

变流器并网系统暂态稳定性研究综述： 现状、挑战与展望

熊永新¹, 文劲宇², 姚伟²

(1. 香港理工大学电机与电子工程学系, 香港特别行政区 999077;

2. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 武汉市 430074)

摘要:【目的】新能源高比例接入背景下, 电力系统正加速向电力电子装备主导转型, 变流器作为新能源并网的核心接口, 其暂态稳定性已成为制约新型电力系统安全运行的关键问题。跟网型(grid-following, GFL)与构网型(grid-forming, GFM)变流器是两类主流并网变流器范式, 二者在同步机理、动态特性及失稳机制上存在本质差异。系统梳理两类变流器的暂态稳定机理, 对比分析评估方法并归纳稳定性提升策略, 对于支撑变流器并网系统安全运行具有重要意义。【方法】基于同步机理与控制结构差异, 梳理跟网型锁相环(phase-locked loop, PLL)同步控制与构网型功率同步控制(power synchronization control, PSC)在暂态行为上的核心差异, 阐明锁相环动态、等效惯量与阻尼特性、电流限幅等环节对暂态稳定性的影响机理。在此基础上, 系统归纳三类暂态稳定分析方法: 微分代数方程求解类方法、能量函数类方法以及人工智能类方法, 并总结其适用范围、优势与局限。【结果】研究表明: GFL变流器暂态稳定性高度依赖电网强度与扰动强度, 弱电网或大扰动下易因PLL失步引发同步故障; GFM变流器能主动构建电压与频率基准, 但在多机互联系统中可能因控制耦合呈现更强的非线性特征, 且电流限幅环节可能诱发非期望平衡点及模式切换问题。总体而言, 当前研究仍存在三方面不足: 对强非线性控制下暂态同步失稳机理的揭示仍不充分, 适用于电力电子主导系统的暂态稳定判据仍不成熟, 多源系统的全局分散协同控制思路仍不清晰。【结论】本文系统总结了含GFL/GFM变流器的并网系统暂态稳定性研究进展, 并指出未来研究可重点聚焦: 不同运行方式下的暂态稳定机制表征、多机系统耦合机制及暂态稳定判据构建、参数弱依赖的稳定性提升分散协同控制策略、物理机理与数据驱动相结合的评估与控制方法等方向。相关结论可为深化电力电子主导系统暂态稳定性认知、支撑新型电力系统安全运行提供参考。

关键词: 跟网型(GFL); 构网型(GFM); 多机系统; 暂态稳定性; 系统强度

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)04-0132-20

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.04.011

Transient Stability of Converter-Connected Systems: A Review of Research Status, Challenges and Prospects

XIONG Yongxin¹, WEN Jinyu², YAO Wei²

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong Special Administrative Region 999077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: [Objective] With the increasing penetration of renewable energy, the power system is accelerating its transformation towards being dominated by power electronic equipment. As the core interface for renewable energy grid connection, the transient stability of converter-connected systems has become a critical issue restricting the safe operation of new-type power systems. Grid-following (GFL) and grid-forming (GFM) converters represent two mainstream grid-connected converter paradigms, with fundamental differences in synchronization mechanisms, dynamic characteristics and instability mechanisms. A systematic analysis of their transient stability mechanisms, a comparison of evaluation methods, and a summary of enhancement strategies are essential for ensuring the safe operation of converter grid-connected systems. [Methods] Based on the differences in synchronization mechanisms and control structures, this paper delineates the core

differences in transient behaviors between phase-locked loop (PLL) synchronization control for grid-following converters and power synchronization control (PSC) for grid-forming converters. It elucidates the influence mechanisms of PLL dynamics, equivalent inertia and damping characteristics, and current limiting on transient stability. On this basis, three categories of transient stability analysis methods are systematically summarized: methods based on solving differential-algebraic equations, energy function methods, and artificial intelligence methods. Their applicable scopes, advantages and limitations are also concluded. [Results] The research shows that GFL converter transient stability is highly sensitive to grid strength and disturbance intensity, and is prone to synchronization failure due to PLL out-of-step under weak grids or large disturbances; GFM converters can actively provide voltage and frequency references, but exhibit complex nonlinear dynamic characteristics due to control coupling in multi-machine interconnection scenarios, and current limiting may easily induce unexpected equilibrium points and mode-switching problems. In general, current research still suffers from three major shortcomings: insufficient understanding of the mechanism of transient synchronization instability under strongly nonlinear control, the lack of transient stability criteria applicable to power-electronics-dominated systems, and the absence of a global decentralized coordinated control framework for multi-source. [Conclusions] This paper systematically summarizes the research progress in transient stability of grid-connected systems containing GFL/GFM converters, and points out key directions for future research: characterization of transient stability mechanisms under different operating modes, construction of coupling mechanisms and transient stability criteria for multi-machine systems, decentralized coordinated control strategies for stability enhancement with weak parameter dependence, and assessment and control methods combining physical mechanisms with data-driven approaches. These conclusions can provide methodological references and a basis for design, while deepening the understanding of transient stability in power-electronics-dominated systems and supporting the safe operation of new-type power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U24B6008).

KEYWORDS: grid-following(GFL); grid-forming(GFM); multi-machine systems; transient stability; system strength

0 引言

在“双碳”目标与能源转型的持续驱动下,新能源装机规模快速增长,电力系统正由同步发电机(synchronous generator, SG)主导的传统形态,加速演进为以变流器为核心并网接口的电力电子主导形态^[1]。过去十年间,风能与太阳能等可再生能源占比持续提升^[2]。截至2025年底,我国风电与光伏总装机已突破18.4亿kW,占全国总装机容量的47.3%,首次超过火电^[3]。在此背景下,传统以同步发电机为主体、具备高惯量与强支撑能力的电网,正加速向高比例新能源发电与高比例电力电子设备并存的“双高”新型电力系统转变^[4-5]。该演进显著削弱了惯量与阻尼支撑,降低电压与频率稳定能力^[6],使系统受扰后的动态恢复特性与传统电力系统呈现本质差异。近年来,澳大利亚、英国等地均发生过由新能源机组失稳或脱网引发的大范围停电事件,表明在高比例电力电子接入条件下,暂态稳定性已成为制约新型电力系统安全运行的重要挑战^[7]。

传统意义上的暂态稳定性主要关注系统在遭受大扰动(如三相短路、切机、直流闭锁等)后能否保持同步并收敛至新的稳定运行状态,其核心在于同步发电机转子功角的动态平衡^[8]。然而,在电力电子主导系统中,暂态稳定性的内涵已显著拓展:一方面,跟网型变流器(grid-following-voltage source

converter, GFL-VSC)依赖锁相环(phase-locked loop, PLL)实现相位同步,其稳定性对电网强度高度敏感,在弱电网及大扰动条件下易出现失稳^[9];另一方面,构网型变流器(grid-forming-voltage source converter, GFM-VSC)能够主动建立电压与频率基准,但在电流限幅、模式切换等约束作用下,多机并联系统可能产生环流、宽频振荡乃至暂态失稳等复杂现象^[10-13]。此外,在风火打捆、新能源与储能协同运行以及孤立电网等应用场景中,系统暂态稳定性不仅取决于单机动态,还受到源网耦合关系与多源协同控制机制的显著影响^[14-17]。因此,电力电子化系统的暂态稳定问题已不再局限于单一机电功角稳定,而是一个涉及控制-电磁-机电多物理耦合、多时间尺度演化以及动态模式切换的复杂系统问题^[18]。

近年来,围绕电力电子主导系统暂态稳定性已开展大量研究,主要集中在以下3个方面:

1)单类变流器的暂态机理与提升策略。针对GFL-VSC与GFM-VSC在不同控制模式下的暂态特性,已有研究形成了较为系统的认识,针对GFL-VSC的相关研究侧重于PLL动态、弱电网条件与参数配置对稳定性的影响,并针对限幅与保护策略开展改进研究^[9];针对GFM-VSC的相关研究则聚焦下垂控制、虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)、功率同步控制(power synchronization control, PSC)、虚拟振荡控制(virtual oscillator control, VOC)等策略的

暂态行为,并提出虚拟阻抗调节、自适应控制等多种提升措施^[10-11]。上述成果为揭示电力电子系统的基本暂态机理奠定了理论基础。

2)多源系统中的协同运行与暂态稳定问题。工程实际中,GFL-VSC、GFM-VSC 与 SG 往往以多机方式协同运行。研究表明,在风火打捆系统中,风电侧动态特性可显著影响火电机组功角稳定^[19];在孤岛电网与直流微电网中,变流器单元外环控制对系统暂态稳定性具有直接作用^[17]。同时,在多机系统中,GFM-VSC 与 GFL-VSC 的相互作用可能诱发同步失稳,亟需构建面向多源协同的协调控制机制^[20-24]。相关研究进一步凸显了系统层面的稳定性挑战。

3)暂态稳定性分析方法与控制优化方向。现有暂态稳定性分析方法包括:微分代数方程(differential-algebraic equations, DAEs)求解法^[6]、能量函数法^[25]及基于人工智能的方法等。微分代数方程求解法能够揭示功角相关机理,但难以扩展至高阶系统,难以刻画限流、模式切换等约束;能量函数法^[26],如稳定流形法与李雅普诺夫函数,可精细建模非线性动态过程,但计算复杂;基于人工智能的方法^[27],如深度迁移学习与增量更新框架,提升了大规模系统的评估效率,但缺乏机理解释性。与此同时,改进控制策略也不断涌现,包括自适应虚拟阻抗^[10]、改进型虚拟振荡控制^[13]、有功-无功联合控制与自适应下垂控制等^[6,24],均在仿真和实验中展现出良好效果,但其在大规模系统中的适用性与鲁棒性仍待验证^[9,18]。

基于上述研究现状,本文围绕变流器并网系统暂态稳定性开展综述:首先分别梳理 GFL-VSC 与 GFM-VSC 的暂态稳定机理、关键影响因素及典型控制策略;其次梳理多变流器系统的暂态稳定分析方法与稳定性提升策略;最后总结当前研究难点并展望未来发展方向,为变流器并网系统暂态稳定保障的理论研究与控制策略工程实践提供参考与支撑。

1 单类变流器的暂态稳定性机理及控制

变流器并网系统的暂态稳定特性在很大程度上

取决于变流器的控制范式。作为两类主流范式,跟网型与构网型变流器在暂态演化过程与失稳机理方面存在显著差异。本章将分别从控制结构、动态方程、关键影响因素及稳定性提升策略等层面,对两类变流器的暂态稳定机理进行分析。

1.1 跟网型变流器暂态稳定机理及影响因素

跟网型变流器可通过 PLL 主动跟踪电网相位,以电流源特性实现并网运行,其暂态过程主要由 PLL 动态与电流控制协同主导。图 1 展示了跟网型变流器连接到无穷大母线的示意图,其在正常运行状态下的等效电路如图 2 所示^[28-29]。其中, V_{PCC} 和 V_g 分别表示并网点(point of common coupling, PCC)电压和并网无穷大母线电压; Z_f 表示 GFL-VSC 滤波器阻抗; Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别表示线路 L_1 和 L_2 的等值阻抗; δ_{PCC} 表示 PCC 点母线电压超前于无穷大母线电压的角度; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别表示功率外环控制的参考值; P 和 Q 分别表示有功无功的测量值; I_g 表示 GFL-VSC 向无穷大母线注入的电流值,其 d 轴分量和 q 轴分量分别表示为 i_d 和 i_q ; I_{dref} 和 I_{qref} 分别表示 d 轴与 q 轴电流的参考值; I_{max} 表示 GFL-VSC 电流最大限值。在正常运行阶段,电流参考值选择器工作在 1 处,此时 I_{dref} 和 I_{qref} 分别由有功和无功外环控制决定,在系统发生故障时,电流参考值选择器工作在 2 处,此时 I_{qref} 将根据电力系统导则要求确定,在故障过程中,GFL-VSC 将向系统注入无功电流,如图 3 所示,其中斜率 k 在电网导则中一般

