

电网运行

端口视角下的电力系统振荡分析方法综述

郑 乐, 梁以宁

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘 要: 在众多电力系统振荡分析方法中, 阻抗分析法和转矩分析法受到广泛关注。两种方法均从端口角度描述系统特性, 因此振荡问题的端口分析方法具有重要研究价值。从端口角度分析, 阻抗分析法和转矩分析法分别使用阻抗端口和转矩系数端口描述系统, 因此重点对两种端口的研究现状做出综述。首先研究了变流器并网常用的阻抗端口, 分析了不同类型阻抗端口的特点, 总结阻抗端口在变流器系统稳定性分析中的优点; 其次研究同步电机并网常用的转矩系数端口, 重点从物理意义上阐释转矩系数端口的特点, 指出了其在工程应用上的优越性; 最后介绍了两种端口统一性相关理论, 指出端口在不同场景下表现出不同的特点, 为端口分析方法的选择提供一定参考。

关键词: 小扰动稳定性分析; 端口选择; 阻抗分析法; 转矩分析法

DOI: 10.19585/j.zjdl.202501001

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

A review of power system oscillation analysis methods from a port-based perspective

ZHENG Le, LIANG Yining

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (NCEPU),
Beijing 102206, China)

Abstract: Among the various oscillation analysis methods in power systems, impedance-based and torque-based analysis methods have garnered significant attention. Both approaches describe system characteristics from a port-based perspective, making port-based oscillation analysis methods a valuable research focus. From this perspective, impedance-based and torque-based methods characterize systems using impedance ports and torque coefficient ports, respectively. This paper presents a comprehensive review of the current state of research on these two ports. First, the commonly used impedance port for grid-connected converters is examined, analyzing the characteristics of different types of impedance ports and summarizing their advantages in stability analysis of converter-based systems. Second, the torque coefficient port commonly used for grid-connected synchronous motors is studied, with an emphasis on explaining its physical significance and highlighting its superiority in engineering applications. Lastly, unified theories related to the two ports are introduced, identifying how ports exhibit distinct features in different scenarios, thus offering insights into the selection of port-based analysis methods.

Keywords: small-signal stability analysis; port selection; impedance-based analysis method; torque-based analysis method

0 引言

在“双碳”目标指引下, 我国正大力推进新能源为主体的新型电力系统建设^[1]。截至2023年底, 我国风电、光伏装机容量均突破4.4亿kW并超过水电装机容量, 且呈现迅猛增长趋势^[2]。随着风

电、光伏为代表的大量新能源发电通过变流器并网^[3-4], 与新能源并网相关的系统稳定性问题引起密切关注, 我国河北沽源、新疆哈密及张北地区先后都发生过新能源并网相关的振荡问题^[5], 变流器等电力电子设备接入电网使电力系统的动态特性更加复杂, 电力电子设备及其控制系统引起的振荡呈现出宽频段特征, 是涉及多类型设备相互作用、多时间尺度相互耦合、多振荡模式传播广泛的复杂问题^[6]。人们急切希望掌握快速判断

系统稳定性的方法,对“双高”电力系统的故障分析、参数设计以及优化控制等作出指导。

分析系统小扰动稳定性的方法可分为状态空间方法以及传递函数方法,前者以状态变量描述系统动态行为,状态矩阵特征根代表系统振荡模态,特征根全部具有负实部则系统稳定,并且基于参与因子分析可以描述状态量对模态的影响程度^[7-9];后者将系统状态空间简化为输入输出变量的传递函数关系,一对输入输出变量的传递函数关系便是描述系统的一个端口,不同于状态空间需要获取系统完整参数的“白箱”特性,传递函数将系统特性压缩至端口,则分析时只需获得输入输出之间的关系,即具有“黑箱”特性。需要注意端口可以是设备上可直接量测的接口,也可以是相对不易量测但物理意义明确的电气量关系,重点在于选择的传递函数关系对于系统模式具有可观性^[10]。目前学界分析新型电力系统振荡问题常用的端口包括阻抗端口^[11]和转矩系数端口^[12-13],前者使用电压-电流传递函数关系描述系统,将系统从并网点分为两部分,两侧阻抗的关系反映了系统的交互稳定性;后者使用转矩-转子角传递函数关系描述系统,将系统分为机械部分和电气部分,二者的阻尼转矩分量表征系统抑制振荡的能力。本文重点综述这两种端口分析方法的研究现状及关系。

然而两种端口却常应用于不同场景:变流器并网相关的次超同步振荡问题,学界通常用阻抗端口描述;传统电力系统同步电机并网相关的较低频率振荡,学界通常使用转矩系数端口描述^[14]。这表明端口对于场景可能具有一定针对性,使用不同端口描述系统会表现出不同的特点。为了描述端口的这种针对性,应对端口在不同场景下的应用作出评价,而深刻理解阻抗端口和转矩系数端口的本质便是将其应用于不同场景的首要前提。

本文首先介绍阻抗端口即阻抗分析法的发展历程并总结阻抗端口的使用特点,其次归纳转矩系数端口即转矩分析法的应用特点,最后对端口的统一性理论研究进行了讨论,对比分析两个端口对于系统特性描述的联系和区别。

1 阻抗端口理论概述

1.1 阻抗端口的提出

Middlebrook在研究直流系统输入滤波器相关问题时提出了阻抗建模的分析方法^[15],这种方法被拓展到三相交流系统以获得变流器小信号阻抗模型时遇到了问题:电网的交流电特性决定了变流器没有恒定的工作点,相关物理量变化轨迹具有周期性,因此无法对变流器系统使用传统小信号建模方法^[16]。无法直接在交变系统进行小信号建模,因而需要对三相信号进行处理以获取固定工作点,目前学者们通常使用频域推导序阻抗和 dq 轴线性化得到 dq 轴阻抗等方法建立变流器系统阻抗端口模型。

1.2 基于谐波线性化的序阻抗端口模型

将交流量转化到频域可以变为直流量,从而得到固定的工作点,在此基础上可以进行小信号建模。推导系统频域小信号序阻抗模型的方法主要有谐波线性化以及谐波状态空间等,而后一种方法可视为谐波线性化的推广^[17],因此重点关注得到系统序阻抗的谐波线性化方法。需要注意的是,时域的乘积运算对应于频域的卷积运算,因此使用谐波线性化推导变流器序阻抗时常常需要使用频域卷积定理。

