双馈风力发电系统电网适应性控制技术研究

沈云皓

（华能江西清洁能源有限责任公司，江西 南昌 333000）

摘 要 风电并网规模持续扩增，电力系统对双馈感应发电机组的电网适配性能提出更严苛的运行约束。本文以风机低电压穿越、不对称故障抑制、动态无功支撑三大核心工况为研究主线，梳理转子侧与网侧变流器协同调控的主流技术体系，界定撬棒保护、储能辅助调控两类方案的适用场景与技术边界。对照现行风电并网标准中负序电流抑制、动态无功输出的量化指标，归纳现有控制方案在动态响应速度、直流母线电压稳压、故障短路电流建模分析方面的技术短板。从控制器参数优化整定、保护定值协同匹配两个维度，梳理可落地的技术改进思路，旨在为双馈风机电网适应性控制技术的优化迭代提供理论参考。

关键词 双馈感应发电机；低电压穿越；电网适应性；协同控制；无功支撑

中图分类号：TM614；TM315 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.010

0 引言

新能源发电渗透率持续提升，风电已成为电力系统调峰稳压的重要组成部分，电网对风电机组的管控要求逐步由常态化稳定并网延伸至电网故障阶段的暂态运行规范。双馈感应发电机具备定子直接并网的结构特征，电网电压跌落时会产生剧烈电磁暂态过程，容易引发转子侧过流、直流母线电压骤升等耦合故障问题。现行并网标准明确要求风机在不同深度电压跌落工况下持续并网，同步输出无功功率辅助电网电压恢复。故障工况下变流器主动控制与硬件保护装置存在动作冲突，合理协调二者功能分配与动作时序，是提升机组故障穿越能力、优化电网适配性能的关键研究方向。

1 电网适应性要求的演变与控制难题的形成

国内外风电并网规范持续迭代升级，对风电机组故障工况运行行为的约束趋于细化，不再仅考核机组故障不脱网基础能力，还对故障期间无功支撑水平、有功恢复速度及不对称故障负序电流输出指标作出明确限定，一定程度提升了双馈风机电网适配的控制难度。双馈风机定子直接并网的结构特点，使其对电网电压扰动更为敏感，电压跌落会诱发定子磁链畸变，在转子回路感应出大幅暂态电流，极易触发变流器过流保护。传统线性控制动态抗扰性能有限，撬棒保护虽可保障设备安全，却会造成机组无功吸收、削弱电网稳压效果，保护动作与主动控制的动态配合问题，是当前机组电网适配控制的核心难点。

2 低电压穿越控制策略的技术分类与性能对比

2.1 变流器协同控制与无功优先分配

双馈风机低电压穿越工况下，转子侧变流器的控制目标可划分为两类主流技术方向[1]。部分控制方案以设备安全防护为核心，依托磁链主动衰减算法削弱定子暂态磁链波动，从电磁感应源头降低转子感应过电流，规避功率器件过载损坏风险。另有控制方案以电网故障支撑为导向，在器件电流耐受限值范围内动态重构转子 d、q 轴电流配比，优先输出无功电流，适配并网标准对故障期间动态无功支撑的硬性要求，无功优先动态限幅策略即为该技术思路的典型应用。

网侧变流器主要承担直流母线电压稳定调控任务，是机组故障运行的重要保障环节。当转子侧故障功率无法正常外送时，网侧变流器可配合卸荷电路协同耗能，有效抑制母线电压异常抬升。电网发生不对称电压跌落时，机网侧电流会滋生二倍频脉动分量，需依托正负序分离控制实现精准调控。延迟信号对消法具备更优动态响应特性，相关控制方案已在 2.5 MW 机组硬件在环试验中得到性能验证。变流器主动限流控制与撬棒硬件保护需设置合理时序级差，可在最大限度保留机组可控能力的基础上，保障故障穿越过程平稳连续。

2.2 撬棒保护与储能配合的适用边界

撬棒保护是双馈风机应对深度电网故障的基础防护手段，电阻参数选型直接决定故障抑制效果与机组

作者简介：沈云皓（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气自动化。

并网特性[2]。阻值参数存在明显的性能制衡特征，较大阻值可快速耗散转子故障能量，有效压制转子过流峰值，但会造成机组被动吸收电网无功，不利于故障电网电压恢复；偏小阻值难以充分抑制转子暂态过电流，设备防护效果不足。传统滞环触发逻辑识别精度有限，易受电网瞬时扰动影响，存在误触发隐患，优化后的触发逻辑可一定程度提升故障识别准确性。

