基于动态安全功率区间的直流微电网多源协调控制

敖文杰，陈家伟†，王 浩，贾启彤

(重庆大学 自动化学院，重庆 401331)

摘 要: 针对直流微电网中异构电源动态差异大、固定功率分配难以兼顾母线电压调节与电源安全的问题, 提出一种基于动态安全功率区间的多源协调控制方法. 首先利用控制障碍函数 (CBF) 将各电源安全约束映射为状态相关的源侧安全功率区间, 并综合变换器运行约束及功率跟踪误差, 获得母线侧容许功率区间. 其次基于母线电压控制李雅普诺夫函数 (CLF) 和鲁棒 CBF 分别构造电压调节约束与总注入功率安全约束, 进而建立在线二次规划 (QP), 根据各支路安全裕量和动态响应特性协调分配功率. 仿真结果表明, 在负载阶跃、电源能力退化、聚合能力不足及负载估计误差工况下均未违反安全约束, 可随安全功率区间变化自适应调整功率分配, 并在供能不足时识别功率缺口并实施有界切负荷.

关键词: 直流微电网；多源协同；安全功率裕量；控制障碍函数；控制李雅普诺夫函数；动态功率分配

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0855

引用格式: 敖文杰, 陈家伟, 王浩, 等. 基于动态安全功率区间的直流微电网多源协调控制 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

Dynamic safe power interval-based multi-source coordinated control for DC microgrids

AO Wen-jie，*CHEN Jia-wei*†，*WANG Hao*，*JIA Qi-tong*

(School of Automation，Chongqing University，Chongqing 401331，China)

Abstract: To address the challenges of heterogeneous source dynamics and the difficulty of balancing DC-bus voltage regulation and source safety under fixed power allocation, this paper proposes a coordinated multi-source control strategy based on dynamic safe power intervals. First, control barrier functions (CBFs) are employed to derive state-dependent safe power intervals for individual sources, which are further mapped to admissible bus-side power intervals by incorporating converter operating constraints and power tracking errors. Then, a control Lyapunov function (CLF) and a robust CBF are used to formulate voltage regulation and aggregate power safety constraints, respectively. An online quadratic program (QP) coordinates power allocation according to source safety margins and dynamic response characteristics. Simulation results demonstrate that the proposed strategy maintains safety under load steps, source capability degradation, insufficient aggregate capacity, and load estimation errors. It adaptively reallocates power as safe intervals evolve and enables power deficit identification and bounded load shedding under supply shortages.

Keywords: DC microgrid； multi-source coordination； safety margin； control barrier function； control Lyapunov function；dynamic power allocation

0 引 言

直流微电网便于接入直流新能源、储能装置和直流负载, 是分布式能源高效利用的重要形式[1-4]. 在直流微电网中, 燃料电池 (Fuel Cell, FC)、锂电池 (Battery, BAT) 和超级电容 (Supercapacitor, SC) 等异构电源通常经各自的 DC-DC 变换器并联接入公共母线. 燃料电池适合承担缓慢变化的功率, 电池用于补偿中频能量不平衡, 超级电容则响应快速暂态. 因此, 如何根据不同电源的动态特性安全、合理地分配功率, 是多源直流微电网能量管理的核心问题[5-6].

上述电源的运行约束各不相同: 燃料电池受电堆电流、反应物供给和功率爬坡率限制, 电池受荷电状态、电流及温度限制, 超级电容的可用功率则随端电压变化. 当某一电源接近安全边界时, 其可提供或

收稿日期: 2026-08-25；**录用日期:** 2026-10-10.
基金项目: 国家自然科学基金项目 (62573066).
责任编委: 邢兰涛.
†通信作者. E-mail: echenjw@cqu.edu.cn.

吸收的功率将明显收缩. 能量管理系统因而需要实时评估各电源的安全功率能力, 并据此生成物理可行的功率指令. 传统的固定比例或固定限值分配难以满足这一要求.