文献[18]使用谐波线性化得到了对称运行的两电平并网逆变器的序阻抗模型,由于无零序通路,只需要获得正序和负序的阻抗模型,推导过程中考虑了锁相环动态的作用,得到相域控制和 dq 轴控制两种电流内环控制方式下的序阻抗模型。得到阻抗模型后,变流器及控制系统可等效为电流源并联导纳的形式,而电网自身可等效为电压源串联阻抗的形式,因此整个系统被等效为图1所示的诺顿-戴维南电路,其中: I_i 与 V_g 分别表征变流器系统等效为电流源以及电网等效为电压源; Y_i 和 Z_g 分别代表变流器系统的等效导纳和电网的等效阻抗, I_{out} 为变流器系统注入电网的电流, V_{out} 为并网点电压。

值得注意的是文献[18]推导过程中认为由于正负序扰动作用互不影响,因此得到的正负序阻抗是解耦的,也就是使用图1分析系统特性时需要将 Y_i 分别带入正序导纳和负序导纳,即需要分别

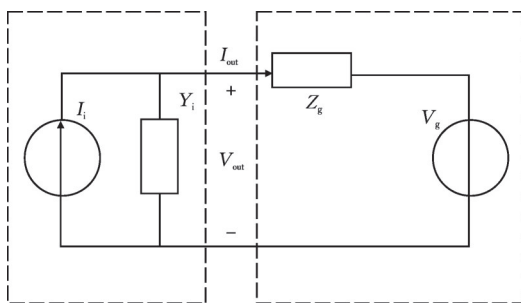


图1 变流器并网系统小信号等效电路

Fig.1 Small-signal equivalent circuit of a grid-connected converter system

判断正序、负序阻抗与电网的交互关系。

阻抗模型的主要应用之一就是判断系统交互稳定性, 变流器注入电网电流 I_{out} 表达式为:

$$I_{out} = [I_i - V_g Y_i] \frac{1}{1 + Y_i Z_g} \quad (1)$$

式(1)中 $[I_i - V_g Y_i]$ 是变流器接入理想电网时的注入电流, 由于变流器接入理想电网时是稳定的且电网不带负载时也是稳定的, 故系统稳定性由式(1)右侧的导纳-阻抗传函决定, 此时可由简单闭环框图描述系统稳定性, 如图2所示, 故可使用奈奎斯特判据判断系统的交互稳定性^[11]。

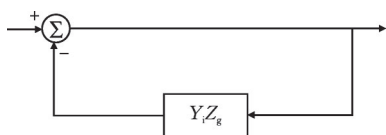


图2 阻抗端口等效框图

Fig.2 Equivalent block diagram of an impedance port

序阻抗端口模型被提出后受到广泛关注, 被应用于三相LCL型并网逆变器^[19]、模块化多电平换流器^[20]、双馈风机^[21]和虚拟同步发电机^[22]等装备的并网场景。

以上获取新能源装备阻抗端口模型的众多方法大多假设系统是三相平衡对称的, 然而实际系统往往存在一定程度的不对称, 文献[23]指出考虑不对称时正序阻抗和负序阻抗之间会存在耦合, 即变流器阻抗变为二阶阻抗矩阵形式, 通过理论计算和数值仿真发现相比于对角项, 耦合项数值较小, 考虑到实际电网不对称程度有限即负序电压较小, 且现代并网手段一般保证跟踪正序轨迹即拥有一定能抑制负序能力, 因此忽略了变流器

阻抗模型的耦合项, 由于考虑负载不对称导致的电网阻抗耦合, 稳定性判据中的 $Y_i Z_g$ 依然是二阶矩阵形式, 因此需要使用GNC(广义奈奎斯特判据)判断系统交互稳定性^[24]。忽略耦合项会造成精度损失, 在一些情况会出现判稳错误, 文献[25]在此基础上考虑了电网电压不对称及电感饱和引起的变流器电感不对称的情况, 在建模过程中考虑了正序和负序之间的耦合, 得到了不平衡工况下的变流器阻抗端口模型。

在序阻抗推导过程中, 锁相环动态作用体现在输入控制系统的派克变换和生成调制信号的派克逆变换中, 由于派克变换是时域乘积变换, 考虑锁相环动态是获得序阻抗端口模型的难点。文献[26]指出当电网阻抗可忽略时锁相环动态不会影响系统稳定性, 然而变流器常并入弱电网的现实情况使得并网点电压和注入电网电流相互影响, 锁相环和电流内环之间、变流器阻抗和电网阻抗之间均存在相互作用, 因此不能忽略锁相环动态。而锁相环动态是引起变流器阻抗端口模型频率耦合现象的重要原因。

传统的序阻抗建模认为正序扰动频率和负序扰动频率是不相关的, 得到的阻抗端口模型在正序和负序是解耦的, 然而文献[27]指出即使工作于三相平衡系统, 正序和负序阻抗之间也存在耦合关系, 如果忽略这种耦合关系有时会得到错误的判稳结果, 并且指出正负序之间的频率耦合是锁相环的存在导致。为了描述正负序之间的耦合关系, 学界对频率耦合现象作出了较多讨论^[28-31]。文献[28]指出忽略频率耦合与控制外环的阻抗端口模型在中低频段准确度有限。文献[29]指出控制系统在 dq 轴的不对称会导致正负序之间的频率耦合, 而锁相环利用 q 轴电压实现电网电压定向, 控制系统常采用直流电压环输出 d 轴指令电流, 使得频率耦合现象无法避免, 通过谐波线性化获得了考虑锁相环影响、电流内环 dq 轴参数不对称以及电压外环影响的正负序阻抗端口模型, 由于阻抗端口模型是二阶矩阵, 也需要使用GNC判断系统稳定性。文献[30]对频率耦合机理作出了阐释: 锁相环 dq 轴的不对称导致扰动电压产生两个频率的扰动电流, 而两个扰动电流通过电网阻抗作用又在并网点对应两个扰动电压, 由此实现了

两个频率之间的耦合。由于电网阻抗在正负序是解耦的,因此利用电网阻抗上的KVL(基尔霍夫电压定律)约束可以实现变流器输出阻抗的解耦,得到解耦的正负序阻抗表达式,避免了使用GNC判断系统稳定性而可以直接用奈奎斯特判据判定。文献[31]也基于这种解耦思想,考虑更加复杂的现代控制技术,推导了含解耦双同步参考坐标系锁相环在内的变流器阻抗模型,拓宽了该思想的应用范围。然而需要指出的是文献[30-31]使用电网阻抗约束实现变流器正负序阻抗的解耦,这种做法削弱了并网点两侧阻抗的独立性,而工程上往往希望得到独立的并网点两侧阻抗。

1.3 基于 dq 轴线性化的 dq 阻抗端口模型

将三相交流量经过派克变换也可以得到稳定的工作点,进而进行系统小信号建模^[32]。文献[33]在将交流量转化到 dq 轴上后,考虑锁相环动态引起的控制系统 dq 旋转坐标和实际电网 dq 旋转坐标之间的差异,推导了三相并网变流器 dq 轴阻抗模型,得到的变流器阻抗模型是耦合的二阶矩阵形式,且将三相量转化到 dq 轴后电网阻抗也可以由二阶矩阵描述^[34],故系统稳定性可由广义奈奎斯特判据判断^[24],指出锁相环带宽增加导致变流器阻抗矩阵中 q - q 通道阻抗表现为负电阻特性的范围增加,系统因此失稳。

