

多变流器并网系统小干扰稳定性分析综述

王晓阳,赵晋斌,朱宇昕

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:随着越来越多可再生能源装置和负荷利用电力电子装备接入传统电网,由于电力电子装置的负电阻特性导致电力系统往往呈现为弱惯性特征,因而给多变流器并网系统(MGCCS)的小干扰稳定带来了巨大挑战。所以对MGCCS在时域和频域方面进行小干扰稳定性分析成为时下热点话题。小干扰稳定性分析策略从单变流器并网系统(SGCCS)开始介绍并扩展到MGCCS领域,对现有分析方法的基本原理及应用范围进行分类、归纳和总结。最后,提出当前尚未解决问题与面临挑战,并对未来的研究方向进行展望。

关键词:多变流器并网系统;时域分析;频域分析;小干扰稳定性

中图分类号:TM712 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23566

Small-signal Stability Analysis of Multiple-grid-connected-converter System: An Overview

WANG Xiaoyang, ZHAO Jinbin, ZHU Yuxin

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With more and more renewable energy devices and loads connected to the traditional power grid by power electronic equipment, the negative resistance characteristics of power electronic equipment lead to the weak inertia characteristics of high power electronic power systems. Therefore, the stability of the multiple-grid-connected-converter system (MGCCS) with small-signal is facing severe challenges. So the small-signal stability analysis of MGCCS in time-domain and frequency-domain has become a hot topic. Small-signal stability analysis method was introduced from single-grid-connected-converter system (SGCCS) and extended to the field of MGCCS. The basic principles and application scope of the existing analysis methods were classified and summarized. Finally, the problems and challenges were put forward, and the future research direction was prospected.

Key words: multiple-grid-connected-converter system (MGCCS); time-domain analysis; frequency-domain analysis; small-signal stability

能源是人类社会赖以存在的物质资源,为了实现社会可持续发展,以可再生能源为代表的新能源技术越来越受到各国政府与科研人员的关注^[1]。可再生能源并网技术将可再生能源通过电力电子装备变流后接入以同步机为主导的传统电力系统,从而实现可再生能源的发电与配电。该变流环节也往往决定了可再生能源并网技术的动态特性^[2]。可再生能源并网系统往往采用多闭环控制,故其通常呈现为多时间尺度特性^[3],并网系统的全阶数学模型也具有明显的高阶性与奇异性(运行参数分布在不同数量级上)。此外,可再生能源并网系统具有明显的弱惯性特征,当接入电网较为“薄弱”时可再生能源并网系统的稳定性能将变差,甚至发生稳定性事故^[4]。基于

上述背景可知,当大规模可再生能源接入“薄弱”电网时,系统将呈现为一个高阶且奇异的弱惯性系统。可再生能源并网系统的简化物理对象—多变流器的并网系统是非线性系统,很难进行直接研究。因此,在并网系统的稳态工作点的线性化模型上进行小干扰稳定性分析成为研究电力系统稳定性最主要目标,可以简化并网系统的分析复杂度,提供理论指导整个系统稳定运行。多变流器并网系统的各种小干扰稳定性分析方法在时域和频域大致划分为状态空间平均法、谐波状态空间法(harmonic state space, HSS)、阻抗模型分析法和传递函数模型分析法等。本文对上述方法的基本原理及应用范围进行梳理和总结,最后展望在未来具有价值的研究思路。

1 时域分析方法

1.1 状态空间平均法

传统的状态空间平均法是 Middlebrook 等人在 1976 年提出^[5],其本质为:根据开关变换器在一个开关周期内的不同运行状态,列写状态方程;在一个开关周期内对所有变量实行加权平均,推出相应的状态空间平均方程,并在上面施加并分离小信号扰动,最终获得开关变换器的状态空间平均小信号模型。

在状态平均的意义下,高频工作下的电力电子装备可以被看成是一个微分动力学模型。故利用线性化技术,变流器并网系统可在静态工作点处近似为一个线性的平均状态空间模型^[6-7]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为系统的状态变量; $\mathbf{A}$ 为系统的线性化状态矩阵; $\mathbf{x}_p$ 为初始状态,表征了系统的小干扰。研究状态矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值与特征向量可得出阻尼比、振荡频带与参与因子等重要参考信息,此即为经典的特征值分析法^[8]。阻尼比可用于定量反映系统的稳定状态。振荡频带可用于分析系统的失稳频带,如次同步振荡、超同步振荡与谐波振荡等^[9-10]。参与因子被用于衡量不同状态变量对不同振荡模式的贡献。故利用参与因子分析可定位到系统中的“脆弱”部分,从而实现系统失稳源的定位,这是特征值分析法在研究 MGCCS 小干扰稳定性时的一个重要优势^[11]。其数学意义可阐述如下:设 Φ 为状态矩阵 $\mathbf{A}$ 右特征向量构成的矩阵, Ψ 为状态矩阵 $\mathbf{A}$ 左特征向量构成的矩阵,则第 i 个状态变量对第 k 个模式的参与因子如下^[8]:

