

构网型变流器性能评估与测试方法的最新进展：标准、技术与挑战

黄桂香*

上海电器设备检测所有限公司，上海，中国

*通讯作者

【摘要】构网型变流器凭借其电压源外特性、惯量支撑与弱网适应能力，已成为高比例新能源电力系统的关键装备。本文首先梳理了构网型变流器故障穿越、惯量响应、无功支撑、过流限制、弱网适配及跟网/构网模式切换六大关键性能的实现机理与控制参数耦合关系。在此基础上，系统对标中国、北美、欧盟现行构网标准，指出其在量化指标缺失（过流能力、响应时间、无功支撑量等）、试验工况覆盖不足（极弱网、多机并联、连续故障穿越等）以及考核边界不统一等方面的共性短板。针对上述问题，从故障穿越与无功支撑、限流与过流能力、弱网适配三个维度提出标准化落地建议，为构网型变流器的型式试验、工程应用及标准迭代提供参考。

【关键词】构网型变流器；故障穿越；无功支撑；过流能力；弱网适应；标准化测试

1.引言

随着新能源装机容量的迅猛增加，风电、光伏等间歇式新能源占装机比重不断加大，电力系统也在向高电力电子化方向发展。与此同时，传统同步机比例降低使电力系统整体惯量减少、支撑电压的能力减小，容易使得电网在自身故障干扰和弱电网条件下发生电网失稳问题，如失稳电压、宽频振荡以及功率调节滞后等等风险。尤其对于大规模新能源送出、远距离输电的局部电网来说，如局部电网短路容量不足、网源强耦合等使得接入并网装置系统承受着日益增加的动态支撑和暂态适应的要求。

传统跟网型（Grid-Following, GFL）变流器本质上属于受控电流源，其稳定性依赖于电网提供的电压、频率参考，在弱电网或故障暂态过程中易出现同步振荡、支撑特性较差和暂态功率波动等问题。构网型（Grid-Forming, GFM）变流器相当于同步电机等效的电压源外特性，能够在自身独立地提供电压大小、频率，具有虚拟惯量、无功支撑、故障穿越、孤岛作用的能力，极大改善系统扰动下稳定性问题，是目前解决高渗透率新能源电网稳定问题的主要技术途径[1,2]。随着构网能力逐渐走向工程应用，在工程中构网变流器的性能指标、控制逻辑、测试方法和指标要求是行业普遍关心的问题。

目前，构网型变流器技术研究已取得初

步进展，但现有研究多聚焦于单一控制功能优化，缺乏对多参数协同整定及模式切换耦合机理的系统分析。标准化层面，中国、北美、欧盟已发布系列标准，但对过流能力量化指标、弱电网短路比（Short-Circuit Ratio, SCR）适应范围、相角突变耐受判据等关键参数界定仍不统一，设备性能可比性差、测试结果难以复现。

针对上述问题，本文主要完成以下工作：一是梳理构网型变流器六大核心功能的控制原理与参数耦合关系；二是对标中美欧现行标准，识别量化指标、试验工况及考核边界的共性短板；三是从故障穿越、限流、弱网适配三个维度提出标准化修订建议，为标准体系完善和工程应用提供参考。

2.构网型变流器的基本原理与核心功能

本节给出构网型变流器的基本工作原理与核心功能。

2.1 基本工作原理

构网型变流器（Grid-Forming Converter, GFM）是一类能够自我建成电压和频率的电力电子变流器，典型特征是电压源型控制，在弱电网、孤岛情况下可保持稳定的电压和频率提供电网的主动支撑能力。构网型变流器通过改变自身的内部电压幅值和频率形成独立的电压源特征[3]，因此能在电网扰动、故障情况下保持稳定运行。与此同时，GFM变流器具有模拟同步机惯量[4,5]、阻尼能

力, 可实现主动的功率频关系调节, 且有功电流输出对电网电压也起到控制作用, 以此实现电网电压和频率的协同稳定。相比跟网型变流器, GFM 可在弱电网和故障暂态下持续并网与支撑, 显著提升系统稳定性。

2.2 构网型变流器的核心功能与控制策略

构网型变流器实际运行中需完成以下核心控制功能:

2.2.1 电压频率支撑

构网型变流器通过虚拟同步机提供惯量响应[6], 实现抑制系统电网频率的突变, 其动态响应可用下式表示:

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

式中, H 为虚拟同步机等效惯量常数; 频率偏差; P_m 为等效机械功率; P_e 为输出有功功率。

在此基础上, 变流器通过一次调频和一次调压功能实现电网频率和电压的动态调节[7], 可分别表示为:

$$\begin{cases} \Delta P = K_f \Delta f \\ \Delta Q = K_v \Delta V \end{cases} \quad (2)$$

式中, ΔP 为有功功率变化量; ΔQ 为无功功率变化量; Δf 为频率变化量; ΔV 为输出电压变化量。

构网型变流器的这些调节功能, 在系统频率或电压偏离额定值的情况下快速调整有功、无功输出功率, 实现频率或电压的稳定调节恢复, 以及保证不同的负载条件和故障条件下系统动态性能和静稳态误差均满足要求。

2.2.2 无功电流支撑

无功电流支撑是支撑整个电力系统电压稳定的方法之一。构网型变流器可采用电压/无功下垂控制、恒功率因数控制、恒无功功率控制实现对电压的调节。无功调压系数在适当范围内调节, 无功功率误差保持在较小范围内, 以此保证电力系统在发生低电压故障或电压晃动期间电网电压能够快速恢复而不会引起非故障的各相过压。

2.2.3 SCR 适应能力

SCR 反映并网点电网强度, 是反映构网型变流器弱电网适应能力的指标之一, 可表示为:

$$SCR = \frac{U_n^2}{2 * \pi * f_n * L_g * S_n} \quad (3)$$

式中, S_n 为变流器额定容量, U_n 为额定

电压, L_g 为电网电抗。SCR 值变小时, 电网阻抗变大, 变流器输出阻抗与电网阻抗发生更强耦合, 控制系统裕度变差。因此, 构网型变流器需要有宽 SCR 适应能力[8], 还要运用虚拟阻抗、阻尼控制、调整带宽、实现参数自适应等手段实现变流器在弱电网适应性[9]。

2.2.4 限流控制

不同于同步发电机, 变流器的过流能力受功率器件的过流能力、电感热量和保护策略的限制, 变流器上的故障电流一般不能长时间的超过额定电流很大值。因此在低电压或短路故障期间, 构网型变流器要在稳压源的外特性上保证电压支撑和自身安全方面获得平衡。常见的变流器过流限值办法有: 虚拟电阻限流、动态限流、有功降额、无功优先限制、电压临界限幅等。

当电流参考超过允许值时, 可采用矢量限幅方式:

$$i_{ref}^{lim} = \begin{cases} i_{ref}, & |i_{ref}| \leq I_{max} \\ I_{max} * (i_{ref} / |i_{ref}|), & |i_{ref}| > I_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, i_{ref} 是原始电流参考值; I_{max} 是允许的最大输出电流。

2.2.5 跟网/构网运行模式切换控制

工程应用中变流器并不总处在一种构网模式下。对于新能源场站或储能而言, 变流器可能处在强电网并网运行的工况下, 采用跟网控制实现有功或功率的准确跟踪; 当电网强弱跌落、需要自身电压和频率支撑、需要实行孤岛或故障穿越时, 则切换至构网控制或构网故障支撑。所以, 跟网/构网模式切换控制是构网变流器工程应用的一种实用功能。

跟网模式下, 变流器需用锁相环获得电网相角, 要控制的东西是输出电流和有功、无功功率; 构网模式下, 变流器直接用内部电压源参考来获得相角和电压参考值, 要控制的东西将变成电压、频率和功率要平衡。这两种模式下的同步机理、外特性、控制的变量是不完全一样的, 切换时会可能相角突变、电压参考值“跳变”、电流冲击、功率波动。所以模式切换不能简单地开关控制器, 而要有模式间的过渡控制, 实现平滑过渡。