值得一提的是,新能源并网装备表现出负电阻特性引起系统失稳是阻抗模型解释系统稳定性机理的一个重要分析角度^[35]。如果能将系统等效为解耦阻抗的确可以从电路谐振角度分析系统失稳机理,然而实际考虑频率耦合得到的序阻抗以及 dq 阻抗都是耦合的二阶阻抗矩阵,因此用负电阻解释失稳机理不够直观。

如上述, dq 阻抗得到的二阶阻抗矩阵使阻抗端口模型物理意义较为薄弱,为增强 dq 阻抗可解释性并简化计算,文献[36]提出了一种阻抗端口简化方法,基于线性控制系统的可叠加性,将系统导纳分为未考虑锁相环动态的导纳 Y_1 和锁相环动态引起的附加导纳 Y_2 ,由于锁相环仅由 q 轴控制,因此 Y_2 仅有与 q 轴电压扰动有关的两项,而经分析发现这两项分别与注入无功和有功强相关,因此 Y_2 具有非常强的物理意义,由于未考虑锁相环动态部分阻抗 Z_1 的非对角元素较小,故忽略 Z_1

耦合项,系统阻抗耦合项由 Y_2 提供,因此得到的二阶矩阵仅有三个元素,并且发现 q - q 通道阻抗在低频段的负电阻完全由锁相环动态部分阻抗引起,解释了文献[33]的现象。当然其推导过程中忽略延时、滤波环节会导致其在高频段的准确度有限。

由于实际的三相交流系统中并没有 dq 轴物理量,因此 dq 阻抗不如序阻抗易测量。文献[37]提出了一种测量变流器系统 dq 阻抗的方法:首先在并网点注入 d 轴扰动,将此扰动变换到三相坐标中注入电网,测量并网点电压信号以及两侧电流信号并将其转化回 dq 轴并记录信号值,再对 q 轴进行同样的操作,得到两组电压电流扰动信号,由于两次测量时阻抗是相同的因此联立两组信号可解得 dq 阻抗。文献[38]提出了一种基于知识和数据联合驱动的 dq 阻抗获取方法,基于知识驱动确定模型输入变量,从而避免纯数据驱动导致模型输入变量可解释性差的问题,然后基于数据驱动建立获得 dq 阻抗的机器学习模型,从而避免阻抗端口模型建立对系统参数的依赖,兼顾了准确性与便捷性。变流器 dq 阻抗还面临的问题是推导过程基于变流器小信号模型,这将限制其仅能用于三相平衡系统中^[39]。

综上可知, dq 阻抗应用范围受限、物理意义相对弱以及测量不够直观的缺点导致其应用少于序阻抗,尽管序阻抗的建模过程更加复杂。

1.4 其他阻抗端口分析方法以及阻抗端口方法面临的挑战

文献[40]使用复矢量和复传递函数描述了三相系统,给出了静止坐标系和旋转坐标系下电气量的变换关系,为阻抗端口模型的建立提供了一种全新的视角。在此基础上,文献[41]揭示了序阻抗和 dq 阻抗的关系,得到了系统的 $\alpha\beta$ 坐标系阻抗端口模型。由于采用复矢量描述,得到的阻抗模型用于描述频率耦合现象十分方便。并且指出与旋转坐标系控制系统中的 I 调节器相比,静止坐标系控制系统中的 R 调节器可增强系统鲁棒性。文献[42]基于复矢量的思想,对永磁直驱同步发电机稳态运行轨迹使用谐波线性化,推导了其阻抗端口模型。文献[43]同样使用复矢量描述变流器并网系统电路结构,结合框图化简以及电路等

效变换将系统控制策略等值为电路元件,得到仅由阻抗和受控源描述的阻抗回路模型,从而避免了使用一个复杂的系统阻抗传递函数描述整个变流器系统,有利于具体分析控制环的作用以作出针对性的参数优化。

极坐标也是描述电气量的一个角度,文献[44]推导得出了变流器在极坐标下的阻抗,得到的变流器阻抗端口模型同样是二阶耦合矩阵形式。然而阻抗矩阵耦合的原因不同于序阻抗和 dq 阻抗,极坐标下阻抗是与功率因数角相关的量,因此如果变流器功率因数为0或者 ± 1 时可实现阻抗矩阵的解耦。又因为许多场景下变流器功率因数均为1,即控制变流器注入有功而令无功为0,因此极坐标下的变流器阻抗矩阵实现解耦是具有现实意义的。在极坐标阻抗基础上定义了系统的广义阻抗以使电网阻抗也实现解耦,之后通过严格数学变换手段实现了系统特征方程的降阶。一阶系统特征方程使得电路谐振角度分析系统稳定性机理更加直观,并且避免了GNC的使用,系统稳定性由广义阻抗奈奎斯特判据决定。同时指出序阻抗、 dq 阻抗以及广义阻抗等不同的阻抗端口判稳方法,在数学本质上都是对系统特征方程的分析,其差异体现在阻抗端口矩阵耦合项的处理:忽略频率耦合的序阻抗忽略了阻抗矩阵的耦合项; dq 阻抗和考虑频率耦合的序阻抗均使用二阶矩阵描述系统特性,二者实质上可通过数学变换实现统一^[41];而广义阻抗从定义上实现了变流器阻抗矩阵的解耦,且使用矩阵变换以及特征方程降阶等方法实现了多入多出系统稳定性判据的简化。值得注意的是,其实现特征方程降阶的方法体现了解决一类问题的数学思想,是一种非常好的思路。在此基础上,文献[45]针对含串补电容的变流器并网场景,使用广义阻抗得到系统等效单入单出模型,分析了系统稳定性情况,指出弱电网下串补电容与锁相环的动态存在耦合,这弱化了系统的小扰动稳定性,并给出了提升系统稳定性的参数优化方法。

需要指出的是,以上阻抗端口模型在被提出时均只针对单变流器并网系统,阻抗端口模型应用于多机系统面临不同变流器自身坐标系不对齐以及系统源荷界限模糊的问题。文献[46]针对这

