

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241336

多换流器系统离散状态空间模型的模态分析法

费思媛¹, 高晨祥¹, 汪可友¹, 徐晋¹, 秦世耀²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240; 2. 可再生能源并网
全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘要: 基于连续频域的模态分析可定位影响系统弱阻尼模态的主导节点。随着换流器数量的增加, 待研究系统呈现出高阶动态特性, 给系统模态辨识及其定量分析带来挑战。为此, 提出了一种基于离散状态空间模型的稳定性量化评估方法。首先, 参考电磁暂态仿真建模思想, 建立系统离散域等效电路模型, 利用计算机进行数值计算建模分析, 规避了连续频域分析因涉及符号变量运算而产生的计算负担。其次, 由等效电路得到离散时域模型求解系统模态, 并根据离散节点导纳频域模型进行节点参与因子分析, 定位系统薄弱点。最后, 进一步结合链式法则, 量化系统模态对换流器参数的灵敏度, 从而实现针对性参数优化调整以提升系统性能。研究表明, 该分析流程为复杂系统的稳定性评估提供了一种高效可靠的解决途径。

关键词: 模态灵敏度; 节点导纳矩阵; 离散域; 小信号稳定; 多换流器系统

Modal analysis method for discrete state-space model of multi-converter systems

FEI Siyuan¹, GAO Chenxiang¹, WANG Keyou¹, XU Jin¹, QIN Shiyao²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-Integration (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: Modal analysis conducted in the continuous frequency domain can identify the dominant nodes that influence the weakly damped modes in a system. However, as the number of converters increases, the system exhibits high-order dynamic characteristics, posing significant challenges to modal identification and quantitative analysis. To address this, a stability quantitative evaluation method based on a discrete state-space model is proposed. First, referring to the electromagnetic transient simulation modeling principles, an equivalent circuit model in the discrete domain is established. Numerical computation and modeling analysis are then carried out by computers, effectively avoiding the computational burden associated with symbolic variable operations in continuous frequency domain analysis. Second, the system modes are solved from the discrete-time model derived from the equivalent circuit. Node participation factor analysis is performed according to the frequency domain model of the discrete node admittance to identify the weak points of the system. Finally, combined with the chain rule, the sensitivity of system modes to converter parameters is quantified, enabling targeted parameter optimization to improve system performance. The study demonstrates that this analysis framework provides an efficient and reliable approach for stability evaluation of complex systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2402800).

Key words: modal sensitivity; nodal admittance matrix; discrete domain; small-signal stability; multi-converter system

0 引言

电力电子换流器凭借其灵活可控的优势, 在电力系统发输配用各领域均具有广泛的应用^[1-3], 其渗

透率不断提高, 然而大规模电力电子技术的应用给电网稳定运行带来了冲击, 电力电子换流器和电网、电力电子换流器内部控制环路之间的相互作用^[4]在较宽频段范围均存在振荡失稳问题^[5-8], 例如河北沽源、新疆哈密等地发生多起振荡事件^[9-10], 严重威胁电力系统的安全运行。因此有必要针对此类相关

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2402800)

振荡问题进行分析,对系统进行相应的稳定性评估,识别造成不稳定模态的主导因素,为换流器设计以及参数选择提供解决或改善方案。

阻抗建模凭借其良好的模块化和可拓展性,广受研究者的青睐,其最早被提出用于低压直流系统^[11],后推广至三相交流系统,该方法根据源荷两侧的阻抗比来分析系统稳定性^[12-14]。在多换流器系统中,选择单个阻抗分割点进行分析,只能评估局部稳定性^[15],要想获取全局稳定的结果,需要遍历各个并网连接点,找到系统最薄弱的节点位置^[16],然而将系统聚合后,拓扑信息丢失导致无法进一步探究系统内部对整体稳定性的影响程度,同时此类方法仅适用于集中汇集拓扑而不适用于环网结构的系统,基于单个连接点的分析结果可能有误,因此提出了基于多母线阻抗模型的稳定性分析方法^[17-21],文献^[19-20]提出结合组件连接法,将系统分解为多个反馈回路,运用广义奈奎斯特判据评估回路稳定性,然而此分析框架需要重复修改迭代调整来提高系统稳定性,无法直观提供稳定性优化信息和方案。

为进一步定位影响不稳定模态的换流器,并为参数优化提供参考依据,文献^[15,22-27]采用系统阻抗模型框架下的频域模态分析方法,然而分析过程中系统模态的求解和灵敏度分析计算过程依赖于模型的显式解析表达式^[15,22-23]或者通过模型频谱识别系统的极点和留数等信息^[24],对于前者而言需要构建含符号变量的矩阵模型并求解高阶多项式,不利于大规模复杂系统应用;对于后者而言,通过向量拟合进行频谱识别,受初始参数和噪声影响,可能存在迭代和收敛问题,为获取高精度逼近效果,需要一定计算资源和人工干预。

文献^[28]提出了一种基于多域映射的阻抗建模法,无需复杂的图论拓扑分析以选取网络常态树来明确独立状态变量,可以实现高效、灵活、精确的系统模型构建,采用聚合模型有效评估稳定性,但缺乏内部参数对系统稳定性影响的定量分析能力。因此,本文在文献^[28]的基础上,对系统级离散状态空间模型的构建方式进行了修改,提出了一种基于离散域系统建模的方法,可完成系统模态辨识和稳定性定量分析,过程中保留了换流器部分拓扑信息,可识别影响系统主导模态的关键元件并定量分析内部参数对系统稳定性的影响大小,建模和分析过程均位于离散域,结果较为直观。首先依据元件特性和连接关系构建离散状态空间模型,其次利用系统离散时域状态方程,高效计算系统的振荡模态,将弱阻尼模态代入系统离散频域节点导纳模型中进行深入分析,基于灵敏度矩阵能够精确地定位影响

该模态的关键节点。最后运用链式法则可计算参数灵敏度结果,为换流器并网系统参数调整优化提供指导信息。

1 多换流器系统的离散状态空间模型

根据是否含有源换流器,可将多换流器系统划分为有源网络和连接网络两部分,其中连接网络主要包含输电线、变压器和传统负载等,如图1所示,其中共有 m 个端口,表示系统含 m 台换流器设备。