模式切换判据由并网点电压幅值、频率偏差、频率变化率、SCR 估计值、孤岛检测信号、故障检测信号、电流限幅状态等信息确定。如并网点的电压跌落到低电压穿越下

限电压以下或者系统的 SCR 小于设定值，变流器即可由跟网功率控制进入构网支撑控制模式；当电压恢复正常，系统恢复稳定后可有功功率斜坡与电压参考缓恢复地切换回常规跟网控制模式。

为降低换模冲击，可用加权平滑切换的方式将跟网控制输出与构网控制输出按一定权值相加。

$$u_{ref} = (1-\lambda)u_{GFL} + \lambda u_{GFM} \tag{5}$$

式中， u_{GFL} 表示跟网控制产生的电压或调制参考， u_{GFM} 表示构网控制产生的电压参考， λ 表示模式切换权重。当 $\lambda=0$ 时，变流器表现为跟网控制；当 $\lambda=1$ 时，变流器表现为构网控制。通过限制 λ 的变化率，使用相角同步、积分状态继承、电压参考线性斜率投入、虚拟阻抗渐变投入等方法可以抑制切换过程的冲击电流、功率抖动。

2.2.6 故障穿越能力

构网型变流器的故障穿越能力包括低电压穿越（Low Voltage Ride Through）和高电压穿越（High Voltage Ride Through）。低电压故障时需连续并网并提供动态无功支撑；高电压时应维持安全运行并在故障清除后快速恢复；此外，应具备连续通过至少 3 次低/高电压故障的能力，且在端口电压持续异常时仍保持电压源输出特性。

由上述分析看出，构网型变流器的所有功能都是由内在控制算法来实现，而且控制效果又取决于控制算法核心参数的合理选取和配合。所以有必要再对构网算法核心参数的选取和实现方法进行详细研究。

3.构网算法核心参数实现方法

基于上述功能需求，本节讨论构网控制中核心参数的作用机理、分类方法及工程实现。

3.1 构网算法核心参数总览

构网型变流器的性能由一些重要参数的合理整定和共同作用完成。这些参数有：虚拟惯量、阻尼系数、下垂系数、虚拟阻抗值、电流限幅值等。不同的构网控制策略对这些参数依赖不同，而参数的整定又要考虑到工况条件和设备硬、软件等条件的限制性。

如图 1 所示，虚拟惯量与阻尼系数影响频率特性，下垂系数影响功率分配精度，虚拟阻抗与电流限幅值影响故障电流限制效果，各参数需协同整定。

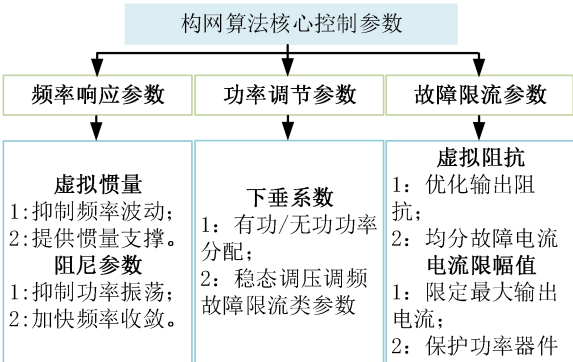


图 1. 构网型变流器核心参数关联关系图

3.2 核心参数实现方法

基于核心参数分类，下文分别介绍限流策略、相角突变耐受和 SCR 适应范围的工程实现方法。

图 2 中将这核心功能分为 3 类：限流策略、相角突变的耐受能力和 SCR 可适应范围。每一类功能对应工程的具体目标，如限流策略的目标是限制故障峰值电流、不触发硬件保护、维持电压支撑等；相角突变耐受能力的目标是网络或联网时避免失步、掉网等；SCR 可适应范围的目标是低短路比下控制一定鲁棒性、保持系统稳定等。