两个问题,提出一种动态嵌入方法将所有设备局部坐标转换到同一个坐标系下,实现了所有设备阻抗模型的对齐。并将所有并网设备的阻抗模型合并为一个对角阻抗矩阵,使用复频域节点导纳矩阵描述网络对于每个设备端口小信号的反馈作用,从而建立起了能够描述多机系统小信号稳定性的全系统导纳矩阵。并指出对角线元素阻抗频谱中的谐振峰值描述了系统的振荡模式,谐振峰值大小代表该设备对此振荡模式的参与程度。基于此,文献[47]通过严格数学推导证明了系统特征值变化量跟设备阻抗变化量以及该阻抗关于全系统导纳矩阵的留数有关,由后者引出阻抗参与因子的概念,从而建立起能够描述并网设备对振荡模式影响的灰盒模型。若得知设备阻抗关于具体参数的偏导数,则可以根据分析该参数对振荡模式的作用从而指导参数优化。文献[48]进一步指出了灰盒模型和其他基于阻抗的多机系统分析方法间的共同点,并定义了系统中串联设备的阻抗参与因子,扩展了灰盒模型的应用范围。

阻抗端口考察的是电压和电流特性,不能反映系统动态过程中锁相角等关键物理量的特性,因此阻抗端口对于系统失稳物理机理的分析存在局限性^[49];除此之外,易于工程测量在无法获得系统完整参数的背景下是优势,然而测量估计方法必然带来误差累积影响,这会影响端口建模的准确性;作为传递函数方法,零极点相消影响分析结果是无法回避的问题,选择不同端口可能导致不同零点的出现,从而忽略一些振荡模式^[50];作为频域分析方法,常用奈奎斯特判据以及波特图稳定裕度判据作为系统稳定性判据,而开环右半平面零极点的存在会使这些判据无法准确反映系统稳定性^[51],即非最小相位系统对阻抗端口的应用带来挑战。

2 转矩系数端口理论概述

Canay提出了具有明确物理意义的复转矩系数法,将电磁转矩关于转子角和角速度的传递函数分别定义为电气同步转矩系数和电气阻尼转矩系数,机械转矩同理,系统被等效为图3所示形式,其中 ΔT_m 和 ΔT_e 分别为机械转矩变化量和电磁转矩变化量, $\Delta \delta$ 为转子角变化量, K_M 和 K_E 分别为机

机械转矩系数和电磁转矩系数。

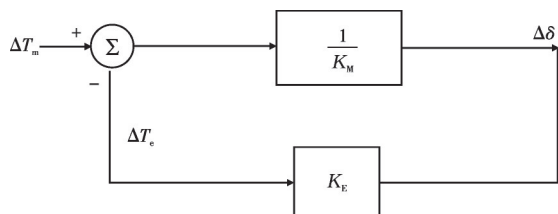


图3 转矩系数端口等效框图

Fig.3 Equivalent block diagram of a torque coefficient port

在同步转矩系数之和为零的情况下，如果阻尼转矩系数之和小于零，则系统不稳定^[52]。由于分析系统转矩和转子角等物理量，复转矩系数法在同步电机轴系稳定性问题上具有明确的物理意义，广泛应用于同步电机的次同步振荡问题分析中^[53]。由于复转矩系数法是基于物理意义提出的，并没有数学理论支撑。图3的端口等效框图表明系统的特征方程是转矩系数之和为零，在此基础上文献[54]依据牛顿-拉夫逊法思想求解系统特征根的修正值，若认为特征根实部初值为零，则修正量的符号决定特征根的正负。经推导得知系统同步转矩系数为零的条件下，特征根实部修正量的符号取决于阻尼转矩系数和同步转矩系数在此频率下偏导数的乘积。而后者通常小于零，因此阻尼转矩系数是否大于零将决定系统能否维持稳定，从数值分析的角度解释了复转矩系数法的理论基础。

严格意义上复转矩系数法需要考虑机械部分和电气部分对应的转矩分量，但是实际分析低频振荡时人们通常只考虑电磁转矩，甚至只考虑电磁转矩中的阻尼转矩分量。文献[7]在分析单机并网系统小扰动稳定性时便基于电磁转矩关于转子角和转速的传递函数判断系统是否稳定，相当于只使用复转矩系数法中的电气同步转矩系数和电气阻尼转矩系数。其推导稳定性判据时将系统化简为图4所示的二阶系统框图形式，其中 H 为惯性时间常数， s 为复频域算子， ω_0 为稳态同步电机角速度， K_e 为电气同步转矩系数， D_e 为电气阻尼转矩系数。

求解系统特征根可知阻尼比正负号取决于电气阻尼转矩系数的符号，无阻尼自然振荡频率取决于电气同步转矩系数。因此其分析系统稳定性

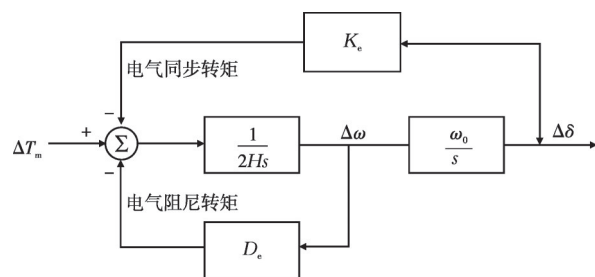


图4 同步电机二阶等效框图

Fig.4 Equivalent block diagram of the second-order system of a synchronous motor

时考察特定复频率下的电气转矩系数，并且考察电气阻尼转矩系数可以分析系统阻尼影响因素。文献[55]称这种方法为转矩分量法，并指出电气同步转矩为系统提供维持同步的能力，电气阻尼转矩提供抑制振荡的能力。需要指出的是，文献[7]将系统等效为图4所示二阶系统并求解阻尼比得出阻尼转矩系数判据，认为电气同步转矩系数 K_e 和电气阻尼转矩系数 D_e 都是与复频率无关的常数。而当系统较复杂时这个前提显然是不成立的，即 K_e 和 D_e 是复频率算子 s 的函数，因此转矩分量法的数学基础实际上是不够严密的，学者们在分析转矩系数时通常考虑特定复频率下的数值，即考察特定模式下的转矩系数。由于文献[54]和文献[7]并没有使用相同的数学方法给出转矩系数端口的数学原理且转矩分量法本身缺乏严格的数学支撑，因此从数学证明上不易直接看出复转矩系数法和转矩分量法的一致性，考虑图3的物理意义，由图4可知机械转矩系数满足：

$$K_M = \frac{2Hs^2}{\omega_0} \quad (2)$$

在图3求和符号处有：

$$\frac{2H}{\omega_0} s^2 \Delta\delta = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (3)$$

式中： $\frac{2H}{\omega_0}$ 在物理意义上属于系统转动惯量。

故可知转矩分量法考察电磁转矩变化量本质上就是考察发生扰动时系统能否产生正制动转矩抑制振荡，即转矩分量法相当于是复转矩系数法忽略机械部分时的简化应用^[56]，且这种简化具有实际物理意义，下文不再作严格区分。