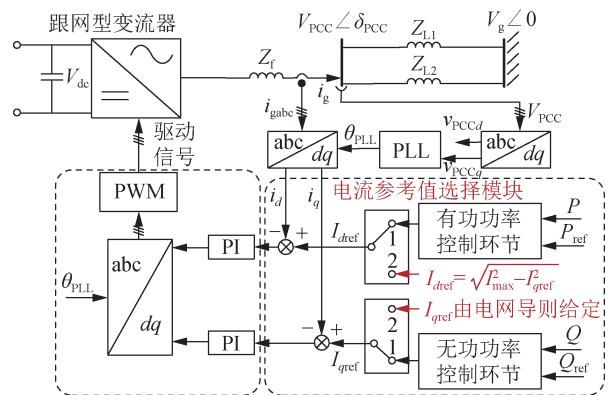


图 1 GFL-VSC 连接无穷大系统接线图

Fig. 1 GFL-VSC benchmark system

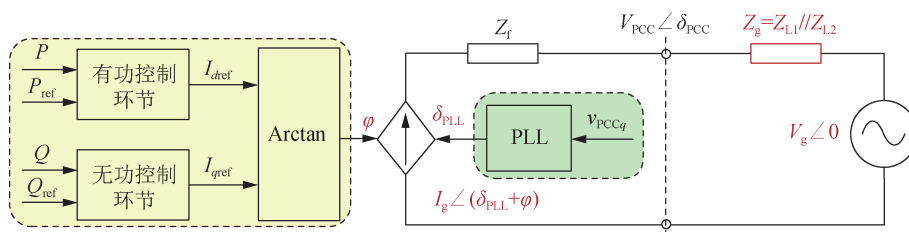


图 2 正常运行时 GFL-VSC 系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of GFL-VSC during normal operation

取 $2 \sim 6^{[30-31]}$ 。

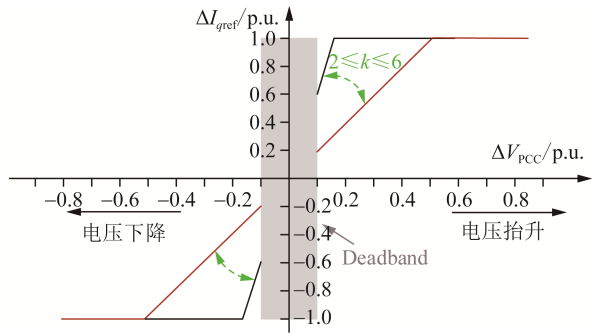


图 3 德国电网导则要求跟网型变流器注入无功电流曲线
Fig. 3 Requirement from the German grid code of GFL-VSC on the reactive current injection

GFL-VSC 通过 PLL 和无穷大母线相连, PLL 的具体控制结构如图 4 所示。

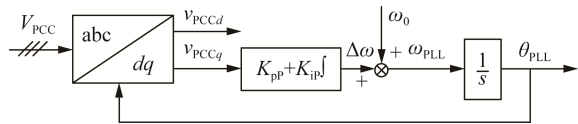


图 4 PLL 控制结构图
Fig. 4 Control diagram of PLL

图 4 中, v_{PCCd} 和 v_{PCCq} 分别表示 V_{PCC} 的 d 轴和 q 轴分量, K_p 和 K_i 分别表示 PLL 的比例和积分环节增益, PLL 通过将 v_{PCCq} 锁定到 0, 实现对电网相角的跟踪。其动态方程写为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{PLL} = \int \left[\omega_0 + \left(K_p + \int K_i \right) \cdot v_{PCCq} \right] dt \\ \delta_{PLL} = \theta_{PLL} - \omega_0 t = \int \left[\left(K_p + \int K_i \right) \cdot v_{PCCq} \right] dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_0 表示无穷大母线节点角频率, 即系统角频率参考值; θ_{PLL} 表示 PLL 输出角度; δ_{PLL} 表示 θ_{PLL} 相对无穷大母线的功角。以 V_{PCC} 的转换为例, Park 变换可以具体表示为:

$$\begin{bmatrix} v_{PCCd} \\ v_{PCCq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL} & \cos(\theta_{PLL} - 120^\circ) & \cos(\theta_{PLL} + 120^\circ) \\ \sin \theta_{PLL} & \sin(\theta_{PLL} - 120^\circ) & \sin(\theta_{PLL} + 120^\circ) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{PCCa} \\ V_{PCCb} \\ V_{PCCc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: V_{PCCa} 、 V_{PCCb} 、 V_{PCCc} 分别为 PCC 三相电压。

综上所述, 图 2 所示 GFL-VSC 系统各电气量之间的向量关系可表示为图 5。

稳态运行时, $v_{PCCq} = 0$, 此时, $\delta_{PLL} = \delta_{PCC}$ 。然而在暂态过程中, 由于 PLL 带宽的限制, 在故障发生后 v_{PCCq} 不能被立刻锁定至 0。并且, 由于 PLL 的带宽远小于内环电流控制的带宽, 在故障过程中电流参考值根据电网导则给定, 因此, GFL-VSC 系统的暂态构成由

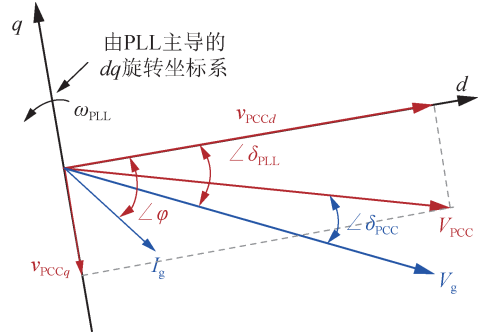


图 5 各电气量向量关系图
Fig. 5 Phasor diagram of different vectors

PLL 的暂态过程主导。 v_{PCCq} 可表示为:

$$v_{PCCq} = v_{zq} + V_{gq} \quad (3)$$

式中: v_{zq} 表示经线路阻抗 Z_g ($Z_g = Z_{L1} // Z_{L2}$) 压降的 q 轴分量; V_{gq} 表示无穷大母线电压的 q 轴分量。线路阻抗由线路电阻 (R_g) 和电抗 (X_g) 组成, 可表示为: $Z_g = R_g + jX_g$, 则 v_{zq} 和 V_{gq} 可进一步表示为:

$$\begin{cases} v_{zq} = i_d X_g + i_q R_g \\ V_{gq} = -V_g \sin \delta_{PLL} \end{cases} \quad (4)$$

将 (3) 和 (4) 代入到式 (1) 中, δ_{PLL} 可进一步表示为:

$$\dot{\delta}_{PLL} = \int \left(K_p + \int K_i \right) \left(i_d X_g + i_q R_g - V_g \sin \delta_{PLL} \right) dt \quad (5)$$

基于上述分析, GFL-VSC 系统的暂态稳定性可以由式 (5) 表示。当 v_{PCCq} 等于 0 时, 系统处于稳态工作点。因此, 系统存在平衡点的条件为:

$$i_d X_g + i_q R_g = V_g \sin \delta_{PLL} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 单 GFL-VSC 系统平衡点存在的条件为:

$$\left| i_d X_g + i_q R_g \right| \leq V_g \quad (7)$$

根据上述分析, GFL-VSC 系统的电压-功角关系如图 6 所示。参考同步机等面积法则, 在故障前, 系统工作在平衡点 a 点处, 此时 PLL 输出角度相对于无穷大母线角度的功角差为 δ_0 , 在故障发生时刻, PLL 输出角度不会发生突变, 此时系统工作点由 a 点运动到 b 点, 当系统满足式 (6) 时, 系统在故障后将存在 2 个工作点, 即 c 点和 d 点。系统将由 b 点继续运动并穿过 c 点, 此时系统的加速面积可表示为 S_1 。当系统越过 c 点之后, 将开始减速, 此时系统的最大减速面积可表示为 S_2 。当系统加速面积小于减速面积, 即 $S_1 < S_2$ 时, 故障后系统将稳定工作在平衡点 c 点; 当 $S_1 = S_2$ 时, 故障后系统将工作在临界平衡点 d 点; 当 $S_1 > S_2$ 时, 故障后系统将穿过 d 点, 并失去稳定。

综上, 故障后单 GFL-VSC 系统实现稳态恢复的必要条件可归纳为: 1) 故障后系统存在稳态工作点, 即系统在故障后的运行条件满足式 (6); 2) 系统暂态

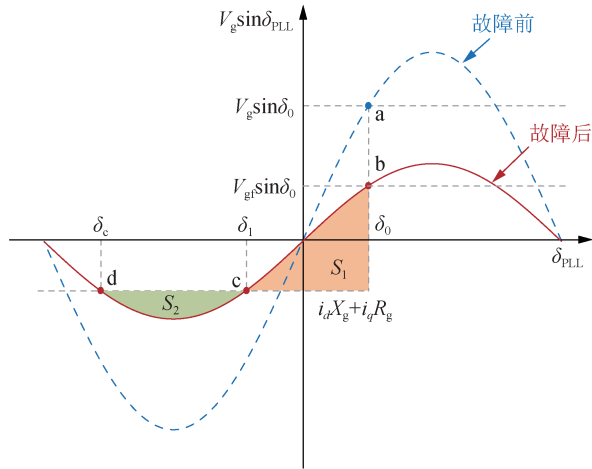


图 6 单 GFL-VSC 并网系统故障前后电压-功角曲线

Fig. 6 Voltage-angle curve of GFL-VSC connected systems before and after fault

过程中加速面积 S_1 小于减速面积 S_2 。

为了进一步探究影响单 GFL-VSC 系统暂态稳定性的因素,文献[28]指出,作为一个二阶系统,PLL 的动态过程主要由阻尼比 ζ 和调节时间 t_s 这两个指标影响,具体可表示为:

$$\begin{cases} \zeta = \frac{K_{pp}}{2} \sqrt{\frac{V_g}{K_{ip}}} \\ t_s = \frac{9.2}{K_{pp} \cdot V_g} \end{cases} \quad (8)$$

在动态过程中,线路电抗可表示为:

$$X_g = (\omega_0 + \dot{\delta}_{PLL}) L_g \quad (9)$$

式中: L_g 表示线路的电感大小。

对式(5)左右两边同时进行微分,并将式(9)回代到式(5)中,可得:

$$\ddot{\delta}_{PLL} = \frac{K_{ip}}{1 - K_{pp} i_d L_g} [i_d (\omega_0 + \dot{\delta}_{PLL} L_g) + i_q R_g - V_g \sin \delta_{PLL}] - \frac{K_{pp} V_g \cos \delta_{PLL}}{1 - K_{pp} i_d L_g} \cdot \dot{\delta}_{PLL} \quad (10)$$

文献[28]进一步研究了阻尼比 ζ 和调节时间 t_s 对于跟网型变流器暂态稳定性的影响,仿真系统如图 1 所示,跟网型变流器具体参数如表 1 所示。

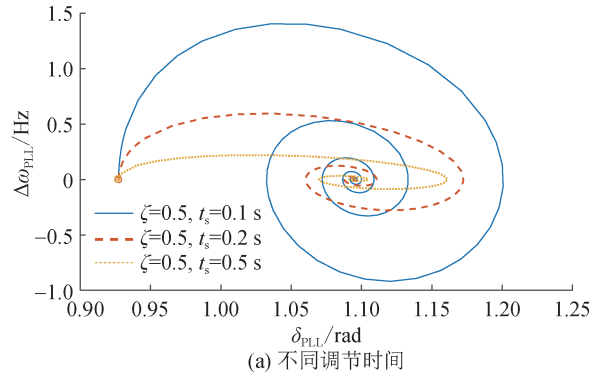
表 1 跟网型变流器控制参数

Table 1 Parameters of the tested grid-following converter

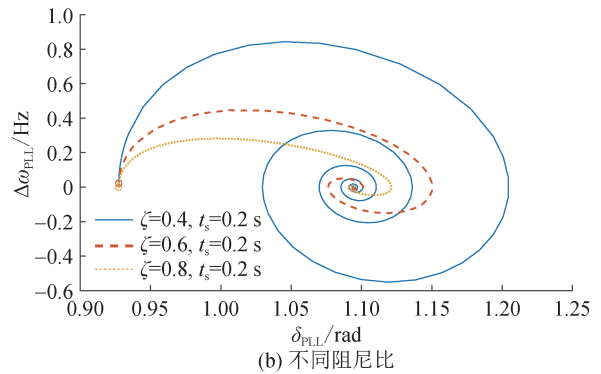
参数	数值	参数	数值
无穷大母线电压/V	400	线路电感/mH	25
额定功率/kW	200	线路电阻/ Ω	0.1
额定频率/Hz	50	阻尼比 ζ	0.5
额定电流/A	500	调节时间 t_s/s	0.2