$$p_{ik} = \Psi_{ki} \varphi_{ik} \quad (2)$$

式中: φ_{ik} , Ψ_{ki} 分别为矩阵 Φ 与 Ψ 中指标为 (k,i) 与 (i,k) 的元素。

已有许多文献在状态空间平均法的特征值分析上成功实现各类电力电子装备接入电网的小干扰稳定性研究。文献[12-14]面向柔性直流输电系统,对整流侧与逆变侧的变流器建立了全阶状态空间模型,并在时域中初步确认了平均状态模型的精确度。文献[15-16]对可再生能源并网系统与柔性直流输电系统进行参与因子分析,从而进一步揭示了系统的失稳机理。然而,电力电子装备往往呈现为多时间尺度与高阶耦合特性,故建立 MGCCS 的平均状态空间建模将会较

为复杂,分析过程耗时严重且对高阶复杂状态矩阵的特征值分析也可能导致“维数灾”等问题^[17]。

由于新能源并网系统往往并联入网,而外部电网往往可通过等效变化来简化,故新能源并网系统通常可简化为树状结构。图 1 为一个典型的 MGCCS 拓扑,并网系统先将变流器聚合为 n 个变流器群,然后通过无源传输网络馈入到无穷大母线。

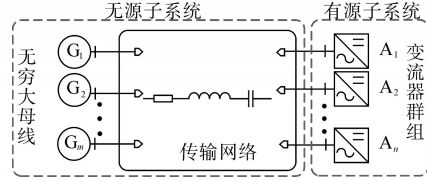


图1 典型的多变流器并网系统拓扑

Fig.1 Multi-grid-connected-converter system topology

基于此,文献[18]提出一种 s 域节点导纳矩阵法,通过结合阻抗建模简便地获得目标特征方程。但该方法依旧要直接/间接地求解特征方程,故无法较好地降低高维 MGCCS 的分析复杂度。

文献[19]提出了开环模式耦合方法来近似分析变流器并网系统的小干扰稳定性问题。该策略将一个变流器并网系统建模为如图 2 的两个开环子系统的互联反馈模型。该方法的核心思想是通过研究复杂度较低的开环模式来估计系统的闭环模式,从而简化变流器并网系统的小干扰稳定性分析。文献[20-21]推广以上方法至如图 3 所示的复杂多端交直流混联电力系统,建立其单输入单输出反馈闭环互联模型,并分析了多端直流系统和交流系统之间动态耦合特性。但该判据是系统失稳的必要条件而非充分条件,只能评估系统的失稳风险,无法对系统稳定性进行直接判断。

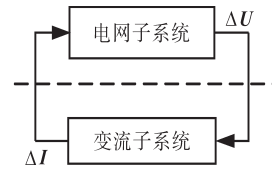


图2 变流器并网系统的开环子系统分解

Fig.2 Open-loop subsystem decomposition of converter grid-connected system

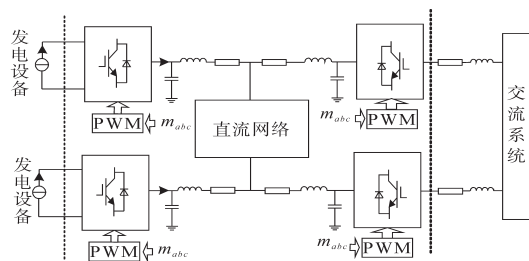


图3 多端交直流混联电力系统

Fig.3 Multi-terminal AC/DC hybrid power system

但使用状态空间平均法对MGCCS分析存在一些问题:并网变流器和电网的全部参数确定才能建立起一致的状态空间模型,但是MGCCS的组成单元和控制参数可能随时变化,使得进行系统分析变得繁琐复杂;高阶数学模型不能直观表现其物理意义,在系统动态稳定问题分析上复杂度比较高,不利于迅速辨认电网失去稳定性的主因。

1.2 谐波状态空间法

虽然状态平均可将电力电子装备从一个非连续非自治的动力系统在开关时间尺度上近似为一个光滑自治动力系统,但却很难体现时域上系统的 μs 级电磁暂态特性,因此文献[22-23]基于多谐波线性化提出了谐波状态空间法。相较于传统的平均建模,该模型在物理上可更深刻地反映电力电子开关的动力学特性与高阶谐波交互特性。

定义线性周期时变系统如下:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(t)$ 为周期性的时变量; $\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)$ 分别为系统的状态变量和输入变量。