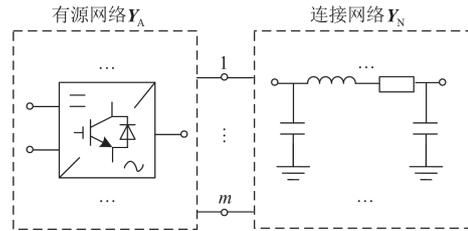


图1 多换流器并网系统

Fig. 1 Multi-converter grid-connected system

1.1 元件级离散状态空间模型

根据连续系统中描述元件特性的微分代数方程,在静态工作点进行小信号线性化获取其状态空间模型,对其利用梯形积分法则离散化,得到离散状态空间模型如式(1)所示,该建模方法借鉴了由H.W. Dommel教授所提电磁暂态仿真算法数值积分代换思想,具体推导过程可参考文献^[28]。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{h}(t) = \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{h}(t - \Delta t) + \mathbf{B}_d \Delta \mathbf{u}_{xy}(t - \Delta t) \\ \Delta \mathbf{i}_{xy}(t) = \mathbf{C}_d \Delta \mathbf{h}(t) + \mathbf{D}_d \Delta \mathbf{u}_{xy}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta \mathbf{h}$ 为离散域状态变量列向量,称为“历史电流项”,各离散状态变量之间相互独立,故模型易于修改和拓展; \mathbf{A}_d 、 \mathbf{B}_d 、 \mathbf{C}_d 和 \mathbf{D}_d 为离散状态空间模型的系数矩阵,其中下标“d”表示离散域,在静态工作点不变的情况下,系数矩阵均为常数矩阵; Δt 为离散步长; $\Delta \mathbf{u}_{xy}$ 和 $\Delta \mathbf{i}_{xy}$ 为公共 xy 同步旋转参考系下元件的电压和电流微变量。当元件内部参数发生变动时,只需要修改其内部变量静态工作点的值,修正系数矩阵,计及离散状态变量的独立性,模型兼具阻抗模型的模块化特性,这对后续参数灵敏度计算具有重要意义。

根据各元件的离散状态空间模型的输出方程,各元件可采用诺顿等效电路表示,其中 $\mathbf{C}_d \Delta \mathbf{h}$ 为等效电流源, \mathbf{D}_d 为等效导纳,可将图1所示系统转换为如图2所示的等效电路,其中连接网络部分可能包含纯电阻等非动态元件,该类元件无等效电流源,如图2连接网络中含下标“j”的元件,而连接网络中含下标“i”的元件为动态元件。

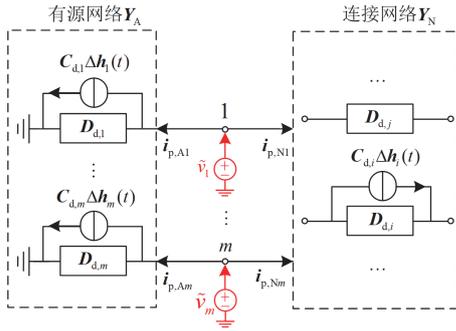


图 2 多换流器系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the multi-converter system

1.2 换流器侧有源网络的系统模型

考虑到有源侧设备为终端设备, 直接连接于端口处, 因此其端电压和电流与设备支路电压、电流一致。该侧子系统的离散状态空间模型构建如式(2)所示。其中, 子系统模型的系数矩阵 $A_{D,A}$ 、 $B_{D,A}$ 等, 可通过将换流器模型对应的系数矩阵以对角块形式直接列写, 如式(3)所示。其中, 下标“ A ”表示有源网络。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},A}(t) = \mathbf{A}_{D,A} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},A}(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{D,A} \Delta \mathbf{u}_{p,A}(t - \Delta t) \\ \Delta \mathbf{i}_{p,A}(t) = \mathbf{C}_{D,A} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},A}(t) + \mathbf{D}_{D,A} \Delta \mathbf{u}_{p,A}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{D,A} = \text{diag}(\mathbf{A}_{d,1}, \dots, \mathbf{A}_{d,m}) \\ \mathbf{B}_{D,A} = \text{diag}(\mathbf{B}_{d,1}, \dots, \mathbf{B}_{d,m}) \\ \mathbf{C}_{D,A} = \text{diag}(\mathbf{C}_{d,1}, \dots, \mathbf{C}_{d,m}) \\ \mathbf{D}_{D,A} = \text{diag}(\mathbf{D}_{d,1}, \dots, \mathbf{D}_{d,m}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta \mathbf{h}_{\text{sys},A}$ 为该侧设备离散状态变量组成的列向量, $\Delta \mathbf{h}_{\text{sys},A}^T = [\Delta \mathbf{h}_1^T \ \dots \ \Delta \mathbf{h}_m^T]$; $\Delta \mathbf{u}_{p,A}$ 为端口节点电压微变量, $\Delta \mathbf{u}_{p,A}^T = [\Delta \mathbf{u}_{xy,1}^T \ \dots \ \Delta \mathbf{u}_{xy,m}^T]$; $\Delta \mathbf{i}_{p,A}$ 为端口节点流入各设备的电流微变量, $\Delta \mathbf{i}_{p,A}^T = [\Delta \mathbf{i}_{xy,1}^T \ \dots \ \Delta \mathbf{i}_{xy,m}^T]$ 。

1.3 连接网络的系统模型

连接网络侧拓扑结构相对复杂, 需要通过变换计算来获取该侧网络离散状态空间模型的系数矩阵。根据图 2 所示电路, 综合可得该侧网络的中间模型如式(4)所示, 考虑到该侧网络包含动态元件和非动态元件, 将网络内部各元件的系数矩阵按支路顺序对角块列写, 如式(5)所示, 式中下标“ N ”表示连接网络。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t) = \mathbf{A}_{\text{sys},N} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{\text{sys},N} \Delta \mathbf{u}_{xy,hN}(t - \Delta t) \\ \Delta \mathbf{i}_{xy,N}(t) = \mathbf{C}_{\text{sys},N} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t) + \mathbf{D}_{\text{sys},N} \Delta \mathbf{u}_{xy,N}(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{\text{sys},N} = \text{diag}(\dots, \mathbf{A}_{d,i}, \dots) \\ \mathbf{B}_{\text{sys},N} = \text{diag}(\dots, \mathbf{B}_{d,i}, \dots) \\ \mathbf{C}_{\text{sys},N} = \text{diag}(\dots, \mathbf{C}_{d,i}, \dots) \\ \mathbf{D}_{\text{sys},N} = \text{diag}(\dots, \mathbf{D}_{d,i}, \dots, \mathbf{D}_{d,j}, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}$ 为该侧所有动态元件离散状态变量; $\Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}^T = [\dots \ \Delta \mathbf{h}_i^T \ \dots]$; $\Delta \mathbf{u}_{xy,N}$ 为各支路电压微变量, $\Delta \mathbf{u}_{xy,N}^T = [\dots \ \Delta \mathbf{u}_{xy,i}^T \ \dots \ \Delta \mathbf{u}_{xy,j}^T \ \dots]$; $\Delta \mathbf{u}_{xy,hN}$ 为由 $\Delta \mathbf{u}_{xy,N}$ 中含动态元件的支路部分构成的子集; $\Delta \mathbf{i}_{xy,N}$ 为各支路电流微变量, $\Delta \mathbf{i}_{xy,N}^T = [\dots \ \Delta \mathbf{i}_{xy,i}^T \ \dots \ \Delta \mathbf{i}_{xy,j}^T \ \dots]$ 。