撬棒装置投入后会闭锁转子侧变流器，机组短时丧失无功调节功能，容易造成局部电网无功空缺。为弥补该技术短板，行业逐步形成撬棒与储能协同调控方案，依靠撬棒完成转子过流保护，借助储能装置平抑系统不平衡功率，兼顾设备安全与电网支撑需求。该技术模式可有效拓宽机组故障穿越适配范围，但储能设备存在容量与成本约束，整体经济性相对有限，适配场景多集中于电网结构薄弱、故障高发的风电场场址。在极端深度电压跌落工况中，撬棒硬件保护仍为核心兜底手段，储能调控仅可作为辅助优化方式。

2.3 多源无功协同与控制器改进

传统单一化、分段式低电压穿越控制策略，仅适配简单单一的电网故障场景，在新能源多源并网的复杂电力系统中适配性有所不足。为改善机组故障运行与电网动态适配能力，行业构建起转子侧变流器、网侧变流器与静止无功发生器联动的多时间尺度协同控制体系[3]，故障期间可分层输出无功功率支撑电网稳压，故障清除后能够有效抑制系统暂态过电压，完善机组全故障周期调控性能。

为提升变流器抗扰动能力，各类非线性、智能改进控制算法逐步应用于风机调控系统。网侧变流器电压外环可引入径向基神经网络自抗扰控制，通过扩张状态观测器实时识别系统未知扰动并动态补偿，有效削弱直流母线电压的波动幅度。定子串联动态阻抗配合定转子双侧线性自抗扰控制的复合策略，可根据电压跌落深度自适应切换无功补偿与磁链衰减模式。这类改进控制算法降低了控制系统对精准机组模型参数的依赖，环境适配性更强。

3 现有电网适应性核心控制策略的技术优势与工程应用价值

3.1 变流器协同控制提升机组暂态稳定运行能力

转子侧与网侧变流器联动控制模式，适配双馈风机定子直连电网的结构特性，可针对性化解电网故障引发的电磁暂态问题。该控制模式可动态分配无功、有功电流分量，在电压跌落工况下快速抑制转子过流与直流母线电压异常波动。同时可适配对称、不对称两类电网故障场景，通过序分量补偿优化机组运行状态，一定程度提升故障全过程机组可控性，是风电低电压穿越落地应用的核心技术支撑。

3.2 保护与储能复合架构拓宽机组故障耐受范围

撬棒保护与储能装置结合的复合防控体系，实现了设备保护与电网支撑功能的有机结合。传统撬棒装置可快速闭锁故障过流通道，保障变流器核心器件安全运行，规避设备烧毁风险。配套储能设备能够弥补撬棒投入期间的无功缺口，改善故障阶段机组被动吸无功的缺陷。该架构适配不同故障深度的电网工况，有效拓宽了双馈风机的故障耐受区间，适配复杂电网的并网运行需求。

3.3 多源无功协同控制优化电网故障恢复特性

融合变流器与无功补偿设备的多源协同控制技术，突破了单机单一调控的局限性。该技术可依托多设备多时间尺度的调控优势，故障期间分层、精准输出无功功率，持续为电网提供电压支撑。故障清除后可快速抑制电网暂态过电压，平稳完成机组功率恢复过渡。搭配非线性抗扰控制器，能够降低模型参数偏差带来的调控误差，有效提升风电机组与区域电网的动态适配性能。

4 面向标准适配的控制参数整定与保护定值配合方法

4.1 基于负序标准约束的序分量控制器带宽设计方法

当前风电并网标准对不对称故障下机组负序电流幅值与持续输出时长作出明确量化约束，序分量控制器的动态性能，直接影响双馈风机故障并网的合规水平。延迟信号对消法常用于机组正负序分量分离，其控制带宽、滤波阶数与响应速度存在相互制约关系。缩短信号分解周期可减小相位滞后，提升系统动态响应，但会削弱谐波抑制能力，使高频扰动侵入控制环路，对调控精度造成一定影响。

工程设计可依据并网标准限值逆向完成参数匹配，结合并网点电网阻抗与电压不平衡度，确定机组允许的负序波动范围，据此设定滤波基础阶数。不同故障工况需采用差异化带宽配置，轻度电压跌落可适当降低带宽，减小信号延迟带来的控制偏差；深度不对称故障则提升滤波阶数，强化负序分量抑制效果，使机组运行状态贴合并网规范[4]。

转子侧与网侧变流器的调控裕度存在明显区别。转子侧器件电流约束更强，运行中优先保障正序功率稳定，负序抑制优先级相对较低。网侧变流器可调空间更大，可在直流电压波动允许范围内承担主要的负序抑制任务。控制器比例、积分参数需要匹配变流器容量与开关频率，参数取值不合理易放大高频噪声或