故障设置为 $t=0.5$ s 时,无穷大电压跌落 0.2 p. u., 在不同阻尼比和调节时间场景下仿真结果如图 7 和

图 8 所示,图 7 中 $\Delta\omega_{PLL}$ 为 PLL 输出角频率偏差。结果表明,适当增大阻尼比与调节时间,可提升跟网型变流器的暂态同步稳定性。



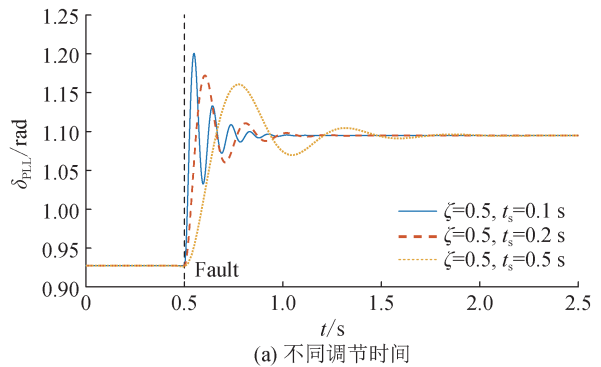
(a) 不同调节时间



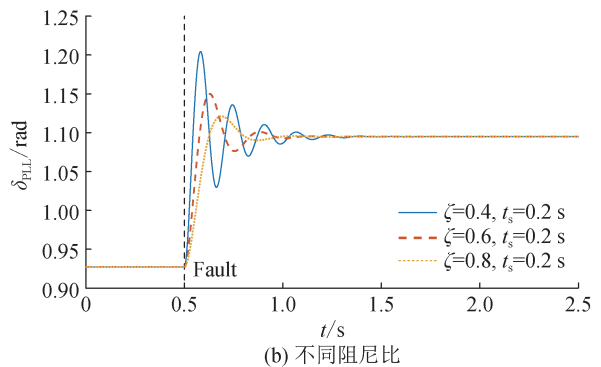
(b) 不同阻尼比

图 7 不同参数下扰动后系统相图

Fig. 7 Phase portrait with different parameters in the GFL-VSC system



(a) 不同调节时间



(b) 不同阻尼比

图 8 不同参数下锁相环输出角度

Fig. 8 PLL angle with different parameters in the GFL-VSC system

基于上述跟网型变流器暂态稳定性的理论基础,现有文献进一步研究了不同影响因素对于单跟

网型系统暂态稳定性的影响,及相应的暂态稳定性提升控制策略,具体总结如表 2 所示。

表 2 跟网型变流器暂态稳定机理及提升控制策略

Table 2 Transient stability mechanism and enhanced control strategy for GFL-VSC

影响因素	失稳机理	提升策略	代表文献
短路比(short circuit ratio, SCR)	短路比越低,电流注入对并网点电压的影响越强,对暂态稳定越不利	优化系统结构,提高系统短路比	[8, 32-33]
有功/无功电流注入	有功电流越小,无功电流越大,对暂态稳定性越有利;当电流功率因数角与电网阻抗角匹配时,最有利于暂态稳定	协调有功/无功电流注入,尽可能使电流功率因数角与电网阻抗角匹配	[32, 34-38]
电压相角跳变	相角跳变越大,对暂态稳定越不利	提出相应控制策略降低相角跳变	[32-33, 36]
锁相环带宽	锁相环带宽越高,频率超调越大,导致故障极限切除时间减小,恶化暂态稳定	整定锁相环参数,控制锁相环带宽	[28, 32-33, 39]
锁相环等效阻尼/调节时间	锁相环等效阻尼/调节时间越大,对暂态稳定性越有利	整定锁相环参数,适当增大等效阻尼/调节时间	[28, 32]
锁相环控制参数	锁相环比例增益系数越大,积分增益系数越小,对暂态稳定越有利	整定锁相环参数	[28, 32, 40]
有功外环控制带宽	有功外环控制带宽越低,对暂态稳定越有利,而受无功外环的影响较小	适当降低有功外环控制带宽	[32, 41]
电流内环控制带宽	电流内环带宽越低,对暂态稳定越不利	适当增大电流内环控制带宽	[32, 42]
故障深度	电压跌落程度越深,对暂态稳定越不利	注入无功电流,缓解电压跌落程度	[32, 34]
故障类型(对称/不对称故障)	不对称故障引入正/负序耦合,而负序电流注入不利于系统暂态稳定	控制负序无功电流注入大小	[43-44]

1.2 构网型变流器暂态稳定机理及提升控制策略

1.2.1 典型构网型控制结构

构网型变流器可主动建立电网电压与频率基准,具备电压源并网特性。依据其外层功率-频率/电压控制环节的阶次划分为“一阶控制”和“二阶控制”,其典型结构如图 9(a)–(d)所示。

其中,图 9(a)和(b)为一阶控制结构,图 9(c)和(d)为二阶控制结构。可以看出,一阶控制下,构网型变流器无法提供等效惯量,而在二阶

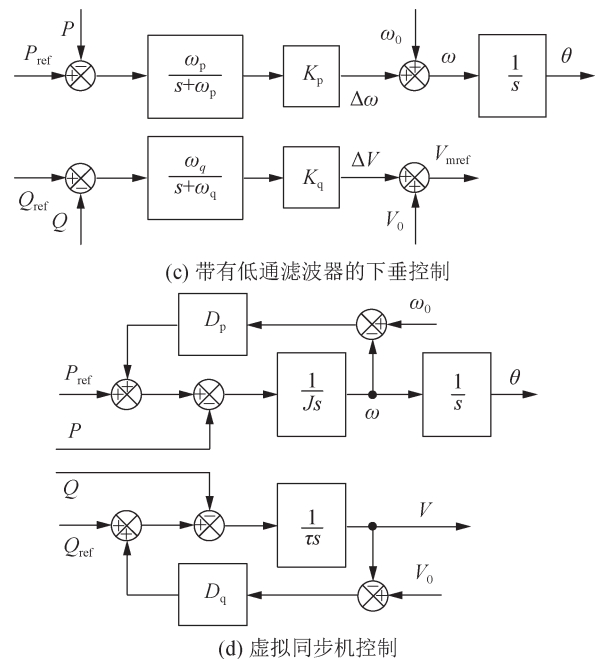
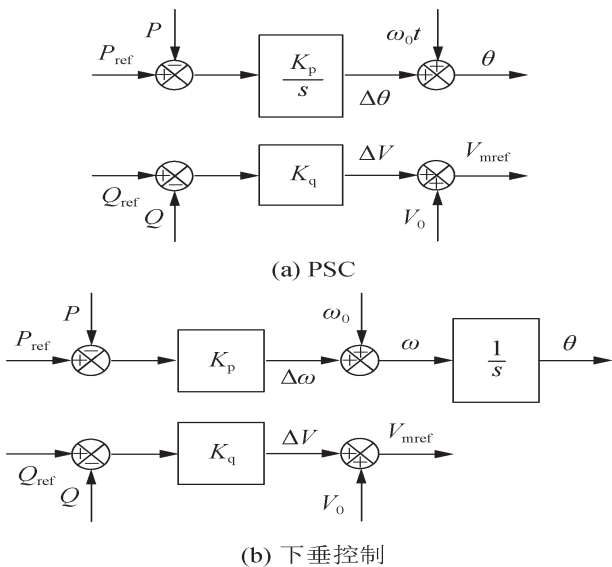


图 9 四种典型的构网型控制结构

Fig. 9 Four typical GFM control schemes

控制下,构网型变流器可向系统提供等效惯量和等效阻尼。不难看出,图 9(a)和(b)可互相当效。与此同时,现有文献表明,在控制参数适当配比的条件下,图 9(c)和(d)亦可互相当效^[45]。具体而言,在二阶构网型变流器中,等效关系可表示为:

$$\begin{cases} J = \frac{1}{K_p \omega_p} \\ D_p = \frac{1}{K_p} \\ \tau = \frac{1}{K_q \omega_q} \\ D_q = \frac{1}{K_q} \end{cases} \quad (11)$$

式中: J 为惯性常数; K_p 为有功环节下垂控制系数; ω_p 为有功环节低通滤波器截止频率; D_p 为有功环节

阻尼系数; τ 为无功环节积分时间常数; K_q 为无功环节下垂控制系数; ω_q 为无功环节低通滤波器 (low pass filter, LPF) 截止频率; D_q 为无功环节阻尼系数。

本文选取图 9(b) 和 (c) 作为代表性控制结构, 分别分析一阶与二阶 GFM-VSC 的暂态稳定机理与相应控制策略。

1.2.2 一阶控制构网型变流器暂态稳定机理

为便于机理剖析, 首先研究无惯量的一阶构网型变流器, 其控制结构如图 10 所示。

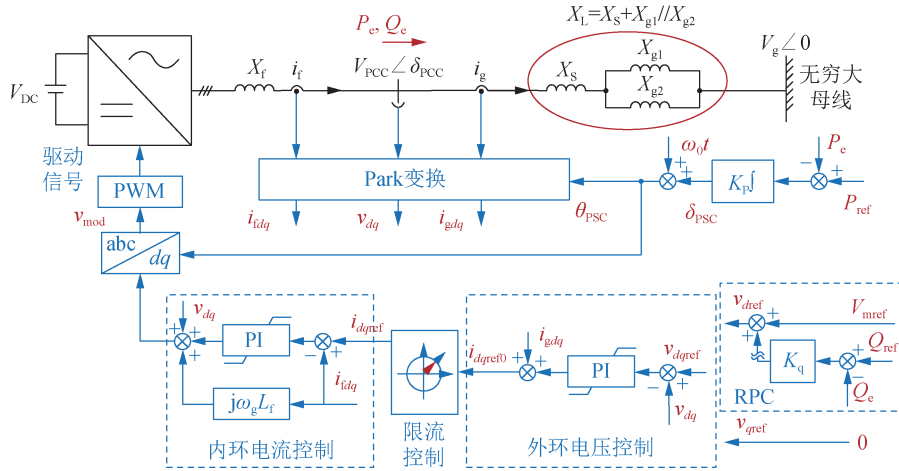


图 10 一阶构网型变流器控制框图

Fig. 10 Control diagram of the first-order GFM-VSC

该控制结构中, 直流侧母线电压 V_{DC} 被假设近似恒定^[45]; 变流器经 L 型滤波器接入电网, 其滤波电感阻抗值记为 X_f 。该控制结构通过有功-频率下垂 (P - f droop) 生成同步并网角, 通过无功-电压下垂 (Q - V droop) 生成电压参考值。由于输电线路电阻较小, 可近似忽略, 因此, 输电线路采用等值电抗建模, 并用 X_{g1} 和 X_{g2} 分别表示线路 L_1 和 L_2 的电抗大小。该系统中, 变流器通过输电线路与无穷大母线相连。并网 PCC 点电压与相角分别记为 V_{PCC} 、 δ_{PCC} , 无穷大母线电压记为 $V_g \angle 0^\circ$ 。变流器侧与电网侧电流分别为 i_t 与 i_g 。 X_s 表示变压器的等效阻抗。 δ_{PSC} 表示功率同步控制 (power synchronization control, PSC) 相对于无穷大母线的控制相角, 即构网型变流器并网同步功角, 其表达式为:

$$\begin{aligned} \delta_{PSC} = \theta_{PSC} - \theta_g &= K_p \int (P_{ref} - P_e) dt + \omega_0 t - \omega_0 t = \\ & K_p \int (P_{ref} - P_e) dt \end{aligned} \quad (12)$$

式中: θ_{PSC} 为功率同步控制输出角度; θ_g 为无穷大母线相角 (一般取 0°); P_e 为测得有功功率; P_{ref} 为其参考值。在一阶构网型变流器中, PCC 电压参考值由无功-电压下垂控制得到:

$$v_{dref} = V_{mref} + K_q \cdot (Q_{ref} - Q_e) \quad (13)$$

式中: V_{mref} 与 v_{dref} 分别为初始与修正后的 d 轴电压参考值; Q_{ref} 与 Q_e 分别为无功参考值与测量值; K_q 为无功下垂增益。 P_e 和 Q_e 可具体表示为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{PCC} V_g \sin \delta_{PCC}}{X_L} \\ Q_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{PCC}^2 - V_{PCC} V_g \cos \delta_{PCC}}{X_L} \\ X_L = X_s + X_{g1} // X_{g2} \end{cases} \quad (14)$$