设系统共有 M 个节点, m 个端口, 定义节点-端口关联矩阵 \mathbf{M}_{np} , 其中矩阵的列对应换流器并网端口, \mathbf{M}_{np} 在各端口对应的节点位置处为二维单位矩阵 $\mathbf{I}_{2 \times 2}$, 其余元素均为 0。

$$\mathbf{M}_{np} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2m \times 2m} \\ \mathbf{0}_{(2M-2m) \times 2m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

记节点-支路关联矩阵为 \mathbf{M}_{nb} , 定义节点-动态支路关联矩阵 \mathbf{M}_{nh} , 其为 \mathbf{M}_{nb} 的子集, 通过筛选 \mathbf{M}_{nb} 中含动态元件支路对应的列所得。根据电路理论, 各电压分量的转换关系为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{xy,hN} = \mathbf{M}_{nh}^T \Delta \mathbf{u}_{xy,n} \\ \Delta \mathbf{u}_{xy,N} = \mathbf{M}_{nb}^T \Delta \mathbf{u}_{xy,n} \\ \Delta \mathbf{u}_{p,N} = \mathbf{M}_{np}^T \Delta \mathbf{u}_{xy,n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}_{xy,n}$ 为整个系统的节点电压微变量, 是 $2M$ 维列向量; $\Delta \mathbf{u}_{p,N}$ 为连接网络端口电压微变量组成的 $2m$ 维列向量。

根据连接网络侧的诺顿等效电路, 利用节点分析法, 可得式(8), 其中等式右侧为流入各节点的等效电流源。

$$\mathbf{M}_{nb} \mathbf{D}_{\text{sys},N} \mathbf{M}_{nb}^T \Delta \mathbf{u}_{xy,n} = -\mathbf{M}_{nh} \mathbf{C}_{\text{sys},N} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N} + \mathbf{M}_{np} \Delta \mathbf{i}_{p,N} \quad (8)$$

式中: $\Delta \mathbf{i}_{p,N}$ 为端口节点处流入连接网络的电流微变量组成的列向量。

联立式(4)一式(8), 消去其余内部节点相关的电压电流变量, 保留网络端口电压电流变量, 推导出连接网络侧离散状态空间模型及其系数矩阵 $\Delta \mathbf{i}_{p,N}(t)$ 表达式为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t) = \mathbf{A}_{D,N} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{D,N} \Delta \mathbf{u}_{p,N}(t - \Delta t) \\ \Delta \mathbf{i}_{p,N}(t) = \mathbf{C}_{D,N} \Delta \mathbf{h}_{\text{sys},N}(t) + \mathbf{D}_{D,N} \Delta \mathbf{u}_{p,N}(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{D,N} = \mathbf{A}_{\text{sys},N} - \mathbf{B}_{\text{sys},N}(\mathbf{Z}_{\text{hh}} - \mathbf{Z}_{\text{hp}}\mathbf{Z}_{\text{pp}}^{-1}\mathbf{Z}_{\text{ph}})\mathbf{C}_{\text{sys},N} \\ \mathbf{B}_{D,N} = \mathbf{B}_{\text{sys},N}\mathbf{Z}_{\text{hp}}\mathbf{Z}_{\text{pp}}^{-1} \\ \mathbf{C}_{D,N} = \mathbf{Z}_{\text{pp}}^{-1}\mathbf{Z}_{\text{ph}}\mathbf{C}_{\text{sys},N} \\ \mathbf{D}_{D,N} = \mathbf{Z}_{\text{pp}}^{-1} \\ \mathbf{Z}_{\alpha\beta} = \mathbf{M}_{\text{na}}^T(\mathbf{M}_{\text{nb}}\mathbf{D}_{\text{sys},N}\mathbf{M}_{\text{nb}}^T)^{-1}\mathbf{M}_{\text{nb}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\mathbf{Z}_{\alpha\beta}$ 为中间变换矩阵，下标“ α ”和“ β ”为变量，可取为“h”或“p”，有 \mathbf{Z}_{hh} 、 \mathbf{Z}_{hp} 、 \mathbf{Z}_{ph} 和 \mathbf{Z}_{pp} 共4种取法。

2 基于离散状态空间模型的模态分析

2.1 基于离散时域模型的系统振荡模态辨识

在无外部扰动注入情况下，两侧网络离散状态空间模型的输入变量端口电压相等，输出变量端口电流等大反向。根据此代数关系，联立两个子网络的离散状态空间模型式(2)和式(9)可消去输入输出变量，得到整个系统的离散时域状态方程 $\Delta\mathbf{h}_{\text{sys}}(t)$ 如式(11)所示。

$$\Delta\mathbf{h}_{\text{sys}}(t) = (\mathbf{A}_D - \mathbf{B}_D\mathbf{D}_D^{-1}\mathbf{C}_D)\Delta\mathbf{h}_{\text{sys}}(t - \Delta t) \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}_D = \text{diag}(\mathbf{A}_{D,A}, \mathbf{A}_{D,N}) \\ \mathbf{B}_D = [\mathbf{B}_{D,A}^T \quad \mathbf{B}_{D,N}^T]^T \\ \mathbf{C}_D = [\mathbf{C}_{D,A} \quad \mathbf{C}_{D,N}] \\ \mathbf{D}_D = \mathbf{D}_{D,A} + \mathbf{D}_{D,N} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $\Delta\mathbf{h}_{\text{sys}}$ 为系统所有离散状态变量组成的列向量， $\Delta\mathbf{h}_{\text{sys}}^T = [\Delta\mathbf{h}_{\text{sys},A}^T \quad \Delta\mathbf{h}_{\text{sys},N}^T]$ 。与连续域类似，式(11)中的状态矩阵的特征值即系统模态 λ ，此处模态为 z 平面的值，相对于 s 平面，其稳定条件为所有模态 λ 的值均位于 z 平面的单位圆内时系统稳定。在进一步分析中，将重点关注处于单位圆附近的模态。

2.2 基于离散频域模型的模态灵敏度分析

分别对两侧网络的离散状态空间模型式(2)和式(9)中的状态方程和输出方程进行 z 变换，可分别得到两侧网络的导纳矩阵 $\mathbf{Y}_A(z)$ 、 $\mathbf{Y}_N(z)$ 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_A(z) = \mathbf{C}_{D,A}(z\mathbf{I} - \mathbf{A}_{D,A})^{-1}\mathbf{B}_{D,A} + \mathbf{D}_{D,A} \\ \mathbf{Y}_N(z) = \mathbf{C}_{D,N}(z\mathbf{I} - \mathbf{A}_{D,N})^{-1}\mathbf{B}_{D,N} + \mathbf{D}_{D,N} \end{cases} \quad (13)$$