转矩系数端口是转矩和转子角之间的传递函数关系，单机无穷大系统中转矩是单同步电机转

子角的函数,而多机系统中转矩与多台同步电机转子角均有关,基于此有学者认为复转矩系数法推广至多机系统是存在局限的,应用前提是将待考察同步机外的系统等值为恒频率电源,即忽略其余同步机转子角变化^[57]。许多学者针对复转矩系数法推广至多机系统的问题作出了研究,文献[58]依据惯性中心将多机系统等值为加速机群和减速机群,两个机群可按照单机处理,因此系统被等效为两机系统,推广了阻尼转矩的概念。文献[59]针对文献[57]中提到的问题,经推导指出复转矩系数法应用于多机系统的条件是系统渐进稳定。应用复转矩系数法分析多机系统时,难以评估机组之间的相互影响,文献[13]基于灵敏度分析提出了一种改进复转矩系数法,考察风机并网发生功率扰动时造成的模态变化和阻尼转矩系数之间的关系,得到模态变化的表达式进而判断系统稳定性,此时阻尼转矩系数可评估风机和同步机之间的交互影响。文献[60]针对风火打捆经串补并网系统,将火电机组复频域模型推广至双馈风机中,提出了一种适用于双馈风机且可分析多机系统的分散消元式复转矩系数法,从阻尼层面分析了双馈风机并网导致火电机组次同步振荡的机理。

实际上转矩系数端口更多用于分析单机并网稳定性情况,文献[57]提出在时域获得系统的转

矩系数端口的测试信号法,即通过注入小扰动并测量系统的转矩、转子角变化信号,结合傅里叶变换得到系统转矩系数。工程上常使用测试信号法获得整个次同步频段内的电气阻尼转矩系数,避免了求解同步转矩系数为零的频率,阻尼系数为负的频率即存在失稳风险的频率^[61-63];而分析系统阻尼不足的机理时常采用文献[7]中的方法,通过建模获得系统框图,进而获得电气阻尼转矩分量传递函数的解析表达,考察系统阻尼不足的原因并指导系统参数优化^[64]。在火电机组并网方式呈现出多样化的新型电力系统中,复转矩系数法的应用场景也得到了拓展,文献[65]针对火电机组经柔直并网系统,使用复转矩系数法分析柔直对系统电气阻尼的作用,并提出了一种柔直变流器功率外环附加阻尼的次同步振荡抑制策略。

前文介绍了阻抗端口和转矩系数端口的研究现状,总结端口视角下系统稳定性研究方法于图5,其中:并网点电压 ΔV 和电流 ΔI 之比为阻抗端口,变流器系统中依据测量电流的不同阻抗端口将系统划分为变流器侧和电网侧,分别用下标 i 和 g 表示;转矩变化量 ΔT 和转子角变化量 $\Delta\delta$ 之比为转矩系数端口,同步电机系统中依据转矩物理性质不同将系统划分为机械子系统和电气子系统,分别用下标 M 和 E 表示。

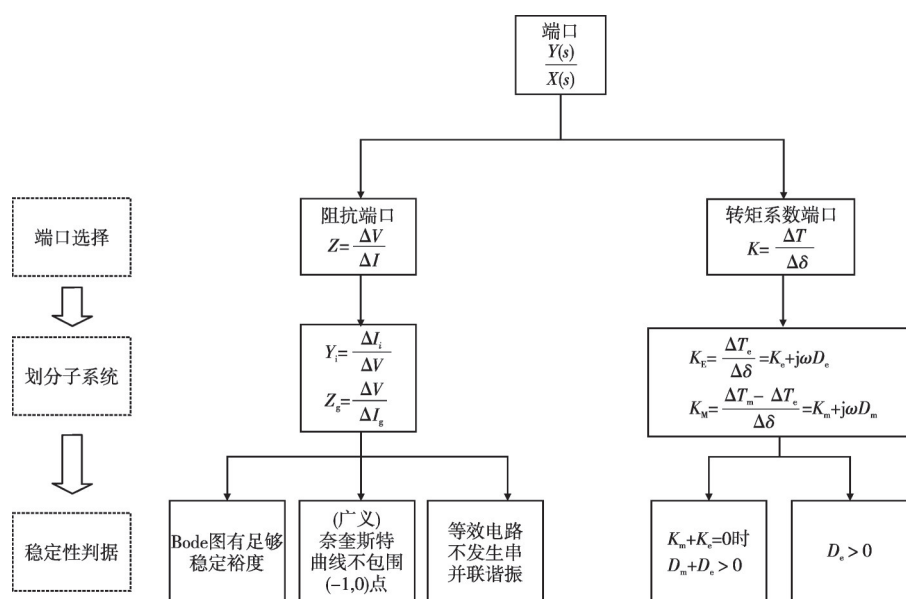


图5 端口视角下的电力系统稳定性分析方法

Fig.5 Stability analysis method of power systems from a port-based perspective

3 端口的统一性研究概述

对于阻抗端口和转矩系数端口的统一性理论研究已有展开,文献[66]对阻抗端口和转矩系数端口的模型和判稳条件进行了比较,指出两端口在判稳结果上是一致的。文献[67]进一步指出通过数理方法将复杂系统简化为单入单出系统并使用端口描述系统在稳定性判断结果上是一致的,但是选择不同端口在不同物理量引起的振荡问题上表现出标称性和鲁棒性的差异,即不同端口对于不同物理特性描述效果存在差异。

阻抗端口可用于判稳而难以深究稳定性机理,因为其缺乏对振荡关键物理量的描述;而转矩系数端口描述转矩和转子角之间的关系,考察阻尼转矩有利于分析系统阻尼,即转矩系数端口能够探究系统阻尼不足的原因,因此将变流器并网系统等效为图4所示的二阶模型有利于探究变流器系统的交互稳定性^[68]。锁相环的二阶动态特性与同步电机转子运动方程在形式上具有很高的相似性,因此目前使用转矩系数端口分析变流器并网稳定性的文献大多将锁相环二阶方程等效为与图4形式上一致的框图,之后再考虑电流内环、电压外环以及网络动态等环节的作用^[69-71]。文献[69]基于变流器系统 dq 坐标下的小信号模型,将锁相环二阶动态特性部分等效为变流器固有同步转矩系数和固有阻尼转矩系数,将电流内环和网络动态约束等效为附加阻尼转矩系数,分析锁相环自然振荡频率下的系统阻尼情况,以判断系统在不同条件下的稳定性。在此基础上,文献[70]重点考察变流器系统电路参数和控制系统参数满足一定比例关系的情况,系统稳定性可由锁相环参数和该比例系数关系判断。前文提到,对于复杂系统而言,将系统电气同步转矩系数和电气阻尼转矩系数是否大于零作为系统是否稳定的条件是缺乏严格数学依据的,因为其需要预先将转矩系数函数的变量 s 赋值为待考察特征根。文献[71]通过求解阻尼比得出系统稳定域,指出转矩系数均大于零的范围和实际稳定域存在偏差,前者并不能完全包含后者,因此使用转矩分析可能得到错误的判稳结果。之后提出了一种结合系统参数的修正复转矩系数法,提出的修正复转矩系数均大于零的