式中: X_L 表示等效电网线路阻抗。

本文采用了文献[46]中提出的圆形电流限幅器。对于在电流受限条件下运行的非惯性构网型变流器系统, 在故障状态下, 其电流被限制为 $I_M \angle (\delta_{PSC} + \varphi)$, 其中 I_M 表示允许的最大变流器侧电流幅值, φ 表示电流相角 ($\tan \varphi = i_{gq} / i_{gd}$)。参考文献[46], 电流参考值可表示为:

$$i_{dqref} = k_{Pi} (v_{dqref} - v_{dq}) + i_{gdq} \quad (15)$$

式中: k_{Pi} 为电压控制比例增益; v_{dqref} 和 i_{dqref} 为 dq 轴电压和电流参考值; v_{dq} 和 i_{gdq} 为 dq 轴电压和电流测量值。由于电容器的动态特性可以忽略, 因此 $i_{tdq} = i_{gdq}$ ^[46], i_{tdq} 为变流器侧 dq 轴电流。

由于内环电流控制的带宽较大, 认为 $i_{tdq} = i_{dqref}$, 式 (15) 可简化为:

$$i_{idq} = \sigma i_{dref0} = \sigma k_{pi} (v_{dref} - v_{dq}) + \sigma i_{gdq} \Rightarrow R_e i_{idq} = v_{dref} - v_{dq}, R_e = \frac{1 - \sigma}{\sigma k_{pi}} \quad (16)$$

式中: σ 为正实数; R_e 表示虚拟电阻值, 表明在圆形电流限幅器作用下, 仅电流幅值被削减, 而且相量角保持不变。基于上述推导, 可得到 R_e 表达式:

$$R_e = \max \left\{ 0, \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{\frac{V_{mref}^2 - 2V_{mref}V_g \cos \delta_{psc} + V_g^2}{I_M^2} - X_L^2} \right\} \right\} \quad (17)$$

由式(17)可知, 当电流限幅被触发时, 一阶构网型变流器等效为与可调电阻 R_e 串联的电压源。当未触发电流限幅时, $R_e=0$ ^[46]。

参考式(14), 如图 11 所示, 在故障发生前, 功率-功角曲线可表示为图中的蓝色虚线, 一阶构网型变流器系统最初运行于稳态工作 a 点, 此时物理角 δ_{pcc} 等于控制角 δ_{psc} 。当发生故障且故障切除时间 (fault clearing time, FCT) 大于临界切除时间 (critical clearing time, CCT) 时, 一阶构网型变流器可能出现显著功率摆动, 可分为以下三个阶段。

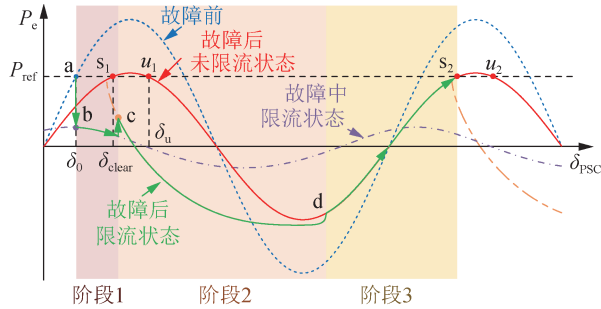


图 11 不同阶段下的有功-功角曲线
Fig. 11 P- δ curves during different stages

1) 阶段 1: 故障期间。

在故障期间, 等效电路如图 12 所示。绿色部分表示故障期间的等效电网阻抗和电压源。此阶段变流器的输出功率可表示为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{R_e(V_{PCC}^2 - V_{PCC}V_{ge} \cos \delta_{psc})}{R_e^2 + X_g^2} + \frac{X_g V_{PCC} V_{ge}}{R_e^2 + X_g^2} \sin \delta_{psc} - I_M^2 R_e \\ X_g = X_s + X_L // X_{gnd} \\ V_{ge} = \frac{X_{gnd}}{X_L // X_{gnd}} V_g \end{cases} \quad (18)$$

式中: V_{ge} 表示电压幅值; X_{gnd} 为故障接地阻抗。因此, 功率-功角关系由图 11 中的紫色虚线表示。运行点会立即从 a 点跳变至 b 点, 并沿着紫色功率-功角曲线移动。

2) 阶段 2: 故障后电流限幅模式。

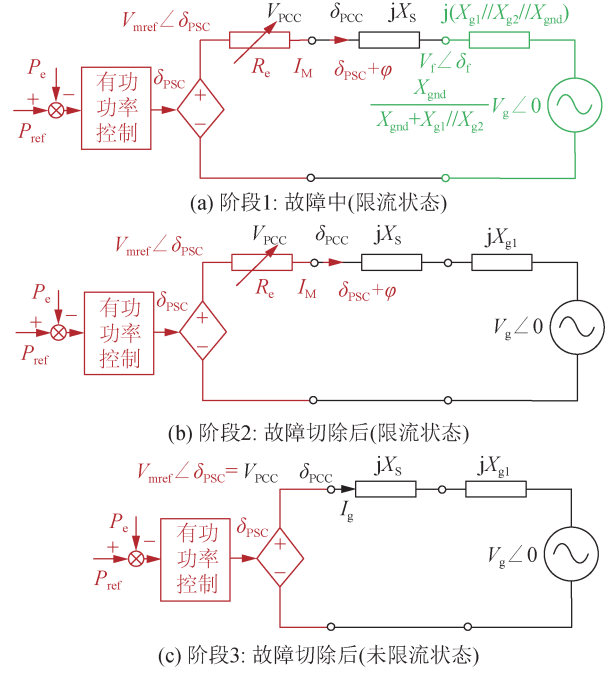


图 12 不同阶段下一阶构网型变流器等效电路图
Fig. 12 Equivalent circuit of the non-inertial GFM-VSC system

通过断开图 10 中的 X_{g2} 来切除故障, 此时运行点可能转移到 c 点。若故障切除后 FCT 超过 CCT, 则物理角 δ_{pcc} 仍可能较大, 系统无法立即退出电流限幅模式。在这种情况下, $\delta_{pcc} \neq \delta_{psc}$ 。在此阶段, 输出功率可进一步表示为:

$$P_e = \frac{R_e(V_{PCC}^2 - V_{PCC}V_g \cos \delta_{psc})}{R_e^2 + X_L^2} + \frac{X_L V_{PCC} V_g}{R_e^2 + X_L^2} \sin \delta_{psc} - I_M^2 R_e \quad (19)$$

由于故障切除后功率参考值 P_{ref} 仍大于输出功率 P_e , 根据式(12), δ_{psc} 会继续增大。在此期间, 运行点从 c 点向 d 点移动, 非惯性 GFM-VSC 系统在电流限幅模式下维持一段时间。随着 δ_{psc} 增加, 系统可能出现显著的功率摆动。

3) 阶段 3: 退出电流限幅模式。

一阶构网型变流器系统将在运行到工作 d 点时退出电流限幅模式。其等效电路如图 12(c) 所示, 在该过程中, δ_{pcc} 再次等于 δ_{psc} , 系统将沿着图 11 中红色实线表示的功率-功角曲线向 s_2 点移动, 并最终稳定在该点。

$$P_e = \frac{V_{PCC} V_g}{X_s + X_{g1}} \sin \delta_{psc} \quad (20)$$

1.2.3 二阶控制构网型变流器暂态稳定机理

进一步探究了二阶构网型暂态稳定性, 为消除负载不平衡导致的功率测量分量波动, 通常在功率控制环中加入低通滤波器, 如图 13 所示。

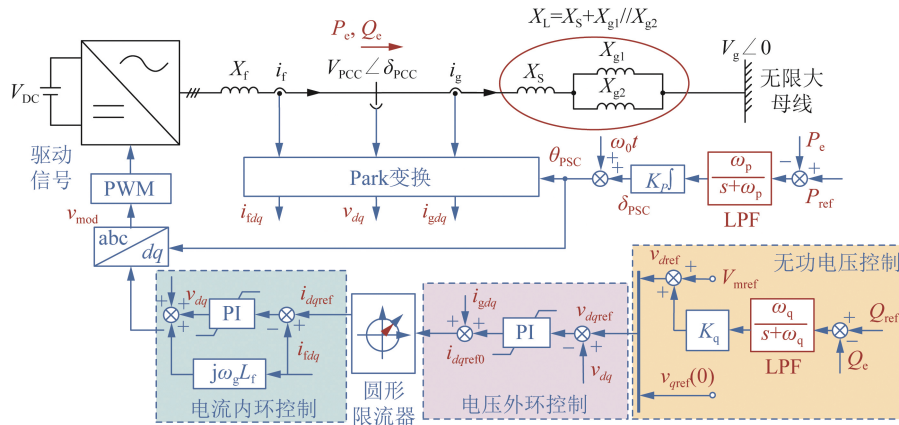


图 13 二阶构网型变流器控制框图

Fig. 13 Control diagram of the second-order GFM-VSC

为增强分析的普适性,在有功与无功功率环路中分别采用两个截止频率不同的LPF,即 ω_p 和 ω_q 。因此,变流器角频率和电压的控制过程可表示为:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + K_p \frac{\omega_p}{s + \omega_p} (P_{ref} - P) \\ V_{mref} = V_0 + K_q \frac{\omega_q}{s + \omega_q} (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (21)$$

式中: P 、 Q 分别为变流器实际输出端有功、无功功率; V_0 为电压基准值。

由于引入了低通滤波环节及多回路耦合,系统呈现更明显的高阶非线性特征,难以获得类似一阶构网型变流器那样的显式有功-功角解析关系。

为进一步分析构网型变流器控制参数对系统暂态稳定性的影响,文献[45]基于图13所示的二阶构网型变流器模型,考察了不同控制参数条件下系统同步功角的振荡过程,构网型变流器的具体参数见表3。

表 3 二阶构网型变流器控制参数

Table 3 Parameters of the tested second-order GFM-VSCs

参数	数值(标么值)
无穷大母线电压/V(p.u.)	400(1.0)
额定有功功率/kW(p.u.)	100(0.5)
额定无功功率/kvar(p.u.)	70(0.35)
额定频率/Hz(p.u.)	50(1.0)
额定电流/A(p.u.)	500(1.0)
线路电感/p.u.	0.8
线路电阻/ Ω	0
功率同步控制参数/p.u.	0.04
无功功率控制参数/p.u.	0.1
功率同步控制LPF截止频率/(rad/s)	$0.3 \times 2\pi$
无功控制LPF截止频率/(rad/s)	$0.5 \times 2\pi$

工况设置为:在 $t=0.5$ s时无穷大母线电压突降至 0.2 p.u.。在不同功率同步控制参数 K_p 和无功电压控制参数 K_q 下,扰动后的相图如图14所示;在不同滤波器参数 ω_p 和 ω_q 下的相图如图15所示,图中 Δf_{PSC} 为功率同步控制输出频率偏差。仿真结果表明,较小的 K_p 和较大的 ω_p 有助于提升系统在扰动后的暂态稳定性;相比之下, K_q 和 ω_q 对暂态稳定性的影响相对较弱,但总体上较小的 K_q 和较小的 ω_q 更有利于抑制振荡,改善系统扰动后的稳定水平。

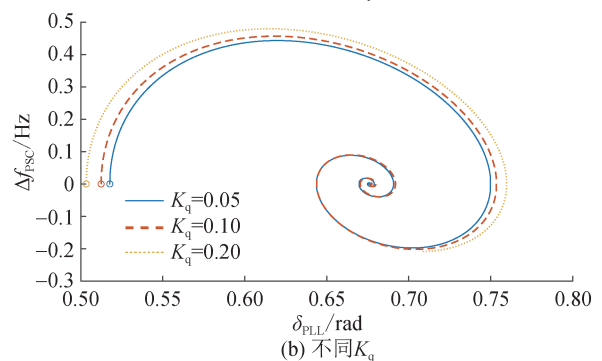
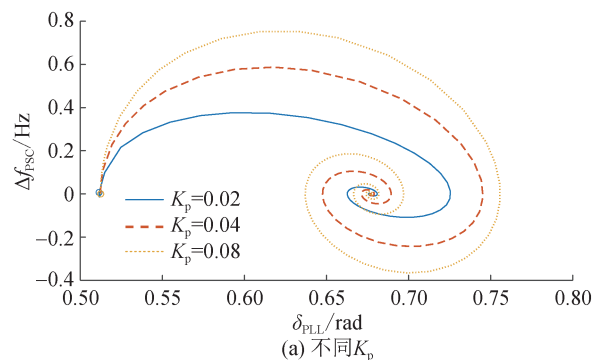