式中： z 为离散复变量。根据在端口节点施加的电压扰动向量 $\tilde{\mathbf{v}}$ 引起相应的电流响应的变化量，可建立整个系统离散频域节点导纳模型为

$$\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(z) = \mathbf{Y}_A(z) + \mathbf{Y}_N(z) = \mathbf{C}_D(z\mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1}\mathbf{B}_D + \mathbf{D}_D \quad (14)$$

计及各换流器与端口一一对应，故 $\mathbf{Y}_A(z)$ 呈现为对角块矩阵，由各换流器的等效2维导纳矩阵构

成。同时 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(z)$ 对角线位置附近的2维矩阵块，由端口节点所连换流器的等效输出导纳与连接网络内部等效后的端口节点自导纳之和构成，具有一定物理意义。

研究表明，节点导纳矩阵行列式的零点等价于系统状态矩阵的特征值，即为系统模态^[29-30]。在离散域，两者等价关系可在数学上证明，证明过程详见附录A。假定 λ_0 是已知的系统模态值，则数值矩阵 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$ 的特征值分解可表示为

$$\mathbf{A}(\lambda_0) = \mathbf{L}(\lambda_0)\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)\mathbf{R}(\lambda_0) \quad (15)$$

式中： $\mathbf{A}(\lambda_0)$ 为对角矩阵，对角线元素为矩阵 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$ 的特征值， $\mathbf{A}(\lambda_0) = \text{diag}(\dots, \gamma_k, \dots)$ ； $\mathbf{L}(\lambda_0)$ 为特征值对应的左特征向量构成的矩阵， $\mathbf{L}^T(\lambda_0) = [\dots \quad \mathbf{l}_k^T \quad \dots]$ ； $\mathbf{R}(\lambda_0)$ 为特征值对应的右特征向量构成的矩阵， $\mathbf{R}(\lambda_0) = [\dots \quad \mathbf{r}_k \quad \dots]$ 。

基于上述等价关系， $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$ 一定存在一个特征值 γ_k ，其值为0，为区别于系统模态，称其为导纳关键特征值，该零特征值对于理解和评估给定模态 λ_0 影响下系统的动态行为至关重要。对节点导纳矩阵模型任意元素 $Y_{\text{nodal},ij}$ 施加小扰动，根据 γ_k 的响应变化计算其对该元素分量的灵敏度如式(16)所示。

$$S_{\gamma,ji} = \frac{\partial \gamma_k}{\partial Y_{\text{nodal},ij}} = \mathbf{l}_k^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{\text{nodal}}}{\partial Y_{\text{nodal},ij}} \mathbf{r}_k = [\mathbf{r}_k \mathbf{l}_k^T]_{ji} \quad (16)$$

定义 \mathbf{S}_γ 为导纳关键特征值灵敏度矩阵，根据式(16)可知其值为 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$ 关于 γ_k 的左右特征向量的外积，这与时域模态分析中的系统模态关于状态矩阵元素的灵敏度分析结果具有相同的表达形式。其中，各端口的灵敏度计算结果对应于 \mathbf{S}_γ 中以该端口编号为索引的 2×2 矩阵，即对于第 q 个端口，其灵敏度子矩阵为 $[\mathbf{S}_\gamma]_{2q-1:2q, 2q-1:2q}$ 。为直观比较不同端口节点对系统模态 λ_0 的参与度，进一步计算各端口对应矩阵块的Frobenius范数，将其转化为标量值，其大小反映了对应端口节点对该模态 λ_0 的参与度，幅值越大，表明参与程度越高，据此可判断影响系统模态 λ_0 的主导端口节点。

进一步将节点导纳矩阵任意元素施加一个小扰动时引起相应的系统模态变化的关系定义为模态灵敏度矩阵 \mathbf{S}_λ 。基于附录A证明的等价关系，可知 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$ 的行列式为0，运用特征扰动法，忽略高阶无穷小项，展开可得

$$\frac{\partial \det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]}{\partial Y_{\text{nodal},ij}} \Delta Y_{\text{nodal},ij} + \det'[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)] \Delta \lambda = 0 \quad (17)$$

式中： $\det[\cdot]$ 表示矩阵行列式； $\det'[\cdot]$ 表示行列式的

一阶导; $\Delta\lambda$ 表示系统模态改变量。根据式(17), 整理得到

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta Y_{\text{nodal},ij}} = \frac{\partial\lambda}{\partial Y_{\text{nodal},ij}} = -\frac{\partial \det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]}{\det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)] \times \partial Y_{\text{nodal},ij}} \quad (18)$$

$$\mathbf{S}_\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial \mathbf{Y}_{\text{nodal}}} = -\frac{\text{adj}[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]^T}{\det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]} \quad (19)$$

式中: $\text{adj}[\cdot]$ 表示伴随矩阵。在连续域计算中, 行列式一阶导的计算依赖于节点导纳矩阵传递函数的显式解析表达式, 在离散域模型计算过程中可由式(20)通过数值计算直接求得, 计算量少。结合式(14), 推导其转换关系为

$$\det'[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)] = \left. \frac{d\{\det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(z)]\}}{dz} \right|_{z=\lambda_0} = \left\langle \frac{\partial \det[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]}{\partial \mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)}, \frac{\partial \mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)}{\partial z} \right\rangle = \left\langle \text{adj}[\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)]^*, -\mathbf{C}_D(\lambda_0 \mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1}(\lambda_0 \mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1} \mathbf{B}_D \right\rangle \quad (20)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示矩阵的内积; $\overline{(\cdot)}$ 表示矩阵共轭; $(\cdot)^*$ 表示矩阵共轭转置。

2.3 参数模态灵敏度计算

在获取系统模态的基础上, 还需要进一步描述这些模态随参数变化的灵敏度。在实际应用中, 通常更关注换流器侧设备参数的变化对系统整体稳定性的影响。参数调整会直接引起关联设备的等效导纳特性发生改变, 这种变化进一步映射到整个系统的节点导纳矩阵中, 进而改变系统模态分布, 最终影响系统的稳定性。如图 3 流程所示, 参数的变化通过链式法则传递, 最终影响系统模态。

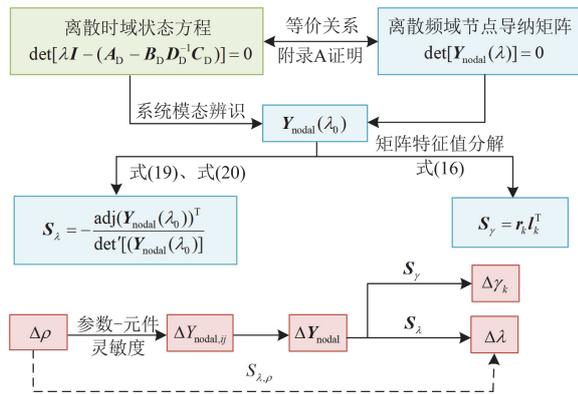


图 3 离散域模型的模态分析流程

Fig. 3 Modal analysis process of discrete-domain model

假设并联于端口 i 的换流器设备等效输出导纳为 \mathbf{y} , 当其产生变化 $\Delta\mathbf{y}$ 时, 仅影响节点导纳矩阵

$\mathbf{Y}_{\text{nodal}}$ 中该设备端口节点对应的 2 维对角块。为揭示系统内部动态行为对参数调整的敏感度, 实现定量预测并优化系统模态, 进而有效调控整个系统的稳定性和动态性能, 利用链式法则逐步计算参数模态灵敏度为

$$\mathbf{S}_{\lambda,\rho} = \left\langle [\mathbf{S}_\lambda]_{2i-1:2i,2i-1:2i}, \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \rho} \right\rangle \quad (21)$$