范围能够包含系统实际稳定域。文献[72]重点考察以锁相环、电压外环为代表的较慢动态和电流内环、网络动态为代表的较快动态之间的关系,基于小信号模型将系统化简为以锁相环输出角度和电流内环 d 轴电流为变量的二阶模型,使用转矩分析法分析了两种动态之间的相互作用。针对虚拟同步发电机并网系统,文献[73]使用复转矩系数法分析了内环控制对系统稳定性的影响,指出电压环带宽较低会导致系统失稳,并给出了可提升系统稳定性的控制参数优化方法。同样为了探究虚拟同步发电机并网失稳的物理机理,文献[74]通过复转矩系数法分析指出固定虚拟阻抗无法提供额外正阻尼转矩,提出了一种在虚拟阻抗中添加低通滤波器分量的改进方法,可以为系统提供正阻尼转矩以增强稳定性。文献[75]提出了一种端口映射方法,基于此将复转矩系数法推广至含同步机及变流器的复杂电网中,得到了可以反映网络动态的广义转矩系数端口,从而可以深入分析系统稳定性机理,并指出某一端口处的正阻尼效应可能在其他端口表现为负阻尼,进而不利于系统总体的稳定性。

由上述分析可知,转矩系数端口虽然可以探究系统的稳定性机理,然而缺乏严格的数学理论支撑。这是因为在得到图3所示框图后,其尝试从物理意义角度解释系统稳定性,而不是给出系统特征值实部符号的等价条件。应认为对图3所示框图使用奈奎斯特判据同样可以判断系统稳定性,但是这样做难以给出阻尼的概念,使判据缺乏物理上的可解释性;在同步电机并网系统中描述转矩-转子角关系因而具有很强的物理意义,但是在变流器并网系统中并没有转矩的概念,将转矩系数端口应用于变流器并网系统的工作大多考察的并非转矩系数,而单纯是与角度、角速度相关的传递函数,即转矩系数端口物理意义变弱;工程上使用转矩系数端口研究旋转电机并网稳定性时常对次同步振荡频率段使用测试信号法,而目前学界针对变流器系统相关工作大多基于已知控制系统完整参数,这与状态空间方法没有本质区别,即虽然分析了影响系统阻尼的因素,但是失去了作为端口分析方法的便捷性;目前对变流器系统使用转矩系数端口常考察锁相环自然振荡频率附

近的阻尼情况, 这是因为文献大多考察锁相环主导振荡模态为系统主导极点的情况^[69], 然而电力电子设备大量接入的新型电力系统呈现出振荡频带较宽的特点, 这也弱化了转矩系数端口在工程上应用方便的优点。

目前将阻抗端口应用于同步电机并网系统场合的研究还相对较少, 在获得变流器阻抗端口模型时普遍认为并网点两侧的系统相互独立, 之后分别获得各自的阻抗特性从而判断系统的交互稳定性, 应认为将并网点两侧视作独立子系统本质上是忽略了状态空间模型中的一些约束。同步电机并网系统的状态空间模型理论已经非常完善^[7], 由派克变换电压方程和网络动态约束可以得到两组电压电流关系, 可认为两者分别对应同步电机阻抗和系统阻抗, 通过化简状态空间模型可以得到 dq 轴的同步电机阻抗模型, 其中网络动态约束涉及到转子角的扰动量, 而由转子运动方程和电磁转矩方程可知, 转子角扰动量本质是同步电机电气量的函数, 即严格意义上分析无法得到独立的并网点两侧子系统, 需要使用 GNC 进行判稳, 也就是说阻抗端口模型可以分别考查并网点两侧阻抗的应用便捷性在同步电机系统中变差, 而且从物理意义上分析同步电机系统稳定性问题多为轴系相关稳定性问题, 使用转矩描述轴系稳定性物理意义更加清晰, 阻抗端口的优势不够明确。则可总结不同场景下端口特点如表 1 所示。

从获得端口的数学本质上看, 阻抗端口和转矩系数端口均属于小扰动稳定性分析手段, 本质上都是基于状态空间化简得到的, 二者在端口获得时均存在针对性简化, 比如阻抗端口认为变流器系统源荷分离, 转矩系数端口认为同步机系统网络动态响应速度快因此将其忽略等; 从稳定性判断方法的数学本质上看, 阻抗端口从整体出发, 对并网点两侧的阻抗之比使用奈奎斯特判据判断系统稳定性, 这种判稳方法在数学上是严密的, 然而无法深入探究具体参数的影响, 而转矩系数端口将机械转矩和电磁转矩分为同步分量和阻尼分量, 后者与系统阻尼比有关, 即影响特征根实部从而影响系统稳定性, 分析阻尼转矩分量的正负从而判断系统稳定性, 这种方法虽然深入研究了系统振荡失稳的机理, 然而缺乏严格数学证明。因此可以总结端口应用特点: 转矩系数端口应用

表 1 端口特性对比

Table 1 Comparison of port characteristics

特点	阻抗端口		转矩系数端口	
	变流器	同步机	变流器	同步机
理论基础	小信号建模	小信号建模	小信号建模	小信号建模
稳定性判据	奈奎斯特判据	广义奈奎斯特判据	阻尼转矩系数是否大于零	阻尼转矩系数是否大于零
判据本质	数学建模	数学建模	数值分析	数值分析/物理意义
工程实用建模方法	并网点端口测量	强耦合, 不易测量	宽频段, 扫频困难	预估频段扫频
前馈传函和反馈传函的意义	并网点两侧阻抗函数	并网点两侧二阶阻抗矩阵	基于形式类比, 无实际意义	反馈传函代表系统制动转矩
前馈传函和反馈传函是否相对独立	是	否	否	是
物理意义是否清晰	是	否	否	是

于同步电机并网系统时具有物理意义明确、工程应用方便以及可考察系统阻尼影响因素等优点, 应用于变流器系统时虽然能够探究系统阻尼不足的机理, 却失去了清晰的物理意义并且在振荡频带较宽的新型电力系统背景下应用受限; 阻抗端口有严格的稳定性判据, 在变流器系统中将系统等效为独立子系统有利于宽频建模和工程量测, 然而这个优势在同步电机系统的实用性尚不明确, 并且其难以考察系统稳定机理的缺点使其在可解释性上逊于转矩系数端口。

4 结语

含高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统正面临新的挑战, 在分析系统稳定性的方法中, 可提供端口测量手段的阻抗分析法和转矩分析法得到重视, 然而这两种方法分别基于阻抗端口和转矩系数端口描述系统, 本文试对端口的特性展开综述。

