

基于模型预测控制的储能变流器动态功率调节策略

武 姣

内蒙古伊泰化工有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017400

摘 要: 储能变流器动态功率调节过程中, 设备硬件约束与电网工况扰动的叠加影响, 会直接拉低调控环节的精度与运行稳定性, 传统调控逻辑在动态场景下的适配短板也逐步凸显。本文引入模型预测控制思路搭建完整的动态功率调节体系, 从多维度运行约束梳理切入, 完成适配功率动态演化规律的预测模型构建, 配套设计多目标滚动优化机制与分层反馈校正逻辑, 为储能变流器的动态功率调控提供可落地的技术路径参考。

关键词: 储能变流器; 模型预测控制; 动态功率调节; 滚动优化; 反馈校正

引言: 新型电力系统建设进程持续推进, 储能装置在电网功率波动平抑、电能资源优化配置环节的作用愈发关键。储能变流器作为储能单元与电网之间的核心交互接口, 其功率调节性能直接决定整个储能并网系统的运行质量。传统功率调控策略的参数适配范围有限, 面对工况的动态波动, 容易出现功率偏差偏大、运行稳定性不足等问题。模型预测控制自带超前调控、多约束协同优化的特性, 可精准匹配变流器复杂的动态调控需求, 依托该方法优化功率调节逻辑, 能切实改善储能并网的调控表现, 适配电力系统稳定运行的实际诉求。

1 储能变流器动态功率调节的运行约束体系

1.1 储能单元充放电过程的边界条件梳理

储能单元的充放电运行存在固有物理边界, 直接限定变流器功率调节的可调区间。储能单体的荷电状态存在上下限阈值, 数值超出对应区间会改变储能介质的工作状态, 引发内部运行特性偏移^[1]。充放电电流存在额定运行限值, 电流数值过高会加剧内部损耗, 加速设备老化, 电流数值过低则无法实现有效功率输出。储能单元端电压会随能量吞吐过程发生动态波动, 电压波动范围需维持在设备允许的工作区间。能量吞吐的持续时长也受硬件属性限制, 短时高强度功率吞吐与长时稳态功率运行, 对应不同的边界取值标准。

1.2 变流器功率回路的运行状态约束构建

储能变流器功率回路包含电力电子器件、滤波模块、传输支路等核心结构, 各结构的硬件运行参数构成功率调节的约束条件。功率开关器件具备固定的耐压与通流极限, 功率调节过程中的电压、电流瞬时峰值不能突破器件额定参数。滤波支路存在阻抗匹配参数范围, 参数偏离标准区间会造成谐波增量, 破坏功率传输质量。功率回路的载波频率、调制比存在合理取值区间, 参数异常会导致回路工作模态偏移, 引发功率传输偏差。依据功率回路硬件

特性与工作机制, 可建立针对性状态约束方程, 精准限定功率调节过程中的各项运行参数。

1.3 电网侧交互的动态特性约束定义

储能变流器与电网开展功率交互时, 电网运行参数会对功率调节行为形成动态约束。电网电压幅值存在标准运行区间, 变流器输出功率的波动会直接影响并网点电压水平。电网频率具备固定稳态取值范围, 功率吞吐的幅值变化会引发频率小幅偏移, 偏移量需要控制在合理区间。并网点的电能质量指标存在规范要求, 谐波畸变、电压不平衡度等参数, 会限制变流器的功率调节幅值与变化速率。电网不同运行工况对应不同参数约束标准, 可依据电网动态运行特性, 明确功率交互过程中的各类约束指标。

1.4 多维度约束的耦合关联逻辑梳理

储能单元、变流器回路、电网侧三类约束并非独立存在, 彼此形成相互制约的耦合关系。储能单元的边界参数变化, 会直接改变变流器功率回路的输入工况, 引发回路运行约束阈值动态偏移。变流器功率回路的参数波动, 会传递至电网并网点, 影响电网侧约束指标的实际取值。电网侧参数的动态变化, 会反向限定变流器功率输出范围, 间接压缩储能单元的可调工况区间。不同维度约束的作用强度随运行工况动态变化, 部分工况下单一约束占据主导, 部分工况下多约束相互牵制, 形成复杂的耦合约束关系。

2 面向功率调节的模型预测控制建模方法

2.1 储能变流器功率动态过程的状态空间表征

储能变流器的功率调节过程具备强动态、时变的运行特征, 常规数学表达式难以完整刻画内部动态变化规律。状态空间建模方式可将复杂的功率动态过程拆解为可量化的状态变量与输入变量。选取直流侧电压、交流侧输出电流、回路功率偏差作为核心状态变量, 覆盖变