对于开关变换器,其稳态呈现出周期性时变的特征,因此可将其视为一个非线性时间周期模块。针对线性时间周期系统的研究提出了谐波状态空间的概念。HSS模型中各频次分量信号可用傅里叶变换从时域变换为频域进行分析,为探究系统的动态性能,用指数调制周期函数去描述信号,具体如下:

$$\mathbf{x}(t) = e^{st} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \mathbf{X}_k e^{jk\omega_s t} \quad (4)$$

将式(4)代入状态方程与输出方程,可以推出包含所有谐波分量的谐波状态空间方程。

文献[24-25]进一步将谐波状态建模推广至各类电力电子装备,如高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统与模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)系统等。此外,为将HSS应用于系统稳定性分析,文献[26]将HSS与阻抗分析相结合进一步提出基于HSS的小干扰稳定性分析方法,达成了SGCCS的稳定性分析和控制器综合。

尽管HSS建模实现了变流系统的精细化建模,但HSS在理论上是一个无穷维状态空间模型,在工程应用中应进行截断计算,而这尚未存在相应的指导理论。将其应用于MGCCS时,该模型将会十分复杂,从而导致大量数值稳定性问

题。此外,在线性化分析中,该模型需要多谐波意义下的静态工作点,而这无法通过传统的潮流计算直接获得。故基于HSS的时域分析更加适用于装备间的谐波交互研究而非大系统的稳定性分析。

2 频域分析法

2.1 阻抗分析法

对变流器并网系统进行阻抗分析是一种使用最广泛的稳定性分析策略。该方法首先建立变流子系统和电网子系统的等效阻抗模型,然后用频域的Nyquist或广义Nyquist判据对阻抗比进行分析。

2.1.1 阻抗建模方法

通过建立阻抗/导纳模型对小干扰稳定性进行频域分析是另一种基于平均模型方法。在变流器并网系统的研究上,该方法最早被应用于拓扑较为简单的SGCCS中。其基本逻辑是将变流器并网系统视为两个源荷子系统,并将源荷系统的控制结构和参数特征分别按阻抗/导纳模型建模为等效戴维南/诺顿电路,从而将原系统的小干扰稳定性问题归纳到s域电路进行分析^[27-28],如图4a所示。在阻抗/导纳模型中源荷子系统任何一方组合单元的结构和参数的变化对彼此没有影响。

利用等效戴维南/诺顿电路图可以得到系统的传递函数表达式:

$$\Delta \mathbf{I}_g = (\mathbf{E}_{1/2} + \mathbf{Y}_{vsc} \mathbf{Z}_g)^{-1} (\mathbf{I}_p - \mathbf{Y}_{vsc} \mathbf{U}_p) \quad (5)$$

式中: $\Delta \mathbf{I}_g$ 为并网电流; $\mathbf{E}_{1/2}$ 为一维或二维单位矩阵,取决是否考虑三相并网系统的阻抗耦合特性; $\mathbf{Y}_{vsc}$ 为变流器的导纳模型; $\mathbf{Z}_g$ 为接入电网的阻抗模型; $\mathbf{I}_p, \mathbf{U}_p$ 分别为系统小干扰等效出来的电流源、电压源。

显然上述方程对应了图4b的控制框图,在恰当的参数下一般可认为 $\mathbf{I}_p, \mathbf{U}_p, \mathbf{Y}_{vsc}$ 与 $\mathbf{Z}_g$ 是稳定的,故图4b是具有稳定输入的开环稳定系统。由线性系统理论可知图4b系统的稳定性可由开环函数 $\mathbf{Y}_{vsc} \mathbf{Z}_g$ 决定,一般定义该开环函数为阻抗比函数 L ,即

$$L = \mathbf{Y}_{vsc} \mathbf{Z}_g \quad (6)$$

如果SGCCS是一个一维系统,对一维阻抗比 L 应用经典频域法,如Bode图与Nyquist判据等即可实现系统小干扰稳定性的分析与综合,这是阻抗分析方法的基本思路。通过阻抗模型建模流程中参考坐标系的区别,广泛使用的阻抗建模策

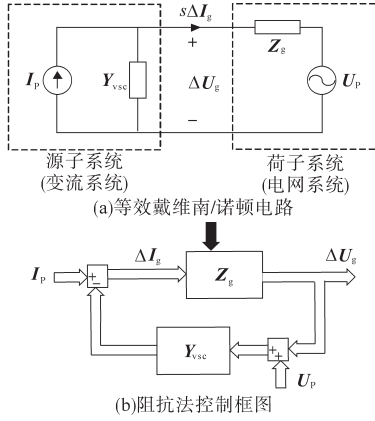


图4 阻抗分析的原理分析

Fig.4 Principle analysis of impedance analysis

略为:基于 d - q 旋转坐标阻抗建模与基于正负序坐标的谐波线性化建模。

但在 d - q 阻抗与正负序阻抗建模下传统并网变流器存在着 d - q 耦合效应或频率耦合效应,即SGCCS表现为双输入双输出特性^[29-31]。所以完整的小干扰稳定性分析常需要用到形式更为复杂的现代频域法,比如广义Nyquist判据与奇异值分析等^[32-33]。

