行区间之外, 互联系统存在失稳的可能性, 通过图 10 的时域电压电流仿真波形可知, 系统发生了低频振荡现象, 更进一步提高互联系统的线路电感值, 使其增加到 $L_g=4mH$ 。互联系统的电感值远离稳定运行区间, 系统稳定性极可能遭到

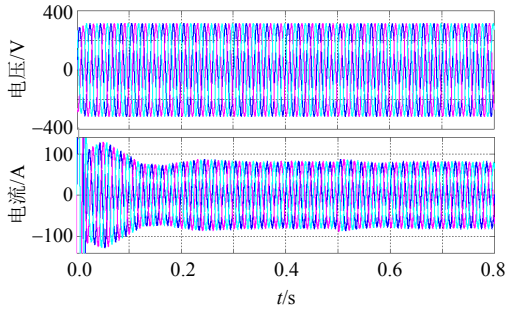


图 9 稳定运行区域内三相电压电流仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveform of three-phase voltage and current in stable operation region

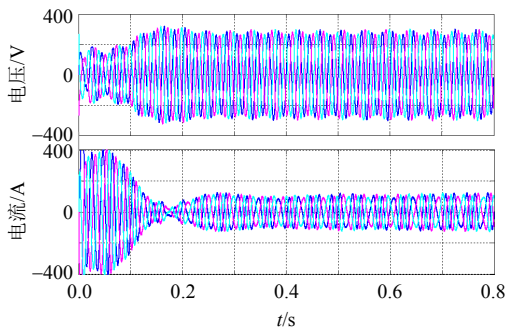


图 10 稳定运行区域外三相电压电流仿真波形图

Fig. 10 Simulation waveform of three-phase voltage and current outside stable operation region

破坏，如图 11 的时域电压电流仿真波形所示，互联系统发生严重失稳现象，系统交流侧电压幅值将无法近似稳定在 311V，导致系统失稳。通过上述仿真结果可以看出，所提出的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法具备较高的有效性。

其次，为了验证本文提出方法在多个恒功率负载级联系统中的有效性，本部分选取 $N=3$ ， $\theta_{PM}=85^\circ$ 和 $\varepsilon_{GM}=0.95$ 。为了不失一般性，选取 R_{load} 分别为 30、20 和 20Ω ，因此，通过本文提出的算法可知，该互联系统的线路阻抗稳定区间为 $L_g = [0, 0.5846]mH$ 。本文首先选取互联系统的线路电感值

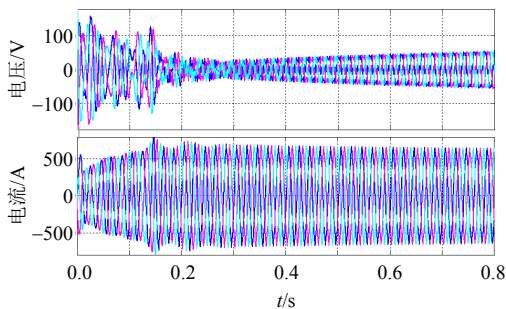


图 11 远离稳定运行区域三相电压电流仿真波形图

Fig. 11 Simulation waveform of three-phase voltage and current far from stable operation region

为 $L_g=0.35mH$ ，互联系统线路电感显然在所提出的稳定运行区间内，互联系统应该保持稳定运行，通过图 12 可知，互联系统的时域电压和电流均可以稳定运行，故而在该条件下的互联系统是稳定的。因此，本文提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法的有效性可以得到证实。进而改变互联系统的线路电感值，使其电感值从 $L_g=0.35mH$ 增加到 $L_g=1mH$ 。由于互联系统线路电感值位于稳定运行区间之外，互联系统存在失稳的可能性，通过图 13 的时域电压电流仿真波形可知，互联系统发生严重失稳现象，系统交流侧电压幅值

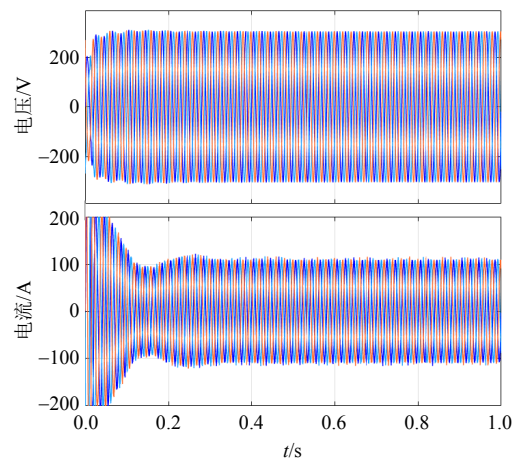


图 12 多恒功率负载系统的稳定运行区域内三相电压电流仿真波形图

Fig. 12 Simulation waveform of three-phase voltage and current in stable operation region in the system with multiple CPLs