延长工况切换过程。通过硬件在环多工况参数扫描，能够筛选出适应性更强、运行更稳定的参数区间。

4.2 撬棒保护定值与变流器限流边界的协调整定方法

双馈风机低电压穿越的核心调控逻辑，依托变流器主动限流控制与撬棒被动保护的层级配合实现，两类保护动作阈值、响应时序的精准匹配，是规避器件损坏、保障机组连续并网的关键。工程应用中，变流器转子电流限幅通常设定为功率器件额定电流的1.5倍至2倍，为主动调控预留充足裕度。撬棒保护触发阈值需适度高于变流器限流上限，形成明确的动作时序层级，保证电网故障初期优先依托变流器算法完成电流抑制，仅在极端故障、主动调控失效时启动硬件保护，最大化保留机组可控调节能力。

电网电压跌落深度、定子暂态磁链分量，直接决定转子电流上升速率与峰值大小。保护定值整定需覆盖区域电网内概率最高的严重故障工况，杜绝极端工况下器件过流烧毁问题，同时规避轻度电压波动、瞬时电压扰动引发的保护误动、机组脱网问题。撬棒电阻参数选取存在双向制衡关系，电阻阻值提升可快速耗散转子侧故障能量，压低转子电流峰值，但会导致机组故障期间持续从电网吸收无功功率，不利于并网点电压自主恢复。

实际参数优化可采用多工况仿真遍历方式，统计不同电阻参数下机组低电压穿越成功率、无功吸收水平以及直流母线电压波动范围，筛选出兼顾设备安全与电网支撑能力的最优阻值区间。风电场多机组并联运行工况下，单台机组撬棒无序投切会造成并网点电压波动紊乱，影响整场故障恢复特性。因此，在单机定值整定基础上，尚需统筹场内所有机组的保护参数，适度错开部分机组保护动作时序，弱化集中投切带来的电网扰动，实现单机安全防护与整场电网适配性的双向平衡。

4.3 直流母线电压抑制中卸荷电路与网侧变流器的功率分配方法

电网故障引发的机网功率失衡，是双馈风机直流母线电压异常抬升的核心诱因。故障时段转子侧持续向直流侧传输电能，网侧变流器受电网电压跌落限制，有功外送能力大幅衰减，过剩电能会造成母线电容承压、电压超限。卸荷电路与网侧变流器的协同功率调控，是抑制直流侧电压波动、保障变流器安全运行的核心工程手段，两类装置的功率分配逻辑，需根据故障严重程度动态自适应调整[5]。

常规工况下优先依托网侧变流器完成过剩功率消纳传输，在器件电流限值范围内最大化向外输送有功功率，缓解直流侧储能堆积问题。电网轻度电压跌落时，网侧变流器电压调控裕度充足，基本可独立完成功率平衡调节，卸荷电路可保持休眠状态，减少频繁投切带来的设备损耗与电压扰动。当电网出现深度电压跌落，网侧变流器并网调压、送功率能力显著下降，系统功率缺口持续扩大，此时需提前触发卸荷电路介入调控，快速消耗直流侧过剩电能，避免母线电压突破电容耐压阈值。

卸荷电路可采用分级投切调控模式，依据直流母线电压偏差幅值，逐级投入不同阻值卸荷电阻，替代传统单一阈值硬投切方式，平缓电压调节过渡过程，弱化瞬时功率扰动。卸荷电阻的额定功率参数，需按照区域电网最严重故障工况校核确定，保障极端故障下能量消纳能力充足。直流母线电容容量与卸荷电路响应速度存在耦合关联，适度提升电容储能容量，可延缓故障初期电压上升速率，为变流器调控、卸荷电路精准投切预留充足响应时间，整体提升直流侧电压调控的稳定性与可靠性。

5 结束语

双馈风机电网适应性控制技术体系处于持续完善的过程中，传统单一撬棒被动保护模式逐步迭代为变流器协同调控、多设备无功互补、正负序精细管控的复合型控制体系。并网标准对负序抑制、动态无功支撑的细化要求，对控制策略的标准化、精准化运行提出更高要求。现阶段参数整定与保护匹配方案尚需依托硬件在环仿真与现场试验积累实测数据，进一步优化适配性。不同电网架构强度、多元故障场景下的自适应控制逻辑，以及风电场集群机组的协同保护策略，有望成为该领域未来深化研究的重点方向。

参考文献：

[1] 陈文超，孙泽禹，汪正军，等. 双馈风力发电机组更换发电机对电网适应性能力的影响[J]. 能源科技，2024，22(04)：65-69.

[2] 康海渊，巩飞. 风力发电机组超级双馈技术研究与应用[J]. 百科论坛电子杂志，2024(09)：31-33.

[3] 褚红博，杨怀强，徐辰辉. 基于动态电压补偿控制的新能源发电并网适应性研究[J]. 光源与照明，2026(04)：188-190.

[4] 尚敬，刘永江，徐凤星，等. 并网型双馈发电机组孤岛穿越控制方法，系统及发电机组：CN202211336295.0[P]. 2023-01-31.

[5] 代喜. 双馈风力发电机组变频系统故障分析及治理对策研究[J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2023(04)：31-36.