为此,文献[34]提出一种极坐标阻抗,从而获得了单位功率因数下SGCCS的一维阻抗模型,通过严格数学变换将变流器并网系统从多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)问题转为单输入单输出(single input single output, SISO)问题,再利用电路谐振对系统振荡进行解释,最后使用Nyquist曲线即可判断系统稳定性。在全局极坐标下建立变流器和电网阻抗模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta I \\ I \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -C(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \\ U \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

但该极坐标解耦方法目前仅仅适用于单位功率因数逆变器。文献[35]则提出一种对称导纳模型,可以将并网系统用一个互易二端口电路表示,通过矩阵变化获得了SGCCS的等效一维阻抗模型来探讨系统的振荡机理。但该解耦方法目前仅仅适用于不考虑变流器外环动态的情形。为此文献[36]建立了变流器外环控制器动态影响下的并网系统极坐标阻抗模型与复电路,推出极坐标广义阻抗判据及等效SISO系统,并解释此判据本质即是对端口电压相位主导回路的谐振分析。并继续研究了外环控制器、锁相环动态对并网系统稳定性的影响。

但上述方法都尚未推广至MGCCS。所以文

献[37-40]提出MGCCS的一种在同步旋转坐标系下的阻抗建模策略。并在已知系统振荡路径的背景下,利用振荡路径的阻抗聚合,可将系统的特征方程表示为

$$CE = \det(Z_{agg}) \quad (8)$$

式中: CE 为系统特征方程; Z_{agg} 为振荡路径下的聚合阻抗。

利用该方程的频域特性可以快速得到系统阻尼与振荡频率等稳定性信息,并且得到稳定性量化分析方法,建立聚合阻抗判据。文献[41-43]从电网的“薄弱”特性评估提出了广义短路比的概念,从而将MGCCS解耦为若干个等值的SGCCS。基于该方法MGCCS的稳定性分析可被简化为对SGCCS进行分析,但该方法的系统必须有一定的对称性。

文献[44]将MGCCS拓扑建模为一个开环稳定的MIMO负反馈模型,如图5所示。MGCCS被分为由变流器群组成的有源子系统和由传输网络与无穷大母线组成的无源子系统,建立一个以 $TY_s T^{-1} Z_L$ 为开环函数的负反馈模型,如下式:

$$\mathbf{i} = (\mathbf{I}_{2n} + \mathbf{T} \mathbf{Y}_s \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_L)^{-1} \mathbf{T} \mathbf{i}_d \quad (9)$$

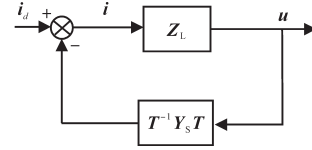


图5 MGCCS的负反馈模型

Fig.5 The negative feedback model of MGCCS

Z_L 为该端口网络的阻抗网络矩阵, $Y_s = \text{diag}(Y_{s1}, \dots, Y_{sn})$, Y_{sk} 是 u_{sk} 到 i_{sk} 的传递函数, T 为坐标变换矩阵。定义MGCCS的广义阻抗比 L_M 为

$$L_M = Y_s Z_L \quad (10)$$

但是树状结构的阻抗模型很难用于更加复杂的多端交直流系统。

2.1.2 阻抗稳定性分析

阻抗稳定性判据是变流器与电网互联系统稳定性量化分析重要理论基础,并提供了并网逆变器结构与环路参数设计方案。本节归纳了适用于SGCCS的稳定性判据,并拓展到MGCCS领域。

在研究三相并网变流器与电网交互系统的稳定性时,采用 d - q 轴阻抗建模方法得到的交互系统为MIMO。所以通过阻抗比函数 L 是否符合广义Nyquist判据来确认三相并网变流器与电网的稳定状态。但是由于广义Nyquist判据拥有比较高的复杂度,因此广泛借助 d - q 耦合效应推导