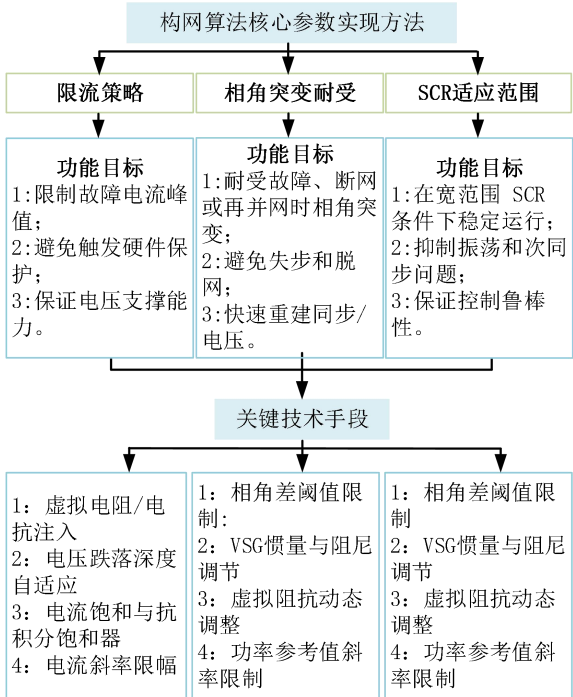


图 2. 核心参数实现方式

关键技术手段包括：限流策略采用虚拟阻抗注入、电流饱和与斜率限幅等，参数整定需结合实际工况；相角突变耐受通过相角差限幅、惯量/阻尼调节、虚拟阻抗动态调整及功率参考斜坡调节实现，需平衡冲击抑制与恢复速度；SCR 适应范围依赖虚拟阻抗调

整与惯量/阻尼自适应应对弱电网及多机并列工况[10]。

3.3 核心参数实现方法的工程应用分析

尽管上述参数和方法可以从理论上实现构网控制目的，但在工程应用中都受到各种限制和挑战。总体上来说，这些技术手段都能够互补实现构网算法对于各种工况及各种类型故障要求的核心功能，但在实际工程中上述方法的使用都面临着诸多应用问题的挑战，如限流策略在故障发生、故障支撑、故障恢复不同阶段的使用规则和参数整定的要求并不相同；相角冲量耐受能力在并、离网切换中实现的工况限制需要顾及不同类型工况组合的影响；SCR 自适应方法的实时估计精度需要让渡到实时控制的快速性要求等。

上述工程应用挑战的根源在于标准对控制策略实现方式缺乏统一规范，下文将针对中外标准展开系统对标。

4.当前标准中的技术挑战

4.1 国内外构网标准研究现状

表 1.中美欧构网型变流器标准关键指标对比

考核指标	中国标准	北美标准	欧洲标准
LVRT 跌落深度/时间	规定曲线，未量化暂态响应时间	规定曲线及动态响应时间	规定曲线，部分量化响应时间
无功支撑量	未统一规定幅值与响应时间	要求动态无功支撑，部分量化	要求无功支撑，未统一量化
过流能力限值	未规定峰值电流及持续时间	未明确量化	未明确量化
相角突变耐受	未规定	未规定	部分标准提及，未量化
SCR 适应范围	未规定最低 SCR 边界	未规定最低 SCR 边界	关注弱网测试，未统一边界
连续故障穿越	部分标准提及	部分标准提及	部分标准提及

如表 1 所示，中美欧已出台系列构网标准，但故障穿越曲线、无功支撑量、过流能力等关键参数均缺乏量化限定，设备性能可比性差、测试难以复现。三地标准侧重点不同，如图 3 所示。

美国 NERC 和 IEEE 标准侧重实验室与仿真测试方法，关注 LVRT 及无功支撑的动态响应要求[11-13]。

欧洲 ENTSO-E 和 AEMO 标准侧重弱电网与高渗透新能源接入场景，关注多机并联、微网及孤岛条件下的动态响应与系统稳定性[14,15]。

中国 GB/T 标准，CNESA 标准，CQC 等认证技术规范要求具备低电压穿越、无功电流及惯量响应功能，但量化指标与响应时间未统一规定，导致设备性能比较与试验复现存在差异[16,17]。