流器能量转换与功率传输的核心环节^[2]。筛选调制信号、负载扰动、电网工况波动作为系统输入变量，对应外部工况对功率调节过程的影响。结合电力电子变换机理，推导各变量之间的微分方程，完成高阶动态系统的状态空间方程推导。通过矩阵化简方式整理系统模型，实现变流器功率动态过程的精准数学表征，为后续预测建模提供基础载体。

2.2 有限时域内功率演化的预测模型搭建

模型预测控制依托有限时域预测机制实现动态调控，需基于状态空间模型构建功率演化预测体系。截取固定时长的未来时域作为预测区间，依托当前时刻的系统运行状态，推演后续时刻的功率变化趋势。结合变流器功率响应的动态特性，离散化连续状态方程，适配数字控制的运行模式。引入系统运行约束条件修正预测方程，规避参数超限带来的模型失真问题。根据功率调节的动态变化速率，调整离散采样周期，保证预测曲线贴合系统真实运行态势。搭建的预测模型可精准刻画有限时域内输出功率的演化轨迹，为控制量优化求解提供数据支撑。

2.3 控制输入与功率输出的映射关系构建

变流器功率调节的核心逻辑，在于通过可控控制输入实现输出功率的精准调控。梳理功率调节体系中的可控输入参数，以调制系数、控制电压幅值作为核心调控变量。分析各类输入参数对有功功率、无功功率输出的作用机制，拆解单一变量的独立影响与多变量的交互作用。通过微分求解与参数拟合，建立控制变量与输出功率的量化对应关系。剔除模型中影响精度的冗余参数，简化映射结构，降低后续算法求解的运算量。构建的映射关系可精准反映参数调控对功率状态的影响，实现控制输入到功率输出的精准对应。

2.4 预测步长与控制步长的适配逻辑设计

预测步长与控制步长的取值，直接决定模型预测控制的动态响应性能与运算效率。预测步长主导系统未来状态的推演时长，取值过短会缺失功率动态变化趋势，取值过长会放大模型累积误差。控制步长决定控制指令的更新频率，取值偏大降低调控灵敏度，取值偏小提升系统运算负荷。结合储能变流器功率波动的变化特征，划分不同的工况区间。针对各区间的功率变化速率，匹配差异化的步长参数。建立步长动态适配规则，根据系统实时运行状态调整两类步长的取值，平衡控制精度与运算成本。

3 动态功率调节的滚动优化机制设计

3.1 多目标功率调节的代价函数构建

储能变流器动态功率调节需要兼顾多项控制指标，单一优化目标无法适配复杂的电力运行场景。功率跟踪精度是优化体系的核心指标，用来衡量实际输出功率与指令功率的偏差程度。控制变量波动幅度作为辅助优化指标，限制调控参数的剧烈波动，维持系统运行的平稳性。功率调节过程的损耗水平纳入优化体系，依托器件损耗特性，约束功率吞吐过程的能量损耗^[3]。通过权重系数分配各项目标的优先级，适配不同运行场景的调控需求。结合量化指标搭建完整代价函数，将多维度调控需求转化为可求解的数学优化问题，为滚动优化提供核心求解依据。

3.2 约束条件下的控制序列寻优逻辑设计

滚动优化的核心运算环节为控制序列的迭代寻优，所有求解过程需要嵌套前文梳理的各类运行约束。将储能单元边界参数、变流器回路运行限值、电网交互约束引入寻优过程，划定可行解的取值范围。依托预测模型推演的功率演化趋势，生成有限时域内的初始控制序列。通过迭代算法不断修正序列内的控制参数，持续缩小代价函数的计算数值。剔除超出约束区间的无效解，保留符合硬件工况与电网规范的有效控制参数。逐层筛选最优控制序列，保证每一组调控参数均可满足安全运行与功率优化的双重要求。

3.3 单步控制量的实时输出规则设定

模型预测控制的滚动优化机制具备迭代更新特性，完整时域的最优控制序列无需全部投入运行。提取最优控制序列中的首个控制量作为当前时刻的执行指令，完成即时功率调控动作。设定固定的采样更新周期，完成单步控制量输出后，系统会刷新运行状态数据。基于全新状态数据重启预测与寻优流程，生成下一时刻的控制指令。明确单步控制量的输出阈值与刷新标准，杜绝控制指令频繁跳变引发的功率震荡。标准化的输出规则可以适配数字控制系统的运行逻辑，保障调控过程的连续性与实时性。

3.4 不同运行工况下的优化逻辑切换设计

电力系统运行工况存在明显动态变化，固定优化逻辑难以适配全工况的功率调节需求。稳态运行工况侧重控制平稳性与低损耗，优化逻辑侧重弱化控制参数波动，压缩无用能耗。功率剧烈波动工况侧重跟踪快速性与精准度，优化逻辑侧重提升功率响应速度，缩小功率偏差。电网参数偏移工况侧重运行安全性，优化逻辑优先贴合电网约束阈值，保障并网运行稳定。设置工况识别判据，依托系统实时运行参数判定当前运行状态。绑定对应场景的代价函数权重与寻优规则，实现优化逻辑