出一些复杂度较低的判据,其可以分成奇异值判据、D通道判据和范数判据。

在此基础上,文献[45]讨论了四种基于SGCCS的范数类判据,建立了相较广义Nyquist判据更为简洁的G-Sum范数判据,并证明其保守性的优势。尽管该判据一定程度上实现了源荷解耦与复杂度降低,但判据是充分判据具有一定的保守性。G-Sum范数判据:若任意频率 ω 满足

$$\|Y_s\|_G \cdot \|Z_L\|_{\text{Sum}} < 1 \quad (11)$$

则交互系统是稳定的。

文献[46]在序阻抗的基础上利用阻抗比矩阵的特征值估计建立了一个复杂与保守性较低的禁止域判据。判据形式如图6所示,灰色部分为轨迹禁止域,当Nyquist轨迹涉及到灰色部分时,表明系统的稳定裕度不足。但当满足判据的情况下,相位、幅值裕度 PM, GM 有如下估计:

$$\begin{cases} PM \geq \theta \\ GM \geq \frac{1}{\cos\theta} \end{cases} \quad (12)$$

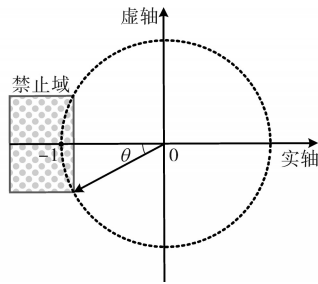


图6 基于禁止域的等价开环函数判据

Fig.6 Equivalent open-loop function criterion for forbidden fields

相较SGCCS, MGCCS更是典型的高阶MIMO系统,其分析过程将更为复杂。一般来说,为探究多变量线性系统的稳定性问题,需要求解特征方程特征根或者使用广义Nyquist判据。但是由于特征方程判据的复杂度过高,多变量线性系统理论中的广义Nyquist判据可被应用于MGCCS的小干扰稳定性,判据可被归纳如下^[47]:

广义Nyquist判据:MGCCS是小干扰稳定,当且仅当 L_M 的特征值轨迹包围 $(-1, 0)$ 的逆时针圈数 N_+ 等于其包围 $(-1, 0)$ 的顺时针圈数 N_- 。 L_M 是阶数为 $2n$ 的非对角矩阵。但是如果开环传递函数矩阵高于4阶情况下广义Nyquist判据已无法代数解。故使用广义Nyquist判据研究MGCCS的小干扰稳定性问题将更为困难。

为了在经典频域内分析稳定性问题,文献[48]提出一个等价开环函数判据,并定义了一个等价开环函数为

$$G_L(s) = \det(E + L_M) - 1 \quad (13)$$

上述开环函数表示了一个以1为前向通道, $G_L(s)$ 为负反馈通道的SISO系统,如图7所示。

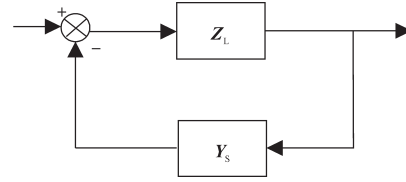


图7 等效SISO系统

Fig.7 Equivalent SISO system

等价开环函数判据:MGCCS是小干扰稳定的,当且仅当 $G_L(s)$ 的Nyquist轨迹不包围临界点。广义Nyquist判据与此判据的复杂度相当,但Nyquist轨迹的形式相对简洁,且方便进行直观的稳定裕度设计。

为了继续降低判据复杂度,文献[44]提出G-Sum范数的复杂度是远低于广义Nyquist判据,故其可以适用于更大规模的MGCCS稳定性分析,但是保守性略高。所以基于矩阵特征值的估计理论,给出了MGCCS的特征值域判据,可将稳定性条件总结为一个代数函数下界值的大小。

特征值域判据的几何意义如图8所示,其代数意义为:若对任意频率 ω 满足 $f(\omega) > 0$,那么对应MGCCS满足小干扰稳定条件。若进一步有 $f(\omega) > r$,相位幅值裕度 PM, GM 满足下式:

$$\begin{cases} GM \geq \frac{1}{1-r} \\ PM \geq \arccos(1 - 0.5r^2) \end{cases} \quad (14)$$

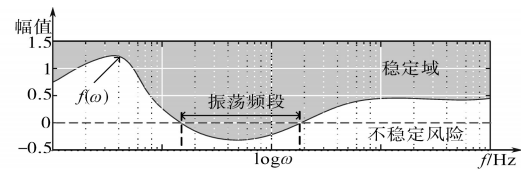


图8 特征值域判据

Fig.8 The eigenrange criterion

由于频域判据计算过程不需要获得具体的解析表达式,只涉及各个有源节点与无源网络的频域特性,此判据有一定处理高阶MGCCS的潜力。

不同阻抗稳定性判据的比较分析如表1所示。由于电力电子化系统往往涉及多交直流异构变流器多异地接入,相较现有文献讨论的多变流器并网阻抗模型较为简单,尚无法完全表征电力电子化电力系统的动力学特性。故对于更为复杂的电力电子化系统的小干扰稳定性阻抗建模依旧等待进一步研究,如交直流混联电力系统与交直流微电网。