式中: ρ 为影响换流器设备等效输出 \mathbf{y} 的某个参数。

根据式(21)可知, 在内部参数发生变化时, 仅影响该设备自身等效离散状态空间模型的系数矩阵。参数模态灵敏度数值越大, 说明该参数对该模态的影响越大, 根据 $\mathbf{S}_{\lambda,\rho}$ 可判断系统特征值随元件参数的变化趋势。其中, 元件导纳关于参数的偏导值即参数-元件灵敏度, 可采用式(22)近似表示。

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \rho} \approx \frac{\mathbf{y}_{\Delta\rho} - \mathbf{y}}{\Delta\rho} \quad (22)$$

式中: $\Delta\rho$ 为参数小扰动, 通常取值为 $10^{-5}(1+|\rho|)$, 以平衡相对扰动和绝对扰动; $\mathbf{y}_{\Delta\rho}$ 为扰动作用下的导纳, 须考虑由参数扰动引起的平衡点的变化, 因为平衡点会直接影响线性化后元件等效导纳。

假设原模态为 $\lambda_0 = a + jb$, 模态变化量为 $\Delta\lambda = c + jd$, 在 z 平面中系统模态不稳定区域为单位圆外侧, 若变化后的模态与原模态相比幅值更大, 更接近于单位圆, 则系统趋向于失稳。根据图 4 所示几何关系可知, 当原模态与模态变化量的矢量夹角为钝角时, 即当 $ac + bd < 0$ 时, 系统稳定性变好, 反之则变差。

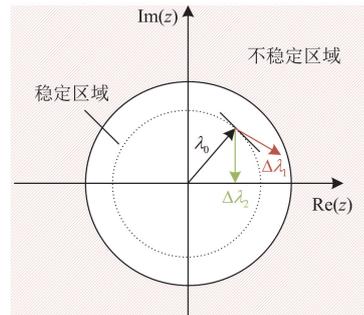


图 4 离散域系统模态稳定区域

Fig. 4 Stable region of modes for discrete-domain system

需要注意的是, 上述分析优化过程通过将非线性系统采用线性化处理, 整个系统的离散域状态空间模型是基于一个静态工作点建立的, 研究聚焦于小信号波动范畴, 当系统受到大扰动时, 例如参数的大幅调整等, 非线性特性将导致系统大幅偏离原平衡工作点, 也将引起较大的系统模态变化, 此时

需要重新构建线性化状态空间模型, 对此可多次迭代运用所提方法来逼近系统的真实非线性动态特性。考虑到在离散域建模无需拓扑分析, 同时没有符号变量参与计算, 显著减轻了建模计算负担, 因此, 上述基于离散域的模式分析, 在快速评估系统稳定性以及计算模式对换流器参数变化的灵敏度方面, 具有显著优势。

3 仿真算例

3.1 系统模式的定量分析

为验证上述针对多换流器系统稳定性分析方法的有效性, 本节搭建了一个多换流器并网系统进行仿真验证, 系统额定电压为10 kV, 其系统拓扑结构如图5所示, 端口节点为母线1—母线4。

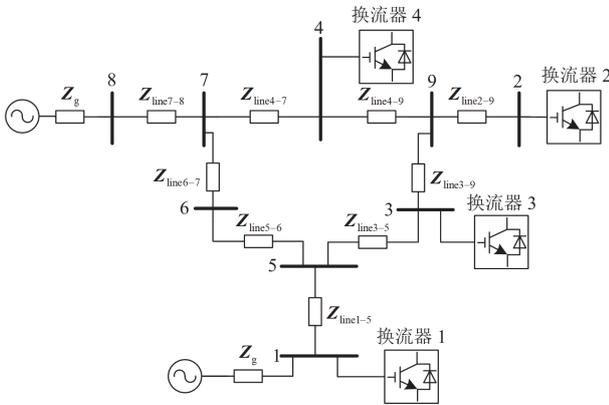


图5 多换流器并网9节点系统拓扑结构图

Fig. 5 Topology diagram of the 9-bus system with multi-converters grid-connected

系统共有4台以换流器为接口的设备, 其中包括2台源设备(换流器1和换流器2)和2台负载设备(换流器3和换流器4), 源设备的有功功率为20 MW, 负载有功和无功功率9.1 MW和2.86 Mvar。换流器采用闭环功率控制, 具体控制框图详见附录B。各个换流器的电路和控制参数见表1, 系统连接电路部分数据参考文献[17]。

首先根据离散时域模型计算得到整个系统的模式在 z 平面的分布如图6所示, 可以看到, 所有离散域系统模式关于实轴对称, 且均处于用虚线表示的单位圆内部, 说明系统处于稳定状态。选择位于上半平面幅值最大的模式 λ_0 进行进一步灵敏度分析, 其值为 $0.9794 + j0.1943$, 在图6中用黄色星号“*”标注。

将 λ_0 代入离散频域节点导纳矩阵得到矩阵 $\mathbf{Y}_{\text{nodal}}(\lambda_0)$, 计算导纳关键特征值灵敏度矩阵 \mathbf{S}_y , 通过范数计算将端口对应的各灵敏度子矩阵转化为标

表1 换流器的电路和控制参数

Table 1 Circuit and control parameters of converters

参数	换流器1	换流器2	换流器3	换流器4
基波频率 f_0/Hz	50	50	50	50
额定容量 $S_N/\text{MV}\cdot\text{A}$	100	100	100	100
逆变器侧电感 L_{f1}/mH	2	3	6	6
L_{f1} 寄生电阻 R_{f1}/Ω	0.25	0.25	0.25	0.25
网侧电感 L_{f2}/mH	0.2	0.2	0.2	0.2
L_{f2} 寄生电阻 R_{f2}/Ω	0.12	0.12	0.12	0.12
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	10	10	10	10
C_f 附加电阻 R_f/Ω	2	2	2	2
锁相环比例系数 $k_{p,\text{PLL}}$	0.074	0.049	0.061	0.055
锁相环积分系数 $k_{i,\text{PLL}}$	9.80	8.57	9.80	11.08
锁相环带宽/Hz	116	89	103	101
电流环比例系数 $k_{p,\text{I}}$	3	5	1.7	2.2
电流环积分系数 $k_{i,\text{I}}$	800	960	500	800