的自主切换,适配多变的功率调节场景。

4 功率调节过程的反馈校正与协同控制逻辑

4.1 实际运行状态与预测轨迹的偏差识别逻辑

功率调节系统的实际运行环境复杂且多变,电力器件参数会在长期工作中产生缓慢偏移,电网运行状态也会出现频繁波动。各类内外扰动都会让模型推演的预测轨迹偏离实际工况,降低功率调节的精准度。偏差识别体系的搭建,就是为了精准捕捉这类动态运行偏差。系统持续采集并网点功率数据、变流器工作参数以及储能单元运行状态,形成全面的实时工况数据样本。通过量化比对实时工况数据与模型预测数据,重点排查功率幅值、功率变化速率两类核心偏差问题^[4]。设置梯度化的判定标准,区分稳态小幅偏差和动态大幅偏差的不同特征。精准梳理各类偏差的产生源头,区分建模精度误差、器件长期损耗、外部工况扰动等不同成因,为后续模型校正工作提供可靠的调整依据。

4.2 预测模型的实时更新与校正流程设计

参数固定的预测模型无法长期适配电力系统的动态演化规律,设备老化、工况更迭都会让原有模型参数失去适配性,造成预测精度下降。依托实时运行数据更新模型参数,是维持预测精度的关键手段。系统根据偏差识别的结果启动分层校正机制,按照偏差严重程度匹配对应的校正策略。工况仅存在小幅稳态偏差时,仅微调模型内部运算参数,在不扰动系统运行的前提下维持计算精度。工况出现大幅动态偏差时,则对状态方程核心参数开展迭代更新,重构适配当下工况的模型运算结构。清晰界定校正机制的启动条件、执行时序与完整运算流程,规范数据采集、偏差解析、参数修正各环节工作,让预测模型始终贴合系统真实的功率演化规律。

4.3 不同控制层级之间的功率指令衔接逻辑

储能变流器功率调控体系采用分层控制架构,不同控制层级的工作侧重、运算逻辑各有不同。层级划分的结构特点,容易引发指令传递卡顿、参数匹配失衡等问题,需要搭建完善的指令衔接机制来保障调控流畅性。上层控制模块负责研判全局运行工况,生成符合系统运行需求的基础功率调度指令。中层优化模块结合设备自身的运行约束,对全局指令进行拆分细化,转化为可供底层设备执行的精细化控制参数。底层执行模块接收优

化后的控制指令,完成功率输出的实际调控操作。明确各层级的数据交互规范与指令传输时序,打通层级间的信息传递壁垒。统一全域数据的计算标准,减少指令拆分、传输过程中产生的数值偏差,保障功率指令从生成到落地执行的全程顺畅贯通。

4.4 多运行模式下的功率调节平滑过渡机制

储能变流器能够适配多种电力运行场景,对应设置多套独立的功率调节运行模式。不同工作模式的控制参数、约束阈值和调控逻辑均存在差异,模式切换的瞬间容易产生功率跳变、工况震荡等不稳定现象。系统梳理恒功率运行、电网波动补偿、并网稳态运行等常用工作模式的运行特点,清晰界定每种模式的参数运行边界。依托电网运行状态、储能可用容量和功率波动程度搭建工况判别体系,精准判定模式切换的合适时机。采用渐进式参数调整方式,逐步替换原有控制参数,平稳完成系统运行模式的迭代更替。有效缓解模式切换带来的工况突变问题,让功率输出状态保持平稳过渡,提升变流器对复杂电力工况的适应能力与运行稳定性。

结束语

整套调控逻辑覆盖从约束梳理、模型搭建到优化执行、反馈校正的全流程环节,各模块之间形成紧密联动的闭环运行体系,可适配不同复杂程度的电网运行场景。这套动态功率调节方案跳出传统调控策略的适配局限,兼顾功率调节精度与系统运行稳定性,能为同类储能变流器的调控逻辑优化提供清晰的实践思路,支撑储能并网环节的可靠高效运行。

参考文献

- [1]张东岳.基于虚拟振荡器的大功率储能变流器有源阻尼控制[J].电工技术,2026(4):13-15,21.
- [2]杨启明,董宁波,张梦,等.构网型储能变流器有功调频系数的自适应调节方法[J].电力设备管理,2025(1):156-158.
- [3]赵正奎,韩民晓,陈来军.主动支撑型储能变流器多机并联的暂态电压优化控制[J].电工技术学报,2026,41(9):2991-3004.
- [4]陆畅,周金博.基于虚拟同步机的储能变流器控制策略研究[J].现代电子技术,2025,48(12):89-95.