表 1 不同判据的比较分析
Tab.1 Comparative analysis of different criteria

比较判据	稳定性条件	稳定性量化标准	计算方法	保守性分析
特征值分析	阻尼比 >0	阻尼比,振荡频率	对高阶矩阵做 QR 分解	充要判据
聚合阻抗判据	$D(s)$ 虚部曲线正穿越零点, $\text{Re}[D(j\omega_r)]>0$	阻尼比,振荡频率	基本代数计算	有数学近似,存在误差
广义 Nyquist 判据	$N_+=N_-$	相位幅值裕度,振荡频率估计	对中高阶矩阵做若干次 QR 分解	充要判据
等价开环函数判据	$G_L(s)$ 的 Nyquist 轨迹不包围临界点	相位幅值裕度,振荡频率估计	对中高阶矩阵做若干次 LU 分解	充要判据
范数类判据	$\ Y_S\ \cdot \ Z_L\ < 1$	——	计算 Y_S 与 Z_L 的范数,只涉及加减运算	充分判据
特征值域判据	$f(\omega)>0$	$f(\omega)$ 的下界(估计相位幅值裕度的上界),振荡频段估计	计算代数函数组的值,只涉及基本代数运算	充分判据,保守性低于范数类判据

阻抗分析法可以有效表现两个子系统对系统稳定性的影响,但在 MGCCS 中只能使多机中一部分合并,然后对两个子系统开始稳定性分析。所以这难以表现不同装备本身各自在系统稳定性上造成的影响。

2.2 传递函数分析法

为使变流器并网系统从 MIMO 系统简化为 SISO 系统,文献[49–51]提出一种传递函数模型,在将 SGCCS 的各部分模型使用线性化进行处理后,SGCCS 被等效为一阶传递函数模型,并通过传统频域法中的 Nyquist 稳定判据或 Bode 图上的稳定判据即可实现对 SGCCS 的分析与综合。

但在 MGCCS 中,多种类型装备间的耦合作用与系统稳定性的关系需要精细衡量,并以此来控制系统的整体稳定性。基于此,文献[52]基于自稳性和致稳性分析思路提出一种路径级数展开法。该方法可以精确描述多装备耦合相互作用,建立基于装备—网络的等效传递函数模型。对比于现有频域分析方法大部分用于衡量两个子系统对系统稳定性的影响,该方法可以精细化溯源,使系统内复杂耦合路径的形成过程可以直观描述并且解析化频域分析和简化系统的分析过程。但是传递函数模型所需数据巨大,建模过程程序复杂,计算量也偏大。

3 结论

本文对现有多变流器并网系统建模与稳定性分析的方法进行了全面的归纳和总结,有效地简化了交互系统稳定性分析的复杂度,对电力电子化电力系统的稳定性研究有着一定借鉴意义。对 MGCCS 这种复杂结构电力系统稳定性的研究来说,未来还需从对如下工作开展研究:

1) 电力电子化电力系统除受电力电子装备影响外,可再生能源的间歇特性与负载的频繁切投也对系统的稳定性有着深刻影响。这往往将导致系统发生大干扰不稳定,而由于电力电子化电力系统的高阶非线性,故该暂态稳定性问题逐渐凸显出来,并且十分值得下一阶段研究。

2) 除去稳定性判断外,稳定性的优化与设计更是一个工程实际问题。而由于电力电子化电力系统的多接入特性,其数学模型往往十分复杂,故如何在多异构电力电子装备多接入背景下对电力系统的稳定性进行优化与设计同样也是值得挑战的。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893–1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology feature softhe new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893–1904.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1–14.
Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1–14.
- [3] 胡家兵,袁小明,程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457–5467.
Hu Jiabing, Yuan Xiaoming, Cheng Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457–5467.
- [4] Yang D S, Ruan X B, Wu H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to