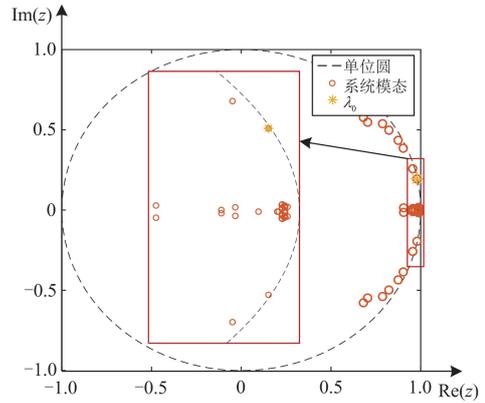


图6 系统的离散域模式分布

Fig. 6 System modes distribution in the discrete domain

量值, 量化各端口的参与度, 并经过归一化处理, 结果如图7所示。可以看出, 端口节点2对该系统模式 λ_0 的参与度最高, 而端口节点1对该模式的参与度最低, 据此可初步判断影响系统模式 λ_0 的主导端口节点为2号端口。

根据以上分析结果, 可初步推测换流器2是影响该系统模式特性的主导元件, 进一步利用链式法则计算换流器2中各控制参数对系统稳定性的影响大小, 考虑到离散模式对不同参数灵敏度数量级不一致, 且数值相对较小, 对 $S_{\lambda,\rho}$ 灵敏度矩阵进行归一化处理, 如式(23)所示, 得到标幺化后的灵敏度指标 $S_{\lambda,\rho}^*$, 使得不同类型参数具有可比性, 具体表达式为

$$S_{\lambda,\rho}^* = \frac{\partial \lambda}{\partial \rho} \cdot \frac{\rho}{|\lambda|} \quad (23)$$

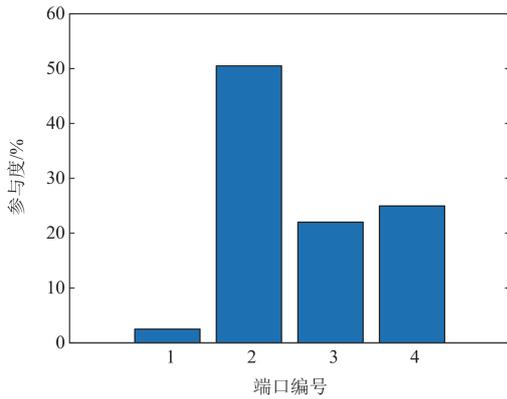


图 7 系统各端口的相对参与度

Fig. 7 Relative participation degree of each port of system

图 8 给出换流器 2 关于模态 λ_0 的参数灵敏度标幺化分析结果。可以看出, 在该算例中增大该换流器的锁相环积分参数或比例参数, 减小其电流环积分参数或比例参数, 将提高系统稳定性, 且在参数变化大小程度相同的情况下, 各环节比例参数变化对系统稳定性的影响远大于各积分参数变化带来的影响。

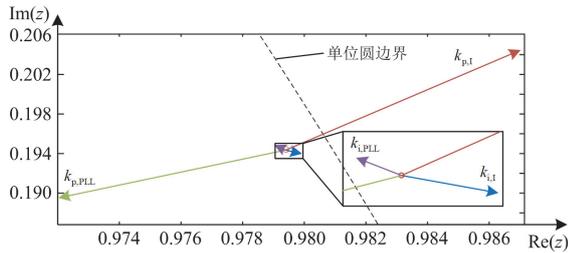


图 8 归一化的离散域模态对换流器 2 各参数的灵敏度

Fig. 8 Normalized sensitivity of the mode to various parameters of converter 2 in the discrete domain

将各参数调整增加 10%, 根据参数模态灵敏度结果计算系统模态改变量 $\Delta\lambda$ 的理论值, 并对比其与实际模态变化量的误差情况, 如表 2 所示。根据表 2 可知, 理论计算值与实际变化情况基本一致, 误差较小, 证明了本文所提定量稳定性分析方法的有效性。

表 2 元件换流器 2 的控制参数灵敏度分析

Table 2 Sensitivity analysis of control parameters of converter 2

参数名称	$\Delta\lambda$ 理论计算值($\times 10^{-5}$)	$\Delta\lambda$ 实际值($\times 10^{-5}$)	误差/%
$k_{p,PLL}$	$-64.7712 - j62.8092$	$-64.9201 - j63.1783$	0.44
$k_{i,PLL}$	$-2.7753 + j2.9062$	$-2.7742 + j2.9067$	0.03
$k_{p,i}$	$52.9749 + j115.0813$	$52.2644 + j112.7167$	1.99
$k_{i,i}$	$5.6036 - j2.6316$	$5.6068 - j2.6246$	0.12

3.2 仿真验证

为进一步验证上述系统模态分析结果的正确性, 在 Matlab/Simulink 中搭建图 5 所示拓扑的仿真模型, 在 0.5 s 时系统注入小信号扰动, 分别观察端口节点 1—节点 4 的功率输出和锁相环输出频率波动情况分别如图 9 和图 10 所示, 可以看到, 端口节点的输出功率经过一段振荡逐渐收敛, 整个系统是稳定的。其中换流器 2 的振荡波动幅值最大, 而端口节点 1 的振荡波动幅值最小, 这与图 7 参与度分析结果一致。

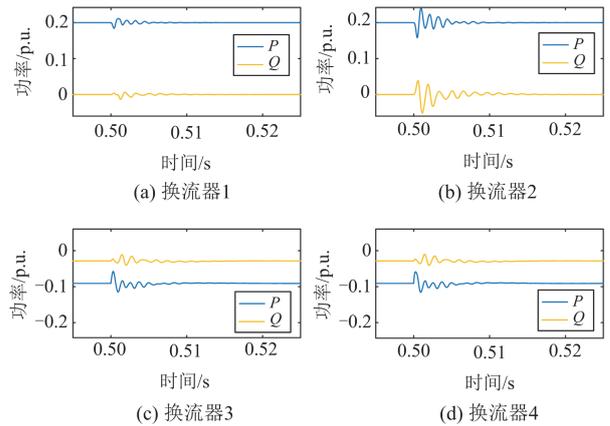


图 9 换流器输出功率波形

Fig. 9 Output power waveform of converters

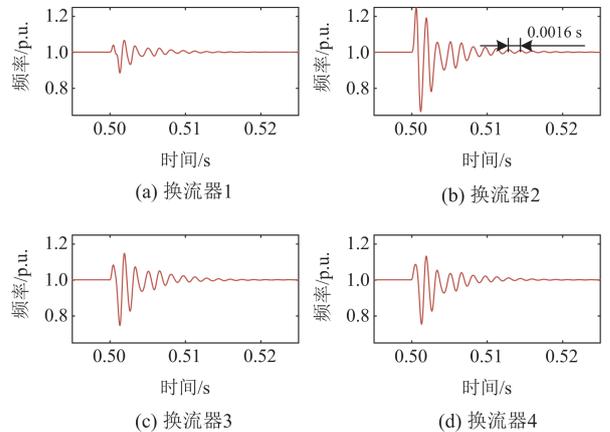


图 10 换流器锁相环输出频率波形

Fig. 10 Phase-locked loop output frequency waveform of converters

进一步对端口节点 2 的锁相环输出波形进行傅里叶分析, 可得系统主导的振荡频率约为 625 Hz, 根据理论模态计算结果, 对模态 λ_0 进行双线性变换可得其对应的连续域振荡频率为 625.61 Hz, 因此可以得出理论模态辨识结果与时域仿真分析结果基本一致。