针对微电网多源协同与能量管理, 已有研究采用下垂控制及其改进方法实现无通信功率分担[7], 采用基于规则或分频解耦的策略预先规定各电源的动态分工[8], 也采用模型预测控制和优化调度方法改善运行经济性[9-10]. 反馈线性化、滑模控制等方法则为DC-DC 变换器的电压调节与闭环稳定提供了理论基础[11-13]. 然而, 闭环稳定并不等同于暂态过程中始终满足电源侧和变换器约束. 固定功率上限或固定参与系数也无法反映 SOC、温度、端电压和爬坡率等状态变化对安全功率能力的影响. 因此, 上层控制器仍可能给出额定范围内但当前状态下无法执行的功率指令.

控制李雅普诺夫函数 (control Lyapunov function, CLF) 与控制障碍函数 (control barrier function, CBF) 为统一处理控制性能与安全约束提供了系统化方法[14]. CLF 描述系统状态向期望工作点的收敛趋势, CBF 通过保证安全集的前向不变性将状态约束直接纳入控制器, 二者与二次规划结合后可在线协调性能目标和安全要求. 近年来, CBF 已用于电力电子系统和微电网的安全控制. 在未知或时变负载下, CBF 可限制直流微电网的暂态电压与电流[15]; 近端–储备 CBF 可在电压恢复和电流分配过程中强化暂态约束[16]; 鲁棒 CBF 与 CLF-QP 还被用于虚假数据注入攻击下的直流微电网安全控制[17] 以及网络化微电网的分布式频率安全控制[18]. 然而, 现有 CBF 研究多侧重于维持母线电压、支路电流或变换器状态安全, 通常是在控制指令生成后对其进行约束或修正. 对于含多类异构电源的直流微电网, 不同电源分别受到能量、热、电气和动态约束, 其安全充放电能力随内部状态不断变化. 由于相应障碍函数的状态变量和量纲不同, 这些约束难以直接用于上层功率分配. 现有方法尚未充分解决两个相互关联的问题: 一是如何将异构电源的安全约束统一映射到功率决策空间, 二是当系统聚合供能能力不足时如何协调多源功率并实施减额. 为此, 需要建立从电源状态约束到系统级安全功率能力的统一接口.

针对上述问题, 本文提出一种安全裕量驱动的 CLF-CBF 自主功率决策方法. 主要工作如下: 1) 将各支路的源侧 CBF 约束映射为安全功率集合, 并结合变换器可行域和接口误差界, 得到随状态变化的母线侧容许参考区间 $\mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}}(x_i)=[P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}}(x_i), P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}}(x_i)]$, 其中, x_i统称计算该支路容许区间所需的源侧状态、电感电流、母线电压及上一时刻功率等本地信息; 该区间随x_i变化, 从而将电化学、热、电气约束统一到功率域; 2) 由母线 CLF 确定总功率需求, 构建同时考虑容许区间、安全裕量和电源运行代价的在线 QP, 并在供需受限时综合硬约束可行性和运行代价确定有界减额或切负荷量; 3) 将 CBF 作为硬约束, 仅在安全要求与电压调节目标冲突时松弛 CLF, 并在接口误差与采样补偿有效、上下层硬约束持续可行的条件下分析复合安全性与母线电压的实用稳定性.

1 系统建模与问题描述

考虑图 1 所示的直流微电网. 燃料电池、锂电池和超级电容分别经独立的 DC-DC 变换器支路并联接入公共直流母线. 其中, 燃料电池支路采用单向 Boost 变换器, 电池和超级电容支路采用双向 Boost 变换器, 以便吸收再生功率. 记电源集合

$$\mathcal{I}=\{\mathrm{fc},\mathrm{bat},\mathrm{sc}\}. \tag{1}$$

支路i的源侧功率记为$P_{s,i}$, 注入母线的功率记为$P_{b,i}$. 规定功率为正时能量由电源流向母线, 因此燃料电池支路满足$P_{s,\mathrm{fc}}\geqslant 0$.

其中, $P_{s,i}$和$P_{b,i}$是实际功率, $P_{b,i}^{\mathrm{ref}}$是上层下发的母线侧功率参考; $\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{safe}}$表示源侧实际功率安全集合, $\mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}}$表示经接口收紧和变换器约束处理后的母线侧参考集合. 两类集合对应不同功率端口, 不直接等同.