- the weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795–5805.
- [5] Middlebrook R D, Cuk S. A general unified approach to modeling switching-converter power stages[J]. International Journal of Electronics, 1977, 42(6): 521–550.
 - [6] 周国华, 冷敏瑞, 李媛, 等. 开关变换器及其控制环路的建模综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 183–199.
Zhou Guohua, Leng Minrui, Li Yuan, *et al.* A review on modeling of switching converters and their control loops[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 183–199.
 - [7] Yue X L, Wang X F, Blaabjerg F. Review of small-signal modeling methods including frequency-coupling dynamics of power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3313–3328.
 - [8] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
 - [9] Shu D W, Xie X R, Rao H, *et al.* Sub-and super-synchronous interactions between STATCOMs and weak AC/DC transmissions with series compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7424–7437.
 - [10] Wang X F, Blaabjerg F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858–2870.
 - [11] Farrokhhabadi M, Lagos D, Wies R W, *et al.* Microgrid stability definitions, analysis, and examples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 13–29.
 - [12] 杨洁, 刘开培, 余俞, 等. 交流电网互联的双端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2177–2184.
Yang Jie, Liu Kaipei, Yu Yu, *et al.* Small signal modeling for VSC-HVDC used in AC grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2177–2184.
 - [13] 杨洁, 刘开培, 王东旭, 等. 向无源网络供电的双端柔性直流输电系统小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2400–2408.
Yang Jie, Liu Kaipei, Wang Dongxu, *et al.* Small signal stability analysis of VSC-HVDC applied to passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2400–2408.
 - [14] 杨洁, 刘开培, 饶雪, 等. 多端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4015–4024.
Yang Jie, Liu Kaipei, Rao Xue, *et al.* Small signal modeling for VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4015–4024.
 - [15] 张天翼, 杜文娟, 陈晨, 等. 弱连接条件下并网直驱风电场引发无串补电力系统次同步振荡机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5875–5885.
Zhang Tianyi, Du Wenjuan, Chen Chen, *et al.* A mechanism investigation on SSTOs in power systems without series compensated lines induced by PMSG wind farms under the condition of weak grid connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5875–5885.
 - [16] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 多直驱风机经 VSC-HVDC 并网系统场内/场网次同步振荡特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3835–3847.
Shao Bingbing, Zhao Shuqiang, Gao Benfeng, *et al.* Inside-wind-farm/wind-farm-grid sub-synchronous oscillation characteristics analysis in multiple D-PMSGs interfaced with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3835–3847.
 - [17] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 26–32.
Xie Xiaorong, Liu Huangkun, He Jingbo, *et al.* Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26–32.
 - [18] 邢法财, 徐政, 王世佳. 非同步电源接入电网后的谐振问题分析及抑制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 71–79.
Xing Facai, Xu Zheng, Wang Shijia. Analysis and suppression of resonance problem in power system with unconventional generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 71–79.
 - [19] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 开环模式谐振引发含变速风电机组电力系统振荡的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6481–6491.
Wang Xubin, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Oscillations caused by open-loop modal resonance in power system with variable-speed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6481–6491.
 - [20] Du W J, Fu Q, Wang H F. Small-signal stability of an AC/MT-DC power system as affected by open-loop modal coupling between the VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3143–3152.
 - [21] Du W J, Fu Q, Wang H F. Open-loop modal coupling analysis for a multi-input multi-output interconnected MTDC/AC power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 246–256.
 - [22] Kwon J, Wang X, Blaabjerg F, *et al.* Harmonic interaction analysis in a grid-connected converter using harmonic state-space (HSS) modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6823–6835.
 - [23] Kwon J, Wang X, Blaabjerg F, *et al.* Frequency-domain modeling and simulation of DC power electronic systems using harmonic state space method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1044–1055.
 - [24] Yu J, Zhang X, Cai X, *et al.* Harmonic state-space based small-signal impedance modeling of a modular multilevel converter with consideration of internal harmonic dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2134–2148.
 - [25] 周攀, 刘天琪, 王顺亮, 等. 考虑谐波耦合特性的 LCC-HVDC 换流站小信号建模[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 153–161.
Zhou Pan, Liu Tianqi, Wang Shunliang, *et al.* Small signal modeling of LCC-HVDC station with consideration of harmonic coupling characteristics[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 153–161.