以修改电流环比例参数为例, 根据式(21)计算得到的系统模态 λ_0 对换流器 2 中 $k_{p,1}$ 参数的灵敏度结果, 调整换流器 2 的电流环比例参数, 使其在 0.6~1.6 倍原值范围内变化, 计算模态 λ_0 变化情况如图 11 所示, 可以看到当 $k_{p,1}$ 调整为原来的 1.4 倍时, 调整后的模态位于离散域单位圆外, 说明系统失稳, 而减小 $k_{p,1}$, 该模态的系统稳定性得到一定程度优化。

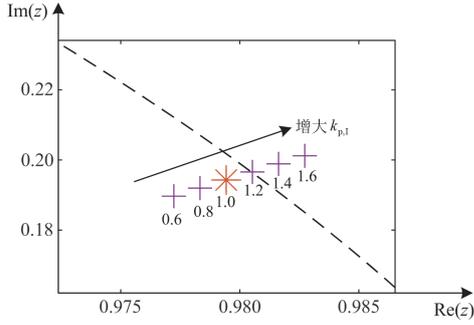


图 11 系统模态位置变化情况

Fig. 11 Variation of the system modal position

在换流器 2 端口添加小信号扰动, 图 12 显示了在不同电流比例参数下换流器 2 端口三相电流波形。可以看出当 $k_{p,1}$ 减小时, 系统受扰动后恢复时长变短, 而当 $k_{p,1}$ 调整为原来的 1.4 倍时, 系统振荡幅值发散, 处于不稳定运行状态。以上验证了系统模态对参数灵敏度的分析结果的正确性。

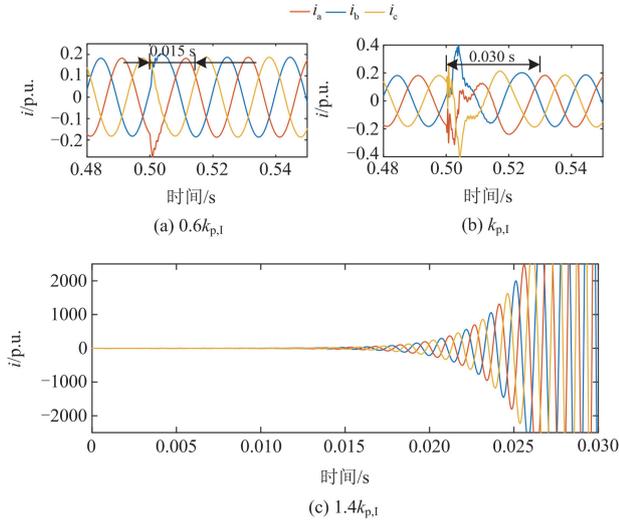


图 12 换流器 2 端口的三相电流波形

Fig. 12 Three-phase current waveform of the converter 2 port

4 结论

本文提出了一种基于离散状态空间模型的多换流器系统稳定性量化分析方法。对多换流器系统采

用离散域建模, 无需进行拓扑分析选取独立变量和含高阶符号变量的运算, 可快速构建系统离散域分析模型。根据离散时域模型可求得系统模态, 将模态值代入离散频域节点导纳矩阵中, 可进行该系统模态的参与度分析, 分析流程以计算机的数值计算为主, 不依赖于模型的显示解析表达式或频谱分析结果, 即可判断得出影响系统的主导端口和元件, 并进一步根据链式法则, 定量求解换流器元件内部参数对系统模态影响的大小程度。通过时域仿真验证了所提定量稳定性分析结果的正确性和有效性。该方法采用在离散域建模并对系统振荡模态进行定量分析, 计算分析效率高, 能够直接为离散域内的参数调整与优化提供有力的指导信息。

附录 A

设存在矩阵 M 的表达式为

$$M = \begin{bmatrix} \lambda I - A_D & B_D \\ C_D & -D_D \end{bmatrix} \quad (A1)$$

式中: A_D 、 B_D 、 C_D 和 D_D 为数值矩阵。其中 $\lambda I - A_D$ 和 D_D 均为满秩方阵, 其中 A_D 和 B_D 、 C_D 和 D_D 的行数相同, A_D 和 C_D 、 B_D 和 D_D 的列数相同。存在方程表达式为

$$\begin{bmatrix} \lambda I - A_D & B_D \\ C_D & -D_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (A2)$$

式中: x_1 、 x_2 均为列向量变量, 其维数分别与 A_D 和 B_D 的列数一致。

由式(A2)消去变量 x_1 的部分可得

$$[C_D(\lambda I - A_D)^{-1}B_D + D_D]x_2 = 0 \quad (A3)$$

考察式(A2)的解 x , 设该方程有无穷解, 则矩阵 M 奇异, 其行列式为 0。计及在上述的假设情况下, 同样有无穷组 x_2 同时满足式(A3), 因此有

$$\det[C_D(\lambda I - A_D)^{-1}B_D + D_D] = 0 \quad (A4)$$

另外, 根据矩阵行列式的性质, 结合式(A1), 得到

$$\det(M) = \det(-D_D) \times \det[\lambda I - (A_D - B_D D_D^{-1} C_D)] \quad (A5)$$

考虑到矩阵满秩, 故 $\det(-D_D)$ 不为 0, 因此 $\det(M)$ 的零点等价于 $\det[\lambda I - (A_D - B_D D_D^{-1} C_D)]$ 的零点, 同时等价于式(A4)。综上, 离散时域状态方程的状态矩阵特征值等价于离散频域节点导纳矩阵 $Y_{nodal}(z)$ 行列式的零点。