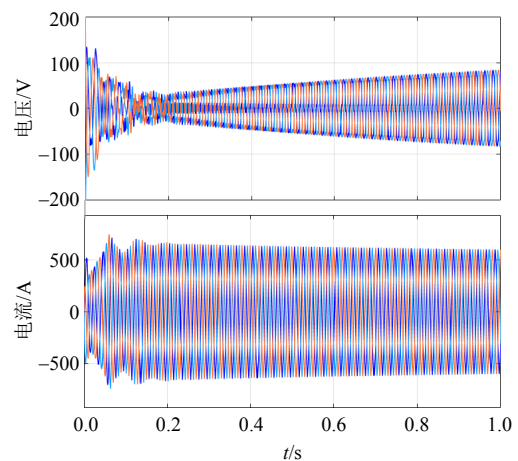


图 13 多恒功率负载系统的稳定运行区域外三相电压电流仿真波形图

Fig. 13 Simulation waveform of three-phase voltage and current outside stable operation region in the system with multiple CPLs

将无法近似稳定在 311V，导致系统失稳。通过上述仿真结果可以看出，所提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法具备较高的有效性。

5 硬件在环实验验证

弱电网供电系统的系统框图如图 14 所示，实验平台建立如图 15 所示，以验证所提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定裕度评估方法的有效性。整流器由 TMS320F28335DSP 控制，其余参数如表 1 所示。

初始时刻，本文选取互联系统的线路电感值为 $L_g = 0.5\text{mH}$ ，显然线路电感值在所提出的稳定运行区域内，系统应该保持稳定运行，通过图 16 的实验电压波形图可知，在该条件下的互联系统是稳定的。因此，本文提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定裕度评估方法的有效性可得到证实。进而改变互联系统的线路电感值，使其电感值从 $L_g =$

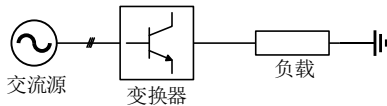


图 14 弱电网供电系统的系统框图

Fig. 14 System diagram of power supply system under weak grid.



图 15 半实物测试系统拓扑图

Fig. 15 Topology diagram of hardware-in-the loop experimental system

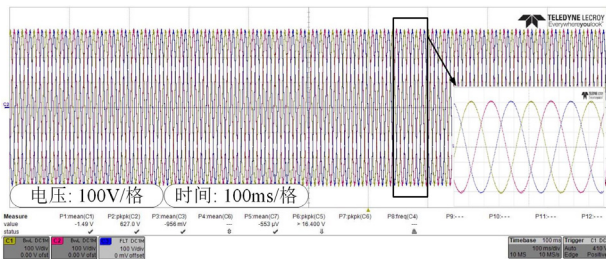


图 16 稳定运行区域内三相电压实验波形图

Fig. 16 Experimental waveform of three-phase voltage in stable operation region

0.5mH 增加到 $L_g = 3\text{mH}$ 。此时的互联系统线路电感值位于稳定运行区域之外，互联系统存在失稳的可能性，通过图 17 的实验电压波形图可知，系统发生了低频振荡现象。故而通过上述实验结果可得如下结论：所提出的基于保护映射理论的弱电网线路阻抗稳定裕度评估方法具备较高的有效性。

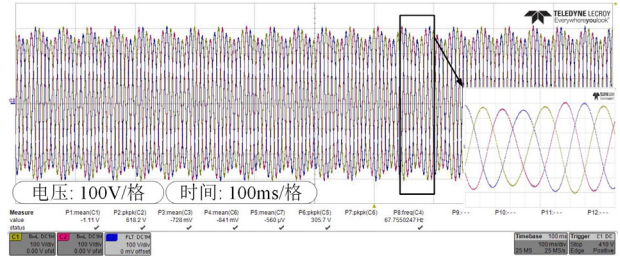


图 17 稳定运行区域外三相电压实验波形图

Fig. 17 Experimental waveform of three-phase voltage outside stable operation region

6 结论

针对可再生能源高比例接入电力系统和偏远地区安全供电需求，本文提出了基于保护映射的弱电网线路阻抗稳定区间评估方法，从而有效辨识了直流负载的供能安全域。相较于范数稳定判据，本文所提出的阻抗稳定禁止区域判据具备更低的保守性。进而本文利用镜像映射、平移映射和旋转映射将稳定禁止区域求解问题成功转化为系统稳定运行区域求解问题，并将其转化为类回比矩阵是 Hurwitz 矩阵的辨识问题。最后利用基于 Bialternate 积的保护映射获取了弱电网供电系统线路阻抗稳定运行区间。通过相关的仿真和实验结果可知，本文所提出方法具有低保守性、低计算复杂度和高有效性。