- [26] 吕敬,蔡旭. 提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 431-443.
Lü Jing, Cai Xu. Controller parameters optimization design for enhancing the stability of wind farm with VSC-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 431-443.
- [27] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [28] 陈新,王赞程,龚春英,等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[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.
- [29] Wen B, Boroyevich 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.
- [30] Cespedes M, Jian S. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [31] Rygg A, Molinas M, Zhang C, *et al.* A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [32] Wen B, 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.
- [33] 周克敏. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 245-250.
Zhou Kemin. Robust and optimal control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 245-250.
- [34] 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): 1277-1293.
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): 1277-1293.
- [35] Xu L, Xin H, Huang L, *et al.* Symmetric admittance modeling for stability analysis of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 434-444.
- [36] 杨超然,官泽旭,洪敏,等. 外环动态影响下变流器广义阻抗判据的适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3012-3024.
Yang Chaoran, Gong Zexu, Hong Min, *et al.* Applicability analysis of the generalized-impedance stability criterion for converters considering the outer-loop dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3012-3024.
- [37] Liu H K, Xie X R, Zhang C Y, *et al.* Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [38] Liu H K, Xie X R, Liu W. An oscillatory stability criterion based on the unified dq-frame impedance network model for power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3472-3485.
- [39] Liu H K, Xie X R, Gao X D, *et al.* Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3118-3128.
- [40] 刘华坤,谢小荣,何国庆,等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4002-4007.
Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Guoqing, *et al.* Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4002-4007.
- [41] Dong W, Xin H H, Wu D, *et al.* Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1393-1403.
- [42] 辛焕海,章枫,于洋,等. 多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647.
Xin Huanhai, Zhang Feng, Yu Yang, *et al.* Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [43] 章枫,辛焕海,徐谦,等. 直流多馈入系统的广义短路比:影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5303-5312.
Zhang Feng, Xin Huanhai, Xu Qian, *et al.* Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: influence factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5303-5312.
- [44] 朱宇昕,赵晋斌,毛玲,等. 多变流器并网系统的小干扰稳定性判据与参数灵敏度分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6235-6244.
Zhu Yuxin, Zhao Jinbin, Mao Ling, *et al.* A small-signal stability criterion and parametric sensitivity analysis for multiple grid-connected-converter system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6235-6244.
- [45] 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.
- [46] Zhou Y, Hu H, Yang J, *et al.* A novel forbidden-region-based stability criterion in modified sequence-domain for AC grid-converter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 2988-2995.
- [47] 波斯特莱夫维特I, 麦克法兰 A G J. 线性多变量反馈系统分析的复变方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(下转第24页)

- rent estimation[J]. *Micromotor*, 2020, 48(2): 29-33.
- [4] 胡文刚. 全数字同步电机矢量控制系统及运行特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2004.
- Hu Wengang. Research on vector control system and operation characteristics of full digital synchronous motor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [5] Nevaranta N, Derammelaere S, Parkkinen J, *et al.* Online identification of a two-mass system in frequency domain using a Kalman filter[J]. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 2016, 37(2): 133-147.
- [6] Dou R, Duan H. Pigeon inspired optimization approach to model prediction control for unmanned air vehicles[J]. *Aircraft Engineering & Aerospace Technology An International Journal*, 2015, 88(1): 108-116.
- [7] 周扬忠, 胡育文, 黄文新. 直接转矩控制电励磁同步电机初始转子位置估计[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(12): 55-60.
- Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Estimation of initial rotor position of direct torque control electrically excited synchronous motor[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2007, 22(12): 55-60.
- ~~~~~
- (上接第10页)
- Postlethwaite I, Mac Farlane A G J. A complex variable method for linear multivariable feedback system analysis[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [48] 朱宇昕, 赵晋斌, 毛玲, 等. 并网系统的广义阻抗比及其稳定性分析与研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7240-7249.
- Zhu Yuxin, Zhao Jinbin, Mao Ling, *et al.* Generalized impedance ratio and stability analysis for grid-connected systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7240-7249.
- [49] 吴广禄, 王姗姗, 周孝信, 等. VSC接入弱电网时外环有功控制稳定性解析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6169-6183.
- Wu Guanglu, Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, *et al.* Analytical analysis on the active power control stability of the weak grids-connected VSC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6169-6183.
- [50] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(9): 2622-2633.
- [8] 吴伟亮, 杨合民, 杨海英, 等. 电励磁同步电机无速度传感器控制研究[J]. *电气传动*, 2021, 51(6): 38-43.
- Wu Weiliang, Yang Hemin, Yang Haiying, *et al.* Research on speed sensor-less control of electrically excited synchronous motor[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(6): 38-43.
- [9] 刘建东, 张啸, 赵晨, 等. 动态整数帐篷映射模型及其性能分析[J]. *计算机科学*, 2016, 43(11): 226-229.
- Liu Jiandong, Zhang Xiao, Zhao Chen, *et al.* Dynamic integer tent mapping model and its performance analysis[J]. *Computer Science*, 2016, 43(11): 226-229.
- [10] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- TRiED. Technical manual of electrical transmission automation [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [11] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Li Chongjian. Speed control system of AC synchronous motor [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2021-06-03
修改稿日期: 2021-07-12
- ~~~~~
- Wu Guanglu, Zhou Xiaoxin, Wang Shanshan, *et al.* Analytical research on the mechanism of the interaction between PLL and inner current loop when VSC-HVDC connected to weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(9): 2622-2633.
- [51] Shuai Z, Li Y, Wu W, *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.
- [52] 张美清, 袁小明, 胡家兵. 基于自稳/致稳性的路径级数展开方法及其在含多样化电力电子装备电力系统稳定性分析中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1637-1655.
- Zhang Meiqing, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing. Path series expansion method based on self-/en-stabilizing properties and its application in the stability analysis of power systems with diversified power electronic devices[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1637-1655.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2021-05-27
修改稿日期: 2021-06-05