附录 B

换流器元件采用 LCL 型滤波, 考虑锁相环对系统动态的影响, 其控制以及电路拓扑分别如图 B1 以及图 B2 所示。

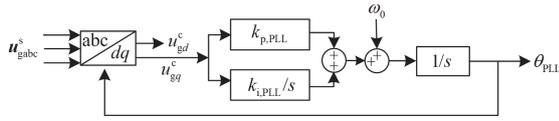


图 B1 锁相环部分控制框图

Fig. B1 Block diagram of phase-locked loop control

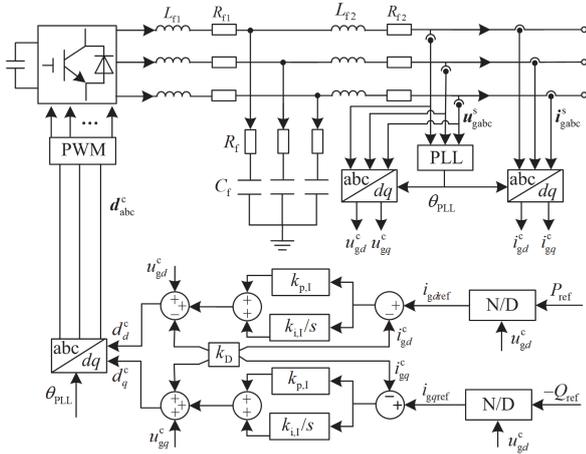


图 B2 换流器电路拓扑及控制框图

Fig. B2 Converter circuit topology and control block diagram

参考文献

[1] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 28-51.
HUANG Yuhang, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.

[2] 杨旭红, 袁春, 钱峰伟, 等. 电网不平衡下基于 MMC 的分数阶积分滑模控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 226-234.
YANG Xuhong, YUAN Chun, QIAN Fengwei, et al. Fractional-order integral sliding mode control strategy based on MMC under unbalanced grid conditions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 226-234.

[3] 杨贵军, 莫云晓, 龙英云, 等. 模块化多电平换流器子模块检测技术研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 170-178.
YANG Guijun, MO Yunxiao, LONG Yingyun, et al. Research on detection technology of sub-model of modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 170-178.

[4] 张天翼, 王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 177-187.
ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for

subynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 177-187.

[5] 马立红, 梁亚峰, 程西, 等. 计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 214-222.
MA Lihong, LIANG Yafeng, CHENG Xi, et al. Optimal operation of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 214-222.

[6] 易善军, 李原, 马宁嘉, 等. 实际次/超同步振荡事件的多频率耦合效应分析[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7): 56-61.
YI Shanjun, LI Yuan, MA Ningjia, et al. A study on multi-frequency coupling effects in an actual sub/super synchronous oscillation event[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(7): 56-61.

[7] 聂永辉, 张德伟, 高磊, 等. MMC 型柔性直流输电系统的中高频振荡无源阻尼抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 141-149.
NIE Yonghui, ZHANG Dewei, GAO Lei, et al. Passive damping suppression strategy for medium and high frequency oscillations in MMC type flexible DC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 141-149.

[8] 陈波, 张权旺, 刘柳, 等. 计及 LVRT 的光伏并网系统暂态稳定性分析与参数优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 162-173.
CHEN Bo, ZHANG Quanwang, LIU Liu, et al. Transient stability analysis and parameter optimization of PV grid-connected systems considering LVRT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 162-173.

[9] XIE Xiaorong, ZHANG Xu, LIU Huakun, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126.

[10] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study on complex oscillation problems caused by grid connection systems of new energy sources and countermeasures[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.

[11] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C] // IEEE Power Electronics Specialists, Conference, 1976, Cleveland, Ohio, USA.

[12] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

- [13] 邢法财, 蒋哲, 武诚, 等. 考虑右半平面极点的三相并网变换器小干扰稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 42-50.
XING Facai, JIANG Zhe, WU Cheng, et al. Small signal stability analysis of three-phase grid-connected converters considering right half plane pole[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 42-50.
- [14] WANG Yang, TANG Junmiao, SI Jiandong, et al. Power quality enhancement in islanded microgrids via closed-loop adaptive virtual impedance control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-17.
- [15] ZHAN Ying, XIE Xiaorong, LIU Huakun, et al. Frequency-domain modal analysis of the oscillatory stability of power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1534-1543.
- [16] ZHANG Chen, MOLINAS M, RYGG A, et al. Impedance-based analysis of interconnected power electronics systems: impedance network modeling and comparative studies of stability criteria[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(3): 2520-2533.
- [17] JIANG Shan, KONSTANTINOU G. Impedance-based stability analysis: Nodal admittance or bus admittance?[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1): 2327-2340.
- [18] LIAO Yicheng, WANG Xiongfei, WANG Xiao. Frequency-domain participation analysis for electronic power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(3): 2531-2537.
- [19] CAO Wenchao, MA Yiwei, YANG Liu, et al. D-Q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6017-6028.
- [20] 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.
- [21] YANG Dongsheng, SUN Yin. 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, 2021, 13(1): 537-550.
- [22] ZHANG Chen, ZONG Haoxiang, CAI Xu, et al. On the relation of nodal admittance-and loop gain-model based frequency-domain modal methods for converters-dominated systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1779-1782.
- [23] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Bus participation factor analysis for harmonic instability in power electronics based power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10341-10351.
- [24] ZHU Yue, GU Yunjie, LI Yitong, et al. Participation analysis in impedance models: the grey-box approach for power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(1): 343-353.
- [25] ZHU Yue, GU Yunjie, LI Yitong, et al. Impedance-based root-cause analysis: comparative study of impedance models and calculation of eigenvalue sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(2): 1642-1654.
- [26] 陈林, 徐永海, 王天泽, 等. 弱电网下计及背景谐波的多并网逆变器阻抗重塑谐振抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 59-72.
CHEN Lin, XU Yonghai, WANG Tianze, et al. Resonance suppression method for multiple grid-connected inverters with impedance remodeling with background harmonics in a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 59-72.
- [27] LI Yang, SHUAI Zhikang, LIU Xuan, 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, 2019, 9(1): 529-538.
- [28] GAO Chenxiang, FEI Siyuan, MA Yizhuo, et al. Multi-domain-mapping-based impedance calculation method for oscillatory stability analysis of VSC-based power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024.
- [29] GOMES S, MARTINS N, PORTELA C. Modal analysis applied to s-domain models of AC networks[C]// 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, January 28-February 1, 2001, Columbus, Ohio, USA: 1305-1310.
- [30] VARRICCHIO S L, GOMES S, MARTINS N. S-domain approach to reduce harmonic voltage distortions using sensitivity analysis[C]// 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, January 28-February 1, 2001, Columbus, Ohio, USA: 809-814.

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2024-12-30

作者简介:

费思媛(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网系统建模与稳定性分析; E-mail: feisiyuan@sjtu.edu.cn

高晨祥(1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压直流输电 MMC 电磁暂态建模、电力系统稳定分析; E-mail: gaocx_22@sjtu.edu.cn

汪可友(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统动态与稳定计算方法、柔性输电等。E-mail: wangkeyou@sjtu.edu.cn

(编辑 张颖)