本文首先介绍了阻抗端口在变流器系统中的发展应用, 分别总结了序阻抗、 dq 阻抗以及其他阻抗端口的特点; 之后介绍同步电机的转矩系数端口, 指出复转矩系数法和转矩分量法的一致性; 最后对端口的统一性研究现状做出介绍, 分析了阻抗端口和转矩系数端口在不同场景下的优缺点,

端口选择在稳定性判断结果上是一致的,但是阻抗端口更适用于变流器系统而转矩系数端口更适用于同步电机系统,即端口对于研究场景表现出一定的针对性。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 国家能源局.国家能源局发布2023年全国电力工业统计数据[EB/OL].(2024-01-26)[2024-07-01].http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [3] 李军军,吴政球,谭勋琼,等.风力发电及其技术发展综述[J].电力建设,2011,32(8):64-72.
LI Junjun, WU Zhengqiu, TAN Xunqiong, et al. Review of wind power generation and relative technology development [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-72.
- [4] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [5] 李海盼,年珩,胡彬,等.风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述[J].新型电力系统,2023(3):237-255.
LI Haipan, NIAN Heng, HU Bin, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power gridconnected systems [J]. New Type Power Systems, 2023(3): 237-255.
- [6] 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.
- [7] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. 中国电力出版社, 1994: 504-534.
- [8] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [9] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [10] GU Y J, GREEN T C. Power system stability with a high penetration of inverter-based resources [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 832-853.
- [11] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [12] 王波,卢继平,龚建原,等.含双馈机组转子侧附加控制的风电场次同步振荡抑制方法[J].电网技术,2013,37(9):2580-2584.
WANG Bo, LU Jiping, GONG Jianyuan, et al. A method to suppress sub-synchronous oscillation of wind farm composed of doubly fed induction generators with additional rotor side control [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2580-2584.
- [13] 王一珩,杜文娟,陈晨,等.基于改进复转矩系数法的风电场并网引发电力系统次同步振荡研究[J].电工技术学报,2020,35(15):3258-3269.
WANG Yijun, DU Wenjuan, CHEN Chen, et al. Study on sub-synchronous oscillations of power systems caused by grid-connected wind farms based on the improved complex torque coefficients method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3258-3269.
- [14] 陈新,王赞程,龚春英,等.采用阻抗分析方法的并网变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [15] MIDDLEBROOK R. Input filter considerations in design and application of switching regulators [C]//PESC'76, IEEE Power Electronics Specialists, Conference. 1976.
- [16] SUN J. Small-signal methods for AC distributed power systems-a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [17] FANG Q, XING F C, JIANG Z, et al. Equivalence analysis of different sequence impedance modeling methods [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). May 12-14, 2023, Hefei, China. IEEE, 2023: 3800-3805.
- [18] CESPEDDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [19] 王赞程,陈新,陈杰,等.基于谐波线性化的三相LCL型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5890-5898.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis

- of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898.
- [20] 吕敬, 蔡旭, 张占奎, 等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3771-3780.
- LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3771-3780.
- [21] 杨洪雨. 双馈异步发电系统阻抗建模及稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of doubly-fed asynchronous generator system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [22] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.
- LIU Xin, GUO Zhibo, JIA Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146.
- [23] CÉSPÉDES M, SUN J. Methods for stability analysis of unbalanced three-phase systems [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). September 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA. IEEE, 2012: 3090-3097.
- [24] WEN B, BOROEYEVICH D, MATTAVELLI P, et al. Experimental verification of the Generalized Nyquist stability criterion for balanced three-phase ac systems in the presence of constant power loads [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). September 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA. IEEE, 2012: 3926-3933.
- [25] 年珩, 杨洪雨. 不平衡运行工况下并网逆变器的阻抗建模及稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 76-83.
- NIAN Heng, YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected inverters under unbalanced operation conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40: 76-83.
- [26] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [27] 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.
- [28] 刘威, 谢小荣, 黄金魁, 等. 并网变流器的频率耦合阻抗模型及其稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 138-146.
- LIU Wei, XIE Xiaorong, HUANG Jinkui, et al. Frequency-coupled impedance model and stability analysis of grid-connected converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 138-146.
- [29] 年珩, 徐韵扬, 陈亮, 等. 并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1421-1432.
- NIAN Heng, XU Yunyang, CHEN Liang, et al. Frequency coupling characteristic modeling of grid-connected inverter and system stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1421-1432.
- [30] 邹小明, 杜雄, 王国宁, 等. 三相并网逆变器频率耦合机理分析及稳定性判定[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 57-63.
- ZOU Xiaoming, DU Xiong, WANG Guoning, et al. Frequency coupling mechanism analysis and stability judgement for three-phase grid-connected inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 57-63.
- [31] 武相强, 王赞程, 陈新, 等. 考虑频率耦合效应的三相并网逆变器序阻抗模型及其交互稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1605-1616.
- WU Xiangqiang, WANG Yuncheng, CHEN Xin, et al. Sequence impedance model and interaction stability research of three-phase grid-connected inverters with considering coupling effects [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1605-1616.
- [32] BELKHAYAT M. Stability criteria for AC power systems with regulated loads [M]. Purdue University, 1997.
- [33] WEN B, BOROEYEVICH 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.
- [34] SCHWEIZER M, KOLAR J W. Shifting input filter resonances-An intelligent converter behavior for maintaining system stability [C]//The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-June 21-24, 2010. Sapporo, Japan. IEEE, 2010: 906-913.
- [35] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):