参考文献

[1] 董文凯, 杜文娟, 王海风. 用于振荡稳定性分析的并网风电场动态等效模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 75-87.
 DONG Wenkai, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Dynamic equivalent model of a grid-connected wind farm for oscillation stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 75-87(in Chinese).
 [2] SHUAI Zhikang, LI Yang, WU Weimin, et al. Divided DQ small-signal model: a new perspective for the stability analysis of three-phase grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6493-6504.

- [3] WANG Rui, SUN Qiuye, ZHANG Pinjia, et al. Reduced-order transfer function model of the droop-controlled inverter via jordan continued-fraction expansion[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, DOI: 10.1109/TEC.2020.2980033.
- [4] YUAN Hao, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power System, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [5] WANG Rui, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. The small-signal stability analysis of the droop-controlled converter in electromagnetic timescale[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1459-1469.
- [6] RASHEDUZZAMAN M, MUELLER J A, KIMBALL J W. Reduced-order small-signal model of microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1292-1305.
- [7] LUO Ling, DHOPE S V. Spatiotemporal model reduction of inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 823-832.
- [8] DORFLER F, BULLO F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(1): 150-163.
- [9] 王睿, 孙秋野, 马大中, 等. 微网中分布式电源锁相环建模及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7338-7348.
- WANG Rui, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. Modeling and stability analysis of distributed generation phase locked loop in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7338-7348(in Chinese).
- [10] ZHOU Jinghao, SHI Peng, GAN Deqiang, et al. Large-scale power system robust stability analysis based on value set approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4012-4023.
- [11] 马宁宁, 谢小荣, 亢朋朋, 等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 65-74.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, KANG Pengpeng, et al. Wide-area monitoring and analysis of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 65-74(in Chinese).
- [12] 佟强, 张东来, 徐殿国. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 57-64.
- TONG Qiang, ZHANG Donglai, XU Dianguo. Output impedance and stability analysis of converters in distributed power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 57-64(in Chinese).
- [13] WEN Bo, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Inverse nyquist stability criterion for grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1548-1556.
- [14] LIU Fangcheng, LIU Jinjun, ZHANG Haodong, et al. Stability issues of Z+Z type cascade system in hybrid energy storage system (HESS)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5846-5859.
- [15] MAO Hengchun, BOROYEVICH D, LEE F C Y. Novel reduced-order small-signal model of a three-phase PWM rectifier and its application in control design and system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(3): 511-521.
- [16] HITI S, VLATKOVIC V, BOROJEVIC D, et al. A new control algorithm for three-phase PWM buck rectifier with input displacement factor compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(2): 173-180.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] RICCOBONO A, SANTI E. Comprehensive review of stability criteria for DC power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3525-3535.
- [19] SUDHOFF S D, GLOVER S F, LAMM P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 965-973.
- [20] RADWAN A A A, MOHAMED Y A R I. Analysis and active-impedance-based stabilization of voltage-source-rectifier loads in grid-connected and isolated microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 563-576.
- [21] SONG Yujiao, BREITHOLTZ C. Nyquist stability analysis of an AC-grid connected VSC-HVDC system using a distributed parameter DC cable model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 898-907.

- [22] LIU Jinjun, FENG Xiaogang, LEE F C, et al. Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1254-1261.
- [23] RERN S, KABAMBA P T, BERNSTEIN D S. Guardian map approach to robust stability of linear systems with constant real parameter uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(1): 162-164.
- [24] ZHANG X, TSIOTRAS P, LANZON A. An approach for computing the exact stability domain for a class of LTI parameter dependent systems[J]. International Journal of Control, 2006, 79(9): 1046-1061.
- [25] RYGG A, MOLINAS M. Apparent impedance analysis: a small-signal method for stability analysis of power electronic-based systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1474-1486.
- [26] LIU Zeng, LIU Jinjun, BAO Weihang, et al. Infinity-norm of impedance-based stability criterion for three-phase AC distributed power systems with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3030-3043.



王睿

在线出版日期: 2021-02-03。

收稿日期: 2020-03-23。

作者简介:

王睿(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为信息能源系统建模、稳定性分析、主动致稳控制和能量互济控制策略研究等, 1610232@stu.neu.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)