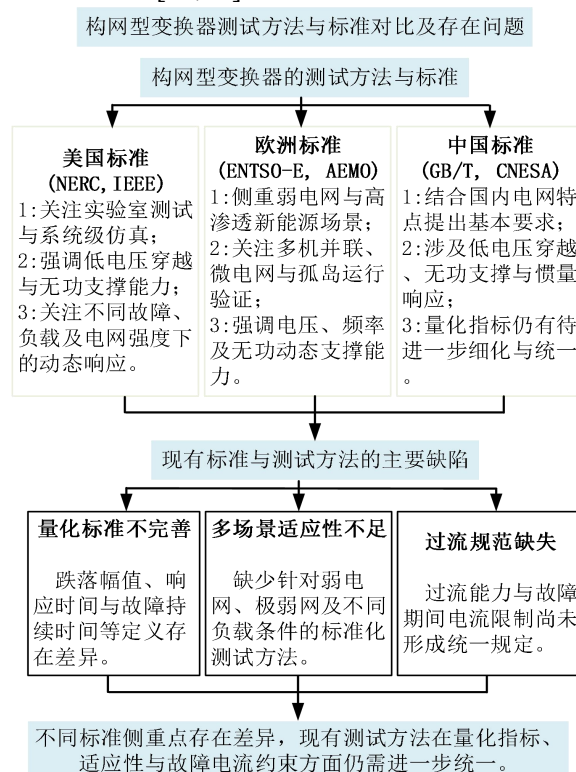


图 3.构网型变流器测试方法与标准对比及存在问题逻辑图

国内外标准虽已规定构网型变流器的主要功能与基本要求，但在量化指标、试验工况及考核边界方面仍存在显著差距，亟需系统梳理与完善。

4.2 核心功能中的关键挑战

基于前述原理与参数分析，本节探讨构网型变流器在实际验收中存在的问题及解决思路。

图 4 展示了构网型变流器故障穿越存在的主要问题的逻辑关系，如故障施加阶段、故障支撑阶段和故障恢复阶段。而在故障施加阶段，标准针对低/高电压轮廓、故障类型及时间要求等不尽统一；故障支撑阶段无功

支撑量、电流限幅及支撑优先级要求等标准未统一；故障恢复阶段有功恢复速率、电压恢复判据和连续的低高电压外施耐受能力等规定不一致，导致目前已有标准和测试方法无法跨平台对比、适应性差及相互保护调协不充分，甚至会给设备在弱网、极弱网运行时带来潜在的问题。

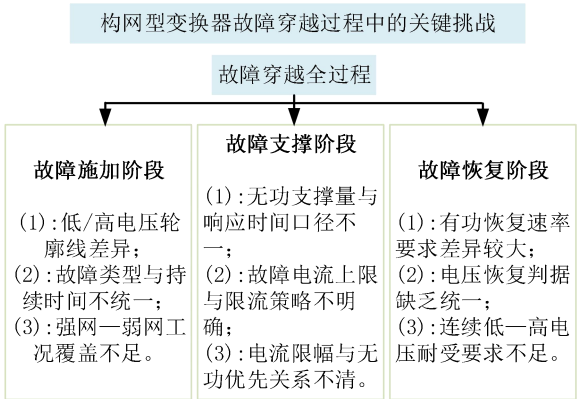


图 4.故障穿越全过程

如图 5 所示，各控制策略相角突变过程不同，在相角突变相位处，不同控制策略对相角跳变阈值、补偿策略、暂态功率冲击的处理有所不同；相角应对段不同功率指令和相位重建的配合方式，补偿策略配合速度等协调方式并不统一；相角恢复段相角恢复速度、相角恢复的系统性、连续性支持能力没有规范标准。因如此，现有控制策略难以在不同控制策略间相互衡量，不易于实现多机并联和弱电网情况下的适应性及保护关系之间的协调，还增加了设备运行风险。

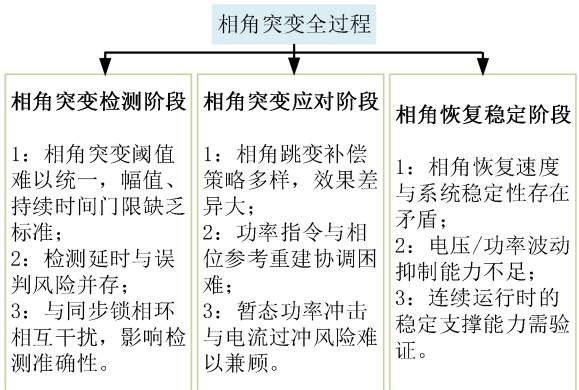


图 5.相角突变全过程

如图 6 所示，限流策略阶段限流触发的门限、时间响应滞后、限流触发方式不同；限流控制阶段各种策略在限流电流设定值、有功功率和无功功率的合理限幅，以及限流同步稳定协调等各方面的量化要求还未实现一致；限流的放通和撤除阶段放通时间和二次冲击的控制及与电压恢复放通的协调配合