- 2366-2372.
- [36] 曾志杰,肖华锋,高博,等.并网逆变器小信号建模简化方法与应用[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7002-7011.
ZENG Zhijie, XIAO Huafeng, GAO Bo, et al. Simplified small-signal modeling method of grid-connected inverters and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21):7002-7011.
- [37] FRANCIS G, BURGOS R, BOROEYEVICH D, et al. An algorithm and implementation system for measuring impedance in the D-Q domain[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. September 17-22, 2011. Phoenix, AZ, USA. IEEE, 2011:3221-3228.
- [38] 吴滨源,李建文,李永刚,等.基于知识和数据联合驱动的并网逆变器多工况阻抗获取方法[J].电力系统自动化,2022,46(6):83-91.
WU Binyuan, LI Jianwen, LI Yonggang, et al. Combined data-knowledge-driven impedance acquisition method for grid-connected inverter under multiple operation conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 83-91.
- [39] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [40] HARNEFORS L. Modeling of three-phase dynamic systems using complex transfer functions and transfer matrices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4):2239-2248.
- [41] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2):1775-1787.
- [42] 苏晨博,刘崇茹,王瑾媛,等.考虑频率耦合特性的 D-PMSG 复数域阻抗建模及其特征分析[J].电力系统自动化,2024,48(10):118-128.
SU Chenbo, LIU Chongru, WANG Jinyuan, et al. Impedance modeling of direct-drive permanent magnet synchronous generator in complex field and its feature analysis considering frequency coupling characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10):118-128.
- [43] LI Y T, GU Y J, ZHU Y, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3):3377-3395.
- [44] 辛焕海,李子恒,董炜,等.三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1277-1292.
XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1277-1292.
- [45] 赵永光,艾力西尔·亚尔买买提,汤波,等.串补电容对锁相环主导下变流器振荡问题的影响分析[J].电力自动化设备,2024,44(6):102-109.
ZHAO Yongguang, YAERMAIMAITI Ailixier, TANG Bo, et al. Analysis of influence of series complement capacitor on converter oscillation dominated by phase locked loop [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6):102-109.
- [46] GU Y J, LI Y T, ZHU Y, et al. Impedance-based whole-system modeling for a composite grid via embedding of frame dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1):336-345.
- [47] ZHU Y, GU Y J, LI Y T, et al. Participation analysis in impedance models: the grey-box approach for power system stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1):343-353.
- [48] ZHU Y, GU Y J, LI Y T, et al. Impedance-based root-cause analysis: comparative study of impedance models and calculation of eigenvalue sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2):1642-1654.
- [49] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5145-5154.
- [50] CHEN Q, BU S, CHUNG Y C. Small-signal stability criteria in power electronics-dominated power systems: a comparative review[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(4):1003-1018.
- [51] MIAO L J, XIN J Z, ZHAO B H. Revisit nyquist-bode stability criteria for power electronic system with non-minimum phase system[C]//2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). November 25-28, 2019. Singapore, Singapore. IEEE, 2019:1-6.
- [52] CANAY I. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part I: theory [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1982, 101(10):3630-3638.
- [53] 陈陈,杨煜.几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J].电网技术,1998,22(8):10-13.
CHEN Chen, YANG Yu. Discussion of several analytical approaches and tools about subsynchronous resonance [J]. Power System Technology, 1998, 22(8):10-13.
- [54] 吕世荣,刘晓鹏,郭强,等.次同步谐振分析中复转矩系数与特征值之间的关系[J].电力系统自动化,1999,23(3):16-18.

- LYU Shirong, LIU Xiaopeng, GUO Qiang, et al. Relationship between complex torque coefficients and eigenvalues in subsynchronous resonance analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 16-18.
- [55] 闵勇, 陈磊, 姜齐荣. 电力系统稳定分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [56] 王一珩, 杜文娟, 陈晨, 等. 基于复转矩系数法研究并网双馈风电场引发电力系统次同步振荡问题综述[J]. 发电与空调, 2018, 39(3): 195-203.
- WANG Yijun, DU Wenjuan, CHEN Chen, et al. A review of investigations on sub-synchronous oscillations in power systems caused by DFIG wind farms based on the complex torque coefficients method [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3): 195-203.
- [57] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.
- [58] 姜齐荣, 陈湘, 王天, 等. 多机系统复转矩系数分析及PSS参数计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010(1): 20-25.
- JIANG Qirong, CHEN Xiang, WANG Tian, et al. Analysis of complex torque coefficient in multi-machines system and PSS parameters assignment [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010(1): 20-25.
- [59] 高本锋. 电力系统次同步振荡分析方法与抑制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- GAO Benfeng. Research on analysis method and suppression technology of power system sub-synchronous oscillation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [60] 马燕峰, 程有深, 赵书强, 等. 双馈风电场并网引起火电机组多模态次同步谐振机理分析[J/OL]. 电工技术学报, 1-16 [2024-07-01]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240366>.
- MA Yanfeng, CHENG Youshen, ZHAO Shuqiang, et al. Mechanism analysis of multi-mode SSR of thermal power unit caused by doubly fed wind farm integration [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-16 [2024-07-01]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240366>.
- [61] 周长春, 徐政. 由直流输电引起的次同步振荡的阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 6-10.
- ZHOU Changchun, XU Zheng. Damping analysis of sub-synchronous oscillation caused by hvdc [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 6-10.
- [62] 徐坤, 赵成勇, 高本锋. VSC-HVDC的次同步阻尼特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 1-5.
- XU Kun, ZHAO Chengyong, GAO Benfeng. Study on sub-synchronous damping characteristic of VSC-HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 1-5.
- [63] 高本锋, 李忍, 杨大业, 等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-20.
- GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20.
- [64] 董晓亮, 谢小荣, 韩英铎, 等. 基于定转子转矩分析法的双馈风机次同步谐振机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4861-4869.
- DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, HAN Yingduo, et al. Mechanism study of DFIG-related SSR based on separate stator and rotor torque analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4861-4869.
- [65] 李长宇, 刘博昊, 肖仕武, 等. 基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制送端火电机组次同步振荡研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 20-27.
- LI Changyu, LIU Bohao, XIAO Shiwu, et al. Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 20-27.
- [66] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网VSC系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604.
- [67] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(一): 机理模型与稳定判据适用性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4405-4418.
- GONG Zexu, YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of equipment in renewable energy power system (part I): mechanism model and adaptation of stability criterion [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4405-4418.
- [68] YUAN H, YUAN X M, HU J B. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [69] HU J B, HU Q, WANG B, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1676-1687.

- [70] WU X F, DU Z C, LI Y J, et al. Stability analysis of grid-connected VSC dominated by PLL using electrical torque method [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 1864-1874.
- [71] ZHAO B Y, CHEN L, MIN Y, et al. Corrected complex torque coefficient method for synchronization stability analysis of grid-connected VSC [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(3): 412-425.
- [72] YU P, TIAN Z, ZHA X M, et al. Impact analysis of fast dynamics on stability of grid-tied inverter based on oscillator model and damping torque analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 1881-1892.
- [73] QU Z S, PENG J C H, YANG H, et al. Modeling and analysis of inner controls effects on damping and synchronizing torque components in VSG-controlled converter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 488-499.
- [74] CHEN X T, WU C, WANG Y. An improved virtual impedance method for single-loop controlled grid-forming inverters to suppress low-frequency oscillations [C]//2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). May 17-20, 2024, Chengdu, China. IEEE, 2024: 2395-2400.
- [75] LI Y T, GU Y J, GREEN T C. Mapping of dynamics between mechanical and electrical ports in SG-IBR composite grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3423-3433.
-
- 收稿日期:** 2024-07-03; **修回日期:** 2024-10-13
- 作者简介:**
- 郑 乐(1989), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事电力系统稳定与控制、人工智能在电力系统分析中的应用方面的研究工作。
- 梁以宁(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。(通信作者)
- (本文编辑: 童 凯)