图 14 不同 K_p 、 K_q 参数下扰动后构网型变流器相图

Fig. 14 Phase portrait with different K_p and K_q in the GFM-VSC system

除文献[45]外,现有国内外文献对二阶构网型变流器暂态稳定性影响因素展开了分析,具体如表4所示。

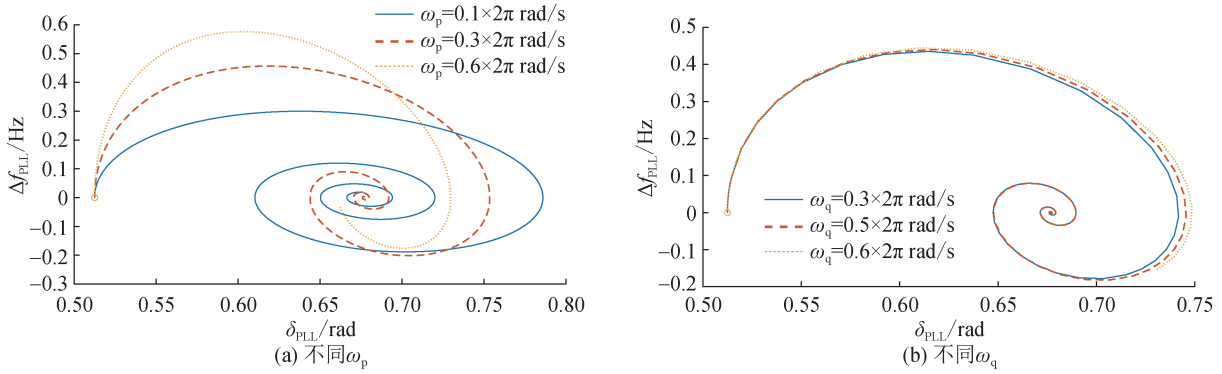


图 15 不同滤波器参数下扰动后构网型变流器相图

Fig. 15 Phase portrait with different LPF parameters in the GFM-VSC system

表 4 二阶构网型变流器暂态稳定机理及提升控制策略

Table 4 Transient stability mechanism and enhanced control strategy for GFM-VSC

影响因素	失稳机理	提升策略	代表文献
功率同步控制参数(K_p)	K_p 越大, 越不利于暂态稳定	合理设计参数	[32, 38, 45]
有功 LPF 参数(ω_p)	ω_p 越大, 越有利于暂态稳定		
等效阻尼 D	等效阻尼 D 越小, 越不利于系统暂态稳定	合理设计参数, 增大等效阻尼 D	[32, 38]
功率参考值	功率参考值越大, 将导致动态过程中减速面积变小, 不利于系统暂态稳定	合理设置功率参考值	[32, 47]
电网强度 SCR	低 SCR 会降低可传输功率上限并压缩减速面积, 不利于系统暂态稳定	进行宽 SCR 适应性设计与参数鲁棒整定	[32, 47-48]
限流控制	触发限流控制会使得系统在暂态过程中减速面积减小, 不利于暂态稳定	合理选择限流控制策略, 采用前馈控制等增大减速面积	[32, 48]
无功电压控制	无功-电压外环可能降低内电势, 不利于系统暂态稳定	合理设置无功-电压控制参数, 采用前馈控制等增大减速面积	[32, 47]

2 多变流器暂态稳定性分析及暂态稳定提升控制策略

在高比例电力电子化电力系统中, 跟网型变流器、构网型变流器与同步发电机常以多源并存方式协同运行, 系统暂态稳定性呈现出显著的强耦合、强非线性和多约束特征。与单一装置相比, 多变流器系统不仅涉及不同同步机理之间的动态交互, 还受到电流限幅、控制切换、保护动作以及网络强弱变化等因素的共同影响。因此, 单机层面的机理认识虽然是分析基础, 但若想要形成适用于混合系统的稳定评估与控制方法, 仍需从系统层面对分析方法和稳定提升思路进行进一步归纳。

2.1 多变流器的暂态稳定性分析方法

针对多变流器系统, 现有暂态稳定分析方法大致可分为三类: 基于微分代数方程的求解方法、基于能量函数的直接法, 以及基于人工智能的数据驱动方法。三类方法在机理刻画能力、计算成本、可解释性和在线应用潜力方面各有侧重, 适用于不同规模和不同层次的研究对象, 见表 5。

2.1.1 微分代数方程求解法

微分代数方程求解法通过建立并求解系统 DAEs 模型, 对变流器并网系统的暂态动态过程进行刻画。依据模型阶数与分析侧重点不同, 该方法可进一步细分为基于低阶状态方程的相图分析法以及基于全阶微分-代数方程的时域仿真法。

相图法主要面向低阶或降阶后的系统。其基本思路是推导能够表征主导暂态过程的解析微分方程 (如式 (10) 和 (12)), 并通过相平面轨迹直观展示稳定域、平衡点及其吸引特性。例如, 该方法可用于分析 PLL 参数变化对 GFL-VSC 暂态行为的影响^[28]。然而, 相图法难以直接扩展至高阶多机系统, 且对电流限幅、控制模式切换等非光滑约束的刻画能力相对有限。

时域仿真法主要适用于高阶多机系统。该方法通常采用数值积分 (如梯形法、龙格-库塔法等) 对 DAEs 进行求解, 并输出功角、频率、电压等关键状态量的时域响应轨迹^[45]。在暂态稳定判据方面, 相关研究多结合控制功角、物理功角或频率响应等状态量变化, 并配合阈值或终止准则对稳定与失稳轨迹

表 5 暂态稳定性分析方法的比较
Table 5 Comparison of transient stability analysis methods

方法	核心思想	优点	局限性	适用建议	
微分代数方程求解法	相图法 ^[28, 45]	通过推导描述主导暂态过程的低阶解析微分方程,在相平面中刻画系统轨迹演化、平衡点分布及稳定域	机理直观,便于识别平衡点类型与稳定边界;计算量较小,适合开展定性分析与参数敏感性研究	难以直接推广至高阶多机系统;对电流限幅、模式切换等非光滑约束的刻画能力有限;通常难以给出定量稳定裕度	适用于单变流器系统或降阶后的低阶模型,用于暂态机理分析、稳定边界初步识别及控制参数预整定
	时域仿真法 ^[49-51]	通过数值积分求解系统微分-代数方程组,获得功角、频率、电压等状态量的全过程时域响应	通用性强,可自然纳入限流、控制饱和、保护动作、装置解列及模式切换等复杂约束;适用于任意阶次模型	计算成本随系统规模和工况数量显著增加;难以直接揭示失稳机理;在线应用时通常需借助附加判据提高效率	适用于高阶多机系统的离线暂态过程复现、不同工况对比分析以及控制策略验证
能量函数法(直接法)	标准直接法 ^[52-54]	通过构造暂态能量函数或李雅普诺夫函数,将系统当前能量与临界能量进行比较,以判别稳定性并估计稳定裕度	可给出能量裕度、临界切除时间等定量指标;机理可追溯,便于分析失稳原因及参数影响	在高维强非线性系统中,临界能量与吸引域边界求解困难;限流、切换等非线性约束会导致能量面分段,降低判据适用性	适用于中低阶系统的暂态稳定裕度量化的、临界条件分析及控制参数设计
	降阶聚合法 ^[55-56]	通过时间尺度解耦、同调聚合或等值降阶简化原系统,再在降阶模型上构造能量函数或扩展判据进行稳定分析	在保留主导动态特征的前提下降低模型维数,兼顾一定机理解释能力与计算效率,适合区域级快速评估	结果依赖降阶假设与聚合精度;对异构设备和强耦合场景的适配性有限;降阶误差可能影响稳定边界判断	适用于区域级或中等规模多机系统的快速评估与边界近似计算
基于人工智能的方法	离线训练-在线判稳 ^[57-58]	利用仿真数据或历史运行数据构建带标签样本集,训练模型学习“系统状态-稳定性”映射关系,并用于在线快速判稳	评估速度快,适合大规模系统的实时筛查;对大样本工况具有较强覆盖能力	对训练样本分布依赖较强,在分布外场景下易产生偏差;可解释性不足,难以直接揭示物理机理	适用于大规模系统在线稳定性筛查、预警和快速辅助决策
	主动迁移学习与持续学习模型 ^[59-63]	通过主动学习筛选边界样本,并结合迁移学习、增量学习或持续学习机制,实现模型对新场景的快速更新与适配	可降低新场景下的数据标注与重训练成本;有助于提高模型在运行方式变化、拓扑变化条件下的适应性	对样本筛选策略、更新机制和风险控制较为敏感;在限流、切换等复杂工况下仍需对不确定性进行约束	适用于运行方式频繁变化、电网拓扑调整或新能源渗透率持续变化场景下的在线模型更新
	物理信息融合模型 ^[64]	将能量函数、李雅普诺夫稳定理论或控制约束等物理先验嵌入网络结构或损失函数,在数据驱动建模中引入机理约束	可在一定程度上兼顾预测性能与物理一致性,提升模型可解释性、泛化能力与工程可信度	需平衡物理约束强度与预测精度;模型训练通常仍依赖较多标注数据;若物理先验与实际控制规律不一致,可能引入偏差	适用于要求机理可追溯、泛化能力较强的在线评估场景

进行判别。该方法具有较强的通用性,但其计算代价随系统规模与工况组合数量增加而显著上升,因此更适合作为高保真离线分析工具,并常与快速筛选准则配合使用^[49-51]。

2.1.2 能量函数法

能量函数法(亦称直接法)通过构造系统“暂态能量函数”,并比较系统当前能量与临界能量来判别稳定性。与时域仿真法相比,这类方法更强调从能量演化和稳定边界角度理解系统失稳过程,因此不仅能给出稳定与否的判断,还能够提供能量裕度、临界切除时间等更具物理含义的定量指标。根据建模复杂度和降阶方式不同,现有研究又可进一步分为标准直接法与降阶聚合法。

标准直接法的核心在于构建能够反映系统能量

演化规律的函数(如李雅普诺夫函数),并以临界能量(对应吸引域边界)作为稳定判别依据。该方法适合分析中低阶系统的暂态稳定机理,尤其适用于研究控制参数、阻尼和惯量等因素对稳定裕度的影响^[52-54]。不过,在高维强非线性系统中,临界能量和吸引域边界的求解仍然较为困难;当系统存在电流限幅、模式切换或分段控制时,能量函数本身往往呈现分段或非光滑特性,从而增加了函数构造和数值求解的难度,降低判别精度与适用性。

降阶聚合方法旨在降低系统分析维度:一方面,可通过扩展等面积法(extended equal-area criterion, EEAC)将多机系统稳定边界问题转化为等面积关系以实现判别^[55],另一方面,可通过时间尺度解耦或同调聚合简化系统模型(例如将多台 GFM-VSC 聚合为

“等效单机”),再进一步构造相应的能量函数并进行稳定性评估^[56]。需要指出的是,降阶与聚合过程不可避免引入建模误差,通常需结合仿真进行误差标定与有效性校核,以保证分析结论的可靠性。

2.1.3 基于人工智能的方法

基于人工智能的方法依托数据驱动思想建立“系统状态-稳定性”映射关系,适用于大规模系统的快速评估与在线判稳。现有研究主要沿3条路径展开:离线训练-在线判稳方法、主动迁移学习与持续学习模型以及物理信息融合模型。

离线训练-在线判稳方法通常利用时域仿真或历史运行数据生成带稳定性标签的数据集,并经特征提取与处理后训练人工神经网络等模型,进而建立“状态参量-临界切除时间(或稳定判别)”的映射关系^[57-58]。该类方法具有计算速度快、覆盖工况范围广等优势,但在分布外场景(例如未覆盖的故障类型或参数扰动范围)下可能产生较大偏差,同时可解释性相对不足。

主动迁移学习与持续学习更新方法主要面向拓扑结构变化、运行方式改变以及样本分布漂移等场景。其基本思路是在已有模型基础上,结合主动学习筛选高价值样本,并通过迁移学习、领域自适应、增量更新或持续学习机制,使模型在新场景下快速恢复性能^[59-63]。与完全重新训练相比,这类方法能够减少在线样本生成与重训练成本,缩短模型更新空窗期。不过,其效果仍取决于样本筛选策略、更新触发条件以及模型对旧知识的保持能力,典型问题包括负迁移和灾难性遗忘。

物理信息融合方法通过将李雅普诺夫稳定性理论、能量函数等物理先验嵌入网络结构或损失函数,在学习映射关系的同时引入机理约束,从而减弱纯数据驱动模型可解释性不足所带来的风险^[64-65]。该类方法的关键在于兼顾物理一致性与预测精度,并确保引入的物理约束与实际系统控制规律、电流限幅与保护需求保持一致,提升模型泛化能力与工程可用性。

2.2 多变流器暂态稳定性分析方法差异比较

不同分析方法在模型依赖程度、可纳入的工程约束、计算量级以及适用场景等方面存在明显差异,具体对比见表5。

时域仿真法通过建立包含同步机、GFL-VSC/GFM-VSC控制及保护装置的高阶模型,直接复现故障全过程,是当前工程中应用最广的暂态稳定评估手段。其优点在于建模灵活、物理含义直观,能够自然考虑电流限幅、控制饱和、保护动作、装置解列以

及模式切换等复杂非线性现象;不足在于需要对大量场景逐一积分求解,计算负担较重,因此更适合作为离线分析和校核工具^[45,49-51]。

能量函数法/直接法通过构造等价能量函数或稳定边界,在不完全依赖长时仿真的条件下评估暂态稳定裕度。其优势在于能够给出临界切除时间、能量裕度等具有明确物理意义的指标,适合开展机理分析与参数整定;但其适用性依赖等效模型质量,在限流、模式切换频繁及高维耦合场景下,函数构造与数值求解仍较困难^[52-56]。

基于人工智能的方法通过学习故障特征与稳定性之间的映射关系,可在设备模型不完全明确的情况下实现快速判稳,适合大规模工况筛查与在线预警。但这类方法对样本质量、工况覆盖范围和运行场景变化较为敏感,对分布外工况的泛化能力仍需通过迁移更新或物理约束进一步增强。

综上,时域仿真法侧重于暂态过程的高保真复现,能量函数/直接法侧重于统一判据与安全裕度量化的数据驱动方法侧重于大规模工况的快速筛查和在线预警。三类方法各有侧重,实际工程中应结合系统规模、实时性要求和模型完备程度合理选择分析方法,并通过多方法交叉验证以提高评估结果的可靠性。

2.3 多变流器系统暂态稳定提升控制策略

在实际电力系统中,跟网型变流器、构网型变流器与同步发电机通常以多源混合方式共同构成区域电网或局部微电网。此时,系统暂态稳定性不再由单一装置的动态特性所决定,而是由多种同步机理的交互耦合共同塑造。一方面,同步发电机依托机电惯量与调速系统提供频率支撑,是传统电力系统中的同步参考源;另一方面,构网型变流器通过内部电压源与下垂/功率同步控制主动建立电压与频率基准,可在弱电网或孤岛运行场景中承担电压支撑作用;跟网型变流器则依赖锁相跟踪电网相位,通常以PCC电压作为频率与相角参考。多种同步机理在同一系统内并存,使故障期间的功率交换、相角演化与控制响应表现出更强的耦合性^[20-24]。

从现有研究看,多变流器系统的暂态稳定提升思路大体可归纳为两类。第一类是保障平衡点存在或扩大可行运行域,典型做法包括在故障期间调节有功参考值、增强无功/电压支撑、优化虚拟阻抗与限流方式,以及在限流环节引入电压前馈等,以提高故障期间的可传输功率上限,避免系统落入无平衡点或非期望平衡点区域^[32,45]。第二类是在平衡点存在的前提下重塑加减功率平衡关系,典型做法包括

优化反馈机制、附加暂态阻尼、协调惯量与下垂参数、实施轨迹限幅,以及在故障恢复阶段采用分段控制或模式切换策略,以抑制超调、扩大减速区间并改善故障后收敛过程^[32,45]。

需要指出的是,这两类思路并非彼此割裂。平衡点存在性保障解决的是系统在扰动后“平衡点是否存在”的问题,而加减速关系优化解决的是系统扰动后“平衡点是否可达”的问题。对于多变流器混联系统,二者通常需要配合使用:当系统强度较弱、故障较深或限流约束较强时,应优先保证故障期间和故障切除后平衡点的存在;在此基础上,再通过阻尼、惯量和反馈机制优化提高系统的动态恢复能力,确保平衡点可达性。因而,面向工程应用的暂态稳定控制设计宜遵循“平衡点存在性优先、暂态过程优化随后”的基本思路,并结合系统强度、故障深度及控制约束进行参数整定^[32,45]。

3 暂态稳定提升的分层协同控制策略

基于前文对单机与多机暂态机理及评估方法的分析,可从“平衡点存在性—加减速能量平衡—平衡点可达性”三个层次出发,构建面向变流器并网系统的分层协同控制框架。

3.1 第一层:保证平衡点存在

暂态稳定性的首要前提是系统遭受扰动后存在可达的稳态平衡点,通过静态域扩展实现,工程实践中,可在故障区段下调有功功率参考值,直接扩大静态可行域范围,提升平衡点存在概率^[32-33,66];同时依据并网导则增强无功功率/电压支撑能力,抬升 PCC 点电压,减轻电压跌落对可传输功率上限的压缩效应^[67-68]。在此基础上,虚拟阻抗设计仍是扩展静态可行域的有效手段。无论是非对称虚拟阻抗、阻抗比值优化,还是自适应虚拟阻抗,其共同作用都在于协调故障期间的功率平衡与限流要求,从而扩大系统可运行域^[69-71],在限流控制中引入前馈或补偿环节,并结合虚拟阻抗参数优化,改善故障清除前后的平衡点可达性^[72-73]。需要说明的是,静态域扩展并不能单独解决全部暂态稳定问题。它解决的是“故障后是否还有可能回到稳定运行点”的问题,而不是“系统一定能沿着实际轨迹回到该点”的问题。因此,这一层更适合作为暂态稳定控制的前置条件,在此基础上还需要进一步关注故障后的动态恢复过程^[73-74]。

3.2 第二层:加减速能量平衡

在确保平衡点存在的前提下,暂态阶段的“加速-减速功率平衡”直接决定能量过冲幅度与功角超调

量。对于构网型变流器尤其如此,单纯依赖固定阻尼、固定惯量的参数设计往往难以兼顾首摆特性与恢复速度(如首摆超调量、振荡频率)^[45,75];因此更优的方案是根据暂态阶段对等效惯量和阻尼进行重构:故障加速阶段适当增大等效惯量和阻尼,抑制功角、频率和能量的快速上冲;故障切除后的减速阶段则适当减小等效惯量,加快系统向稳态平衡点回归^[76-77]。除阶段式参数调整外,还可通过附加阻尼与前馈补偿改善减速过程。例如,在有功控制通道中引入暂态阻尼项,或在同步控制中加入功率差前馈、频率-电压前馈,均可在一定程度上改善故障后的减速能力,提高暂态稳定裕度^[78-85]。此外,也可通过引入混合同步控制以获取额外阻尼,但需抑制大扰动下的时变负阻尼与频率突变,避免扩大“加速面积”反而导致系统失稳^[86-93]。

3.3 第三层:保证平衡点可达

当系统暂态轨迹已经逼近吸引域边界时,仅靠前两层的参数优化往往不够,还需要直接对轨迹本身进行干预,确保平衡点可达。较常见的做法是,在故障全过程中对功角、频率、功率差等关键状态量实施显式限幅,并根据状态变化动态修正功率参考值,以降低峰值和过冲,避免轨迹进一步外扩^[94-96];在此基础上,还可采用有功-电压协同控制、两阶段暂态控制或模型预测控制等方式,在电流限流、电压约束等条件下统筹故障期间支撑与故障后恢复^[97-100]。当参数调整和阻尼整形仍不足以满足暂态稳定要求时,可以进一步结合控制模式切换和虚拟阻抗重构。对于构网型变流器,可根据故障深度和限流状态在不同暂态阶段切换控制模式;对于网络参数不确定性较强的场景,可采用非对称或可调虚拟阻抗,进一步扩大稳定域^[101-102]。

从公开的工程示范项目来看,构网型储能与新能源场站协同运行、跟网/构网混合控制等思路已在一些工程中得到应用。国内方面,文献[103]总结了多项构网型变流器示范工程,包括张家口张北风光储输示范电站、张家口康保跟网/构网混合型风电场、新疆阿克陶光伏储能电站、湖北广水宝林风光一体电站以及安徽金寨县构网型储能示范电站等。文献[104]对构网型储能的国内外应用实践进行了综述:包括 Hornsdale Power Reserve、New England BESS 等海外项目,以及新疆克州阿克陶 50 MW 光伏+5 MW/10 MWh 构网型储能、额济纳旗 25 MW/25 MWh 构网型储能系统等工程。这些项目说明,上述控制路径具备一定工程可行性,尤其是在弱电网和高比例新能源场景下,构网型单元能够在限流约束内提供更

强的电压与频率支撑。

4 变流器并网系统暂态稳定性研究的挑战与展望

当前,围绕 GFL-VSC、GFM-VSC 及其混合并网系统的暂态稳定问题,相关研究已在失稳机理分析、稳定判据构建和控制策略设计等方面取得了较多进展。尤其是在单变流器系统、简单并联系统以及典型场站场景中,针对 PLL 失步、功率同步失稳、电流限幅诱发的非期望平衡点及模式切换问题,已形成较为系统的认识。然而,随着新能源和储能渗透率持续提高,系统正由“同步发电机主导”逐步走向“电力电子接口主导”,变流器控制对系统暂态同步稳定的影响愈发直接,已有研究在对象范围、模型层次和工程适用性方面仍存在明显局限。特别是在高比例甚至全变流器接口电源场景下,系统的同步机制、故障演化路径以及稳定边界定义都将不同于传统同步机系统,现有基于简单系统的分析和控制结论难以直接推广。基于此,本文将当前研究的主要挑战概括如下,并据此讨论后续值得关注的研究方向。

4.1 主要挑战

4.1.1 强非线性控制下暂态同步失稳机理揭示仍然困难

系统异构性强且运行状态变化快是变流器并网系统的突出特点。这种异构性不仅体现在风电、光伏、储能等电源属性差异上,也体现在同步方式、限流逻辑等非线性动态过程。对单个装置而言,这些差异会显著改变暂态响应;当大量异构单元在场站级、区域级乃至广域系统中共同运行时,控制环节耦合、网络耦合的交互作用会进一步增强,使系统同时呈现高维、强非线性和多时间尺度特征。尤其在深度故障、限流触发和控制序贯切换条件下,系统失稳往往不再表现为单一同步环节的失步,而更接近于多控制回路共同作用下的能量失衡和轨迹偏移。

现有研究在单机相图分析、单变流器能量函数分析以及简单双机/并联系统的稳定边界刻画方面已经取得一定进展,但这些方法通常难以同时兼顾模型准确性与可分析性。一方面,若保留详细控制环节、限流约束和网络动态,系统模型阶数会迅速上升,传统低阶分析工具难以直接适用;另一方面,若过度降阶,则容易丢失多机耦合以及故障切换过程中的关键信息。对于全变流器接口电源电力系统,这一矛盾会更加突出:由于缺乏传统同步机电源,系统同步更依赖控制器塑造,机理揭示问题将进一步从“单环节失稳”转向“多异构单元间控制同步失稳”

的统一表征问题。因此,如何考虑强非线性动态切换过程情况下识别主导失稳机制,仍是当前研究中的难点。

4.1.2 适用于电力电子主导系统的暂态稳定判据仍不够成熟

在同步发电机主导系统中,暂态稳定判据大多建立在物理转子功角和机电能量平衡之上;但在变流器并网系统中,尤其是在高比例 GFM-VSC/GFL-VSC 混合系统乃至全变流器接口电源系统中,系统同步正由“物理同步”逐步转向“控制同步”。此时,稳定边界不再仅由经典功角变量决定,而往往与 PLL、PSC、下垂控制及其限流与切换逻辑共同相关。现有基于同步机系统构建的稳定判据,难以直接准确描述这类系统的稳定边界;而基于单变流器或简单双机系统发展起来的判据,虽然能够解释若干典型现象,但在多异构单元、强耦合网络和复杂切换条件下往往表现出较强保守性。

进一步看,变流器控制的非线性、多时间尺度和分段约束,使判据构造本身变得更加困难。以电流限幅和模式切换为例,系统等效功角曲线、阻尼项和能量面都可能随运行阶段发生突变,传统等面积法和常规能量函数法难以直接处理这类不光滑问题;若完全依赖详细模型进行边界搜索,又会带来较高计算代价,不利于大系统分析与在线应用。对于全变流器接口电源系统,这一问题会更进一步:多异构电源单元之间以及机-场-网之间的交互影响更加显著,适用于简单系统的判据难以准确刻画系统稳定域。因此,如何建立能够同时考虑控制同步特性、序贯切换控制和异构多单元交互影响的暂态稳定判据,并使其在精度、可计算性和保守性之间取得平衡,仍是后续研究需要重点突破的问题。

4.1.3 多源系统的全局分散协同控制仍缺乏统一思路

从控制层面看,变流器并网系统的另一个困难在于:其稳定性问题往往具有“系统层面强耦合、控制实现强分散”的双重属性。单变流器控制性能提升并不必然等价于系统层面暂态稳定性的改善,尤其在 GFL-VSC、GFM-VSC 与同步发电机共存的多源系统中,各类单元的短时过载能力、限流方式、控制带宽和同步机制本就不同,如果仍采用统一、刚性的协调策略,往往难以充分发挥各单元在故障过程中的暂态支撑能力。现有很多控制方法仍主要针对单机或少量并联系统展开,缺少面向多源系统整体的协调设计。

这一问题在全变流器接口电源电力系统中更加

突出。由于系统在时空上高度分散,且动态响应更快,若仍依赖集中式下发控制指令,不可避免会受到通信延迟、全局信息不完备以及局部约束差异的影响;与此同时,大量异构变流器接口电源需要在多时间尺度下实时协同控制,才能尽可能发挥各单元的暂态支撑能力。因此,面向未来高比例电力电子化场景,控制问题的关键已不只是“如何提高单机稳定性”,而是“如何在局部信息基础上实现全局有利的分散协同行为”。这一点目前仍缺少统一且成熟的方法论。

4.2 未来展望

4.2.1 不同运行方式下的暂态稳定机制表征

未来一个值得优先推进的方向是,在保留不同控制结构模型的前提下,对不同运行状态下的暂态同步失稳机制进行统一表征。对于变流器并网系统而言,故障深度、GFL-VSC/GFM-VSC 比例变化、电源属性差异以及限流模式切换,都会改变系统的主导失稳路径。后续研究应从“不同运行状态”出发,识别能够跨场景刻画失稳本质的关键状态量、主导耦合关系和主导失稳通道,使机理分析不再局限于某一类装置或某一类简单系统。

4.2.2 多机系统耦合机制及暂态稳定判据构建

从分析方法上看,未来还需要进一步发展适用于电力电子主导系统的暂态稳定域表征方法。这里的关键不只是提高边界计算精度,而是使稳定域构建能够真实反映非线性、多时间尺度、序贯切换和限幅效应,并进一步揭示多单元之间的协同稳定机制。对于一般变流器并网系统,这意味着要从单机稳定域推广到多机耦合稳定域;对于全变流器接口电源系统,则意味着稳定域不仅要描述“单个运行点是否稳定”,还要刻画异构多单元之间的交互如何改变系统整体边界。

4.2.3 参数弱依赖的稳定性提升分散协同控制

现有很多稳定性提升方法在单机或简单系统中效果明确,但往往依赖线路阻抗、系统强度、等值参数或精确控制模型。当这些方法推广到大规模异构系统,尤其是全变流器接口电源场景时,参数不确定性、运行方式变化和全局信息不完备会明显削弱其实用性。因此,未来一个更具工程意义的方向是,发展对详细参数依赖较弱、但对局部可测信号响应更敏感的稳定性提升策略。对这类方法而言,重点不在于完全摆脱模型,而在于通过局部量测、少量协调信息和鲁棒控制逻辑,实现对不同网络参数和不同故障特征的较强适应性。

4.2.4 物理机理与数据驱动相结合的评估与控制

随着系统规模扩大和工况多样化,仅依赖单一

物理模型或单一数据驱动模型都难以充分满足复杂场景下的暂态稳定分析需求。前者往往受限于模型复杂度和计算代价,后者则常面临可解释性不足与分布外泛化问题。后续可重点发展物理机理与数据驱动相结合的方法:一方面,将稳定边界、李雅普诺夫约束或能量演化规律显式嵌入数据驱动模型,提高其物理一致性;另一方面,利用数据驱动方法辅助识别高维系统中的关键状态、主导模式和边界样本,从而为稳定域构建和控制设计提供支持。

5 结束语

本文围绕变流器并网系统暂态稳定问题,对 GFL-VSC 与 GFM-VSC 的典型同步机理、失稳模式、分析方法及提升策略进行了综述。现有研究表明,GFL-VSC 的暂态稳定性主要受 PLL 动态、电网强度以及故障期间电流注入方式影响;GFM-VSC 虽具备主动建压建频能力,但其暂态行为与惯量/阻尼配置、电流限幅及模式切换密切相关。对于多变流器系统,时域仿真法、能量函数法和数据驱动方法各具优势,但在强非线性控制下暂态同步失稳机理揭示、适用于电力电子主导系统的暂态稳定判据、多源系统的全局分散协同控制思路等方面仍存在不足。未来仍需进一步研究不同运行方式下的暂态稳定机制表征、多机系统耦合机制及暂态稳定判据构建、参数弱依赖的稳定性提升分散协同控制策略、物理机理与数据驱动相结合的评估与控制方法等方面,以支撑新型电力系统的安全稳定运行。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者申明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

熊永新进行仿真设计、结果分析、文献调研与整理、论文写作和修订等工作;文劲宇和姚伟提供写作思路,校核仿真结果,参与论文审核、终稿修订等工作。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [2] 宋嘉启, 鲍颜红, 张金龙, 等. 面向新型电力系统的暂态稳定边界

- 表征与计算:综述与展望[J/OL]. 电力系统自动化, 2025. (2025-08-14) [2025-09-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250813.1719.006>.
- SONG Jiaqi, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. Characterization and calculation of transient stability boundaries for new power systems: a review and outlook [J/OL]. Automation of Electrical Power Systems, 2025. (2025-08-14) [2025-09-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250813.1719.006>.
- [3] 中国电力企业联合会. 2025年一季度全国电力供需形势分析预测报告[R]. 北京:中国电力企业联合会, 2025.
- [4] 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.
- [5] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [6] 刘菁锐, 屠增泽, 张宇飞, 等. 考虑限流的基于直流电压同步的构网型换流器稳定判据[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 3-12.
- LIU Jingrui, TU Zengze, ZHANG Yufei, et al. Transient stability criterion of grid-forming converter based on DC voltage synchronization control considering current limit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 3-12.
- [7] 孙鹏飞, 田震, 查晓明, 等. 功率同步型构网变流器并网系统暂态同步稳定性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(2): 1-19.
- SUN Pengfei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Review on research of transient synchronization stability for grid-connected system based on power-synchronization grid-forming converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 1-19.
- [8] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3947-3962.
- ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3947-3962.
- [9] 张添, 姚骏, 杨东, 等. 含跟网型电源的多馈入系统暂态稳定性评估及影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(14): 31-42.
- ZHANG Tian, YAO Jun, YANG Dong, et al. Transient stability evaluation and influencing factor analysis of multi-infeed system with grid-following power source [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 31-42.
- [10] 黄炳政, 陈俊儒, 刘牧阳, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 57-68.
- HUANG Bingzheng, CHEN Junru, LIU Muyang, et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 57-68.
- [11] 何佐仁, 黄云辉, 王栋, 等. 基于虚拟母线电压控制的跟网型与构网型并联系统稳定性优化[J]. 智慧电力, 2025, 53(6): 19-27.
- HE Zuoren, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Stability optimization of grid-following and grid-forming converter parallel systems based on virtual bus voltage control [J]. Smart Power, 2025, 53(6): 19-27.
- [12] 马俊鹏, 李磊, 迟程缤, 等. 宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 165-173.
- MA Junpeng, LI Lei, CHI Chengbin, et al. Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 165-173.
- [13] 李建林, 裴盛泽, 游洪灏, 等. 基于虚拟振荡控制的构网型储能暂态特性优化方法[J/OL]. 高电压技术, 2025. (2025-0716) [2025-09-07]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250544>.
- LI Jianlin, PEI Shengze, YOU Honghao, et al. Transient characteristics optimization method for grid-forming energy storage based on virtual oscillation control [J/OL]. High Voltage Engineering, 2025. (2025-0716) [2025-09-07]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250544>.
- [14] 姜妍, 彭克, 赵学深, 等. 基于非线性解耦的多机直流微电网暂态失稳减载可行域[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3463-3473.
- JIANG Yan, PENG Ke, ZHAO Xueshen, et al. Transient feasible domain for load shedding after instability of multi-machine DC microgrid based on nonlinear decoupling theory [J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3463-3473.
- [15] 周步祥, 丁豪, 周毅, 等. 基于角频率偏差积分反馈的构网型逆变器暂态稳定提升策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 59-71.
- ZHOU Buxiang, DING Hao, ZHOU Yi, et al. A transient stability enhancement strategy for grid-forming inverters based on integral feedback of angular frequency deviation [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 59-71.
- [16] 胡同宇, 杨德健, 钱敏慧, 等. 基于惯量同步的构网型永磁直驱风电机组频率支撑及转速恢复策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 72-79.
- HUTONG Yu, YANG Dejian, QIAN Minhui, et al. Frequency support and speed recovery strategy of grid-forming PMSGs based on inertia synchronization[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 72-79.
- [17] 刘瑞平, 袁亮, 胡铭欣, 等. 含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 152-161.
- LIU Ruiping, YUAN Liang, HU Mingxin, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 152-161.
- [18] 夏向阳, 赵晓悦, 梁军, 等. 基于有功-无功联合控制的构网型变流器暂态稳定性提升方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(11): 114-125.
- XIA Xiangyang, ZHAO Xiaoyue, LIANG Jun, et al. Transient stability enhancement method for grid-forming converter based on joint control of active and reactive power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(11): 114-125.

- [19] 张锋, 陈武晖, 康佳乐, 等. 双馈风电场故障穿越控制策略对风火打捆系统暂态稳定性影响及提升控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 717-729, 743.
ZHANG Feng, CHEN Wuhui, KANG Jiale, et al. Research on the effect of fault ride-through control strategy of doubly-fed wind farms on transient stability of wind-fire bundling system and enhancement control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 717-729, 743.
- [20] 原宇腾, 肖凡, 涂春鸣, 等. SVG 与 VSG 混合系统暂态稳定区间刻画与协同控制策略[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 4917-4926.
YUAN Yuteng, XIAO Fan, TU Chunming, et al. Transient stability interval characterization and cooperative control strategy for SVG and VSG hybrid system with distributed power supply [J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 4917-4926.
- [21] 阮亮, 王杨, 肖先勇, 等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 103-110.
RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters [J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.
- [22] 王泽昆, 程鹏, 贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 118-127.
WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118-127.
- [23] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [24] 肖晃庆, 何宏亮, 杨苹, 等. 具备跟网-构网二象性的并网 VSC 自适应混合控制及其暂态稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(6): 108-115.
XIAO Huangqing, HE Hongliang, YANG Ping, et al. Adaptive hybrid control of grid-connected VSC with grid-following and grid-forming duality and its transient stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(6): 108-115.
- [25] 彭慧敏, 薛禹胜, 刘庆龙, 等. 复杂模型下电力系统暂态稳定性量化分析的算例筛选[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(10): 145-153.
PENG Huimin, XUE Yusheng, LIU Qinglong, et al. Case filtering in quantitative analysis of power system transient stability under complex model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(10): 145-153.
- [26] 葛晓琳, 李明瑛, 符杨, 等. 基于多几何中心平方和迭代的风机并网系统暂态稳定性分析[J]. 电网技术, 2025, 49(11): 4568-4579.
GE Xiaolin, LI Mingshuang, FU Yang, et al. Transient stability domain analysis for PLL synchronized wind power systems based on multi-geometric-center sum-of-squares iterative method [J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4568-4579.
- [27] 林凯威, 刘俊, 刘嘉诚, 等. 基于暗经验回放的电力系统暂态稳定性评估增量更新框架[J/OL]. 电网技术, 2025. (2025-05-18) [2025-09-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst>.
LIN Kaiwei, LIU Jun, LIU Jiacheng, et al. Incremental update framework for transient stability assessment of power systems based on dark experience replay [J/OL]. Power System Technology, 2025. (2025-05-18) [2025-09-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst>.
- [28] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [29] XIONG Y X, WU H, LI Y F, et al. Comparison of power swing characteristics and efficacy analysis of impedance-based detections in synchronous generators and grid-following systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(3): 2545-2556.
- [30] Technical rules for the connection of high-voltage direct current systems: VDE-AR-N (4130)[S]. VDE, 2018.
- [31] IEEE. IEEE standard for interconnection and interoperability of inverter-based resources: IEEE Std 2800-2022[S]. IEEE, 2022.
- [32] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.
- [33] 张琛, 蔡旭, 李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4018-4026, 4280.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4018-4026, 4280.
- [34] GÖKSU Ö, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.
- [35] ERLICH I, SHEWAREGA F, ENGELHARDT S, et al. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks [C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-8.
- [36] MA S K, GENG H, LIU L, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 216-226.
- [37] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [38] WANG X S, WU H, WANG X F, et al. Transient stability analysis of grid-following VSCs considering voltage-dependent current injection during fault ride-through [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2749-2760.
- [39] HADJIDEMETRIOU L, KYRIAKIDES E, BLAABJERG F. An adaptive tuning mechanism for phase-locked loop algorithms for faster time performance of interconnected renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1792-1804.
- [40] HU Q, FU L J, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [41] ZHANG C, MOLINAS M, CAI X, et al. Understanding the

- nonlinear behavior and frequency stability of a grid-synchronized VSC under grid voltage dips [PP/OL]. (2018-06-29) [2025-09-07]. <https://arxiv.org/abs/1806.11529>.
- [42] CHEN J R, LIU M Y, O'DONNELL T, et al. Impact of current transients on the synchronization stability assessment of grid-feeding converters [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 4131-4134.
- [43] WANG Z, GUO L, LI X L, et al. PLL synchronization transient stability analysis of a weak-grid connected VSC during asymmetric faults [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(2): 2140-2154.
- [44] LUO Y, YAO J, CHEN Z Y, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement control strategy of a PLL-based VSC system during asymmetric grid faults [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 35.
- [45] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [46] FAN B, WANG X F. Equivalent circuit model of grid-forming converters with circular current limiter for transient stability analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(4): 3141-3144.
- [47] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [48] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [49] REZA M, SUDARMADI D, VIAWAN F A, et al. Dynamic stability of power systems with power electronic interfaced DG [C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2007: 1423-1428.
- [50] AZMY A M, ERLICH I. Impact of distributed generation on the stability of electrical power system [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005: 1056-1063.
- [51] 黎萌. 电力系统暂态稳定时域仿真终止判据的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
LI Meng. Research on termination algorithm of time-domain simulation for power system transient stability [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [52] KUNDUR P. *Power system stability and control* [M]. 3rd ed. Florida: CRC Press, 2012.
- [53] HU T S. A nonlinear-system approach to analysis and design of power-electronic converters with saturation and bilinear terms [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(2): 399-410.
- [54] LOOP B P. Estimating regions of asymptotic stability of nonlinear systems with applications to power electronics systems [D]. West Lafayette City, Indiana: Purdue University, 2005.
- [55] XUE Y, VAN CUSTEM T, RIBBENS-PAVELLA M. Extended equal area criterion justifications, generalizations, applications [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(1): 44-52.
- [56] KOKOTOVIC P V, AVRAMOVIC B, CHOW J H, et al. Coherency based decomposition and aggregation [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1981, 14(2): 1279-1287.
- [57] CEPEDA J C, RUEDA J L, COLOMÉ D G, et al. Real-time transient stability assessment based on centre-of-inertia estimation from phasor measurement unit records [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2014, 8(8): 1363-1376.
- [58] OLULOPE P K, FOLLY K A, CHOWDHURY S P, et al. Prediction of critical clearing time using artificial neural network [C]//2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG). IEEE, 2011: 1-5.
- [59] 吴俊勇, 史法顺, 李庐苏, 等. 基于MRSE-CNN的电力系统多任务暂态稳定自适应评估 [J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(2): 167-175.
WU Junyong, SHI Fashun, LI Lusu, et al. Multi-task transient stability adaptive assessment of power system based on MRSE-CNN [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(2): 167-175.
- [60] 李楠, 张帅, 胡禹先, 等. 一种基于深度自适应网络迁移的暂稳评估模型更新框架 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(14): 25-35.
LI Nan, ZHANG Shuai, HU Yuxian, et al. An updating framework of a model for transient stability assessment based on a deep adaptive network transfer [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 25-35.
- [61] 李保罗, 孙华东, 张恒旭, 等. 基于两阶段迁移学习的电力系统暂态稳定评估框架 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(17): 176-185.
LI Baoluo, SUN Huadong, ZHANG Hengxu, et al. Transient stability assessment framework of power system based on two-stage transfer learning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(17): 176-185.
- [62] 李宝琴, 吴俊勇, 李庐苏, 等. 基于主动迁移学习的电力系统暂态稳定自适应评估 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 121-132.
LI Baoqin, WU Junyong, LI Lusu, et al. Adaptive assessment of power system transient stability based on active transfer learning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 121-132.
- [63] 陈灏颖, 管霖. 基于主动迁移学习的电力系统拓扑自适应暂态稳定评估 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(19): 7409-7423.
CHEN Haoying, GUAN Lin. An active transfer learning scheme for power system transient stability assessment adaptive to the topological variability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(19): 7409-7423.
- [64] LIU J C, LIU J, YAN R D, et al. Deep Lyapunov learning: embedding the Lyapunov stability theory in interpretable neural networks for transient stability assessment [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(6): 7437-7440.
- [65] 郑乐, 刘思远, 周小添, 等. 面向电力系统暂态稳定性评估的深度学习模型智能增强方法 [J]. *电网技术*, 2025, 49(7): 2649-2658.
ZHENG Le, LIU Siyuan, ZHOU Xiaotian, et al. Model enhancement for deep learning based transient stability assessment models [J]. *Power System Technology*, 2025, 49(7): 2649-2658.

- [66] GE P, XIAO F, TU C, et al. Comprehensive transient stability enhancement control of a VSG considering power angle stability and fault current limitation [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 11(1): 173-183.
- [67] 光伏并网逆变器技术规范: NB/T 32004—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
Technical specification of PV grid-connected inverter: NB/T 32004—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [68] 葛平娟, 肖凡, 涂春鸣, 等. 考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(14): 3676-3687.
GE Pingjuan, XIAO Fan, TU Chunming, et al. Transient control strategy of droop-controlled inverter considering fault current limitation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(14): 3676-3687.
- [69] JIN Z M, WANG X F. A DQ-frame asymmetrical virtual impedance control for enhancing transient stability of grid-forming inverters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(4): 4535-4544.
- [70] QORIA T, WU H, WANG X F, et al. Variable virtual impedance-based overcurrent protection for grid-forming inverters: small-signal, large-signal analysis and improvement [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3324-3336.
- [71] WU H, WANG X F, ZHAO L. Design considerations of current-limiting control for grid-forming capability enhancement of VSCs under large grid disturbances [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(10): 12081-12085.
- [72] 章雷其, 黄林彬, 黄伟, 等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(12): 56-62, 99.
ZHANG Leiqi, HUANG Linbin, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop-controlled inverters [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 56-62, 99.
- [73] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 578-591.
- [74] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(7): 2815-2825.
FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(7): 2815-2825.
- [75] ZHAO F, SHUAI Z K, HUANG W, et al. A unified model of voltage-controlled inverter for transient angle stability analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(3): 2275-2288.
- [76] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451-458.
- [77] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82-89.
- [78] XIONG X L, WU C, HU B, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 7820-7831.
- [79] XIONG X L, WU C, CHENG P, et al. An optimal damping design of virtual synchronous generators for transient stability enhancement [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(10): 11026-11030.
- [80] 张巍, 黄文, 帅智康, 等. 虚拟调速器对 VSG 暂态功角稳定影响机理分析[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(8): 55-62, 71.
ZHANG Wei, HUANG Wen, SHUAI Zhikang, et al. Impact mechanism analysis of virtual governor on transient power angle stability of VSG [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(8): 55-62, 71.
- [81] MO O, D'ARCO S, SUUL J A. Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 5952-5962.
- [82] CHEN M, ZHOU D, BLAABJERG F. Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [83] XIONG X L, WU C, BLAABJERG F. An improved synchronization stability method of virtual synchronous generators based on frequency feedforward on reactive power control loop [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 9136-9148.
- [84] PENG Y L, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient stabilization control of electric synchronous machine for preventing the collapse of DC-link voltage [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(1): 82-93.
- [85] ÁVILA-MARTÍNEZ R E, RENEDO J, ROUCO L, et al. Fast voltage boosters to improve transient stability of power systems with 100% of grid-forming VSC-based generation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(4): 2777-2789.
- [86] LIU T, WANG X F. Physical insight into hybrid-synchronization-controlled grid-forming inverters under large disturbances [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(10): 11475-11480.
- [87] 姜卫同, 胡鹏飞, 尹瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 124-133.
JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(22): 124-133.
- [88] XIAO H Q, HE H L, ZHANG L D, et al. Adaptive grid-synchronization based grid-forming control for voltage source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 4763-4766.
- [89] 李锡林, 唐英杰, 田震, 等. 基于改进等面积法则的并网逆变器同步稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 208-215.
LI Xilin, TANG Yingjie, TIAN Zhen, et al. Synchronization

- stability analysis of grid-connected inverter based on improved equal area criterion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 208-215.
- [90] ZHANG Y, ZHANG C, CAI X. Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 788-791.
- [91] LI X L, TIAN Z, ZHA X M, et al. An iterative equal area criterion for transient stability analysis of grid-tied converter systems with varying damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1771-1784.
- [92] CHEN J R, LIU M Y, GENG H, et al. Impact of PLL frequency limiter on synchronization stability of grid feeding converter [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2487-2490.
- [93] HE X Q, PAN S S, GENG H. Transient stability of hybrid power systems dominated by different types of grid-forming devices [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 868-879.
- [94] LUO C, MA X K, LIU T, et al. A flexible saturation limiter for DC-link voltage control of grid-forming inverters with enhanced transient stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2514-2524.
- [95] LUO C, MA X K, LIU T, et al. Controller-saturation-based transient stability enhancement for grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 2646-2657.
- [96] SUN R T, MA J P, YANG W L, et al. Transient synchronization stability control for LVRT with power angle estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 10981-10985.
- [97] WANG J L, ZHANG X. Active power and voltage cooperative control for improving fault ride-through capability of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12301-12311.
- [98] XU C H, ZOU Z X, YANG J J, et al. Transient stability analysis and enhancement of grid-forming and grid-following converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2024, 5(4): 1396-1408.
- [99] LUO C, CHEN Y D, XU Y C, et al. Two-stage transient control for VSG considering fault current limitation and transient angle stability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7169-7179.
- [100] ARJOMANDI-NEZHAD A, GUO Y F, PAL B C, et al. A model predictive approach for enhancing transient stability of grid-forming converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(5): 6675-6688.
- [101] 马堰泓, 付立军, 胡祺, 等. 计及暂态模式切换下垂控制逆变器故障下同步稳定分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 1-11.
MA Yanhong, FU Lijun, HU Qi, et al. Synchronous stability analysis of droop controlled inverter considering transient mode switching under fault [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 1-11.
- [102] DENG H, QI Y, FANG J Y, et al. A robust low-voltage-ride-through strategy for grid-forming converters based on reactive power synchronization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 346-357.
- [103] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-297.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.
- [104] 李亚楼, 赵飞, 樊雪君. 构网型储能及其应用综述[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 386-398.
LI Yalou, ZHAO Fei, FAN Xuejun. Review of grid-forming energy storage and its applications [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 386-398.

收稿日期: 2025-10-14 修回日期: 2025-12-16

作者简介:

熊永新(1994),男,博士,主要研究方向为大规模新能源接入系统的稳定与控制,E-mail: yongxin.xiong@polyu.edu.hk;

文劲宇(1970),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、直流输电、直流电网等,E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn;



熊永新

姚伟(1983),男,博士,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为高比例新能源电力系统稳定分析与控制、新一代电力人工智能技术及应用等,E-mail:w.yao@hust.edu.cn。

(编辑 张小飞)