规范都未明确定义。这些使得现有限流策略在工程设备试验和各种工程实际场景下难有较好的可比性，并对故障期间的稳定性和安全性产生影响。

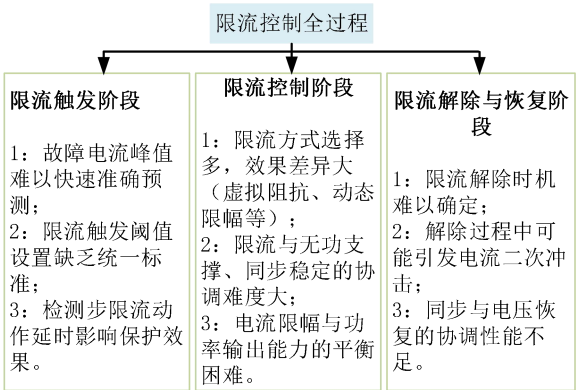


图 6.限流控制全过程

如图 7 所示，说明在较宽 SCR 适应性范围内低 SCR 估计误差情况、参数的自适应调整、不同参数的适应性实现方法各有异；自适应参数调整与自适应过程的稳定性有一定的权衡没有一种标准；稳定运行适应性中弱或者强电网条件下的长期适应能力、动态适应性和稳态适应能力的验证标准没有。这些因素影响构网型变流器不同电网强弱条件下的可靠性、可比性、适应性等。

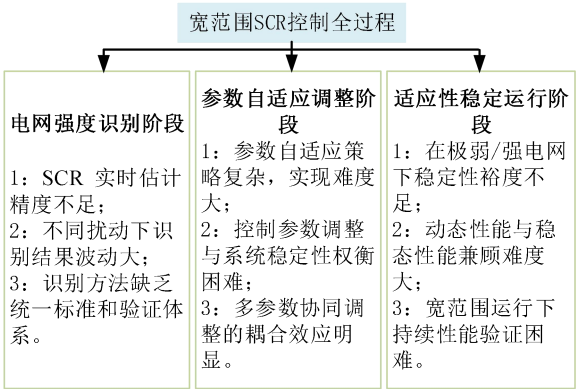


图 7.宽范围 SCR 适应性过程

4.3 技术和测试标准的完善方向

为了弥补现有标准的不足，需要从多方面对构网型变流器性能的测试和评估标准进一步完善，规定各种性能指标的数值要求、实验方法等：

(1) 故障穿越与无功支撑能力

a) 明确在不同电压跌落或升高幅度（如跌落至额定值的 90%、80%，升高至 110%、120%等）下的变流器响应要求，形成阶梯式的穿越能力曲线；

b) 量化故障期间的输出电流峰值、持续时间，以及对电网电压的支撑能力；

c) 规定故障恢复阶段有功功率恢复速率和电压恢复判据, 确保连续低高电压耐受能力。

d) 制定量化指标, 明确在不同电压跌落和故障情况下需要提供的无功功率幅值;

e) 明确无功支撑的响应时间和持续时间, 以保证电压恢复和系统稳态稳定;

f) 明确正序与负序无功分配及非故障相电压抬升控制要求。

(2) 相角突变耐受能力

a) 明确相角跳变的允许范围及补偿策略响应要求;

b) 规定相角恢复速率与功率/电流动态调节能力, 以保证在断网、再并网或故障期间系统稳定;

c) 明确不同模式切换条件下(跟网/构网)的相角平滑过渡要求。

(3) 限流策略与过流能力

a) 量化限流触发阈值、峰值电流及持续时间, 确保保护动作可控;

b) 明确限流与无功支撑、同步稳定之间的协调要求;

c) 规定限流解除与恢复过程对二次冲击、电压协调和功率平衡的约束。

(4) 宽范围弱网适应性

a) 明确在强网、弱网及极弱网条件下的稳定运行边界和控制适应性要求;

b) 量化低 SCR 条件下的功率同步稳定性、虚拟惯量/阻尼调整及阻抗整形要求;

c) 验证多机并联或复杂电网场景下参数自适应策略的可靠性。

此外, 应加强与 NERC、ENTSO-E、AEMO 等国际标准衔接, 确保国内测试方法与评价指标跨平台可比, 推动标准体系完善与国际对接。

5. 结论

构网型变流器是高比例新能源电力系统弥补系统惯量缺失、提升电网暂态稳定性的核心设备, 统一的性能评价与标准化测试体系是其规模化落地的关键。本文从六大核心控制机理出发, 对比中、美、欧现行技术标准, 梳理现存规范缺陷并提出标准化完善方案, 主要结论如下:

(1) 从控制机理来看, 故障穿越、惯量支撑、无功调控、过流限流、弱电网运行、GFL/GFM 模式切换六大核心性能由虚拟惯量、阻尼、下垂、虚拟阻抗、电流限幅等参数耦合决定, 多参数协同整定是保障变流

器全工况稳定运行的关键, 需构建配套协同优化设计方法。

(2) 经国内外标准横向比对可知, 目前各国现行规范普遍存在关键指标缺少量化阈值、复杂工况覆盖不全、考核边界不统一三大问题, 尤其在无功输出定额、故障过流限值、相角突变耐受、SCR<1 极弱网考核、连续故障试验等内容无统一规定, 造成产品试验结果难以横向对标、试验重复性差。

(3) 围绕故障穿越、限流控制、宽 SCR 适配三大重点, 针对性提出标准化修订细则: 分级划定高低电压跌落工况下的无功输出指标与连续故障耐受要求; 明确故障限流的启动门槛、峰值限值及动作时序; 划定强/弱/极弱电网的稳态运行边界与参数自适应考核准则, 助力国内标准与国际规范接轨。

综上, 现阶段构网型变流器标准化建设重心不在于新增功能条目, 而在于补齐量化参数与标准化试验条件。优先统一故障无功支撑参数、故障限流指标、SCR<1.5 极弱网运行边界三项关键量化要求, 后续逐步完善多机并联、连续扰动等复杂工况考核细则, 可实现产品由功能性达标向性能指标可量化、可对比转变。

参考文献

- [1] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333.
- [2] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [3] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [4] 赵巍, 钟善林, 孙孝峰, 等. 多态能源单级并网逆变器及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(24): 160-170.
- [5] 殷小东, 余佶成, 刘俊杰, 等. 适用于构网型新能源发电系统的 MCSPWM 多电平逆变器[J]. 高电压技术, 2024, 50

- (02): 861-869.
- [6] HART P, LESIEUTRE B. Energy function for a grid-tied, droop-controlled inverter. 2014 North American Power Symposium (NAPS), Pullman, WA, USA: IEEE, 2014:1-6.
- [7] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [8] 卢文文, 于少娟, 刘立群. 提升并网逆变器在弱电网下稳定性的惯性锁相环策略[J]. 现代电子技术, 2025, 48(20): 56-62.
- [9] 张乐桢, 侯焱伦, 牛炜, 等. 弱电网下增强并联逆变器稳定性的导纳重塑策略[J]. 浙江电力, 2025, 44(08): 99-110.
- [10] 刘梦洁, 何顺帆, 段启豪, 等. 弱电网下多逆变器并联系统的电容电压前馈谐振抑制策略[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2026, 45(03): 401-411.
- [11] NERC. Grid forming technology: bulk power system reliability considerations. 2021.
- [12] NERC. Grid forming functional specifications for bps connected battery energy storage systems. 2023.
- [13] AEMO. Voluntary specification for grid-forming inverters. 2023.
- [14] VDE FNN. Grid-forming & system-supporting behaviour of power-generating modules. 2020.
- [15] National Grid ESO. Minimum specification required for grid forming provision of GB (GBGF) capability virtual machine/VSM (formerly synchronous capability). 2021.
- [16] GB/T 38983.1-2020, 虚拟同步机第1部分: 总则[S].
- [17] CQC/PV15001-2024, 构网型电化学储能电站储能变流器并网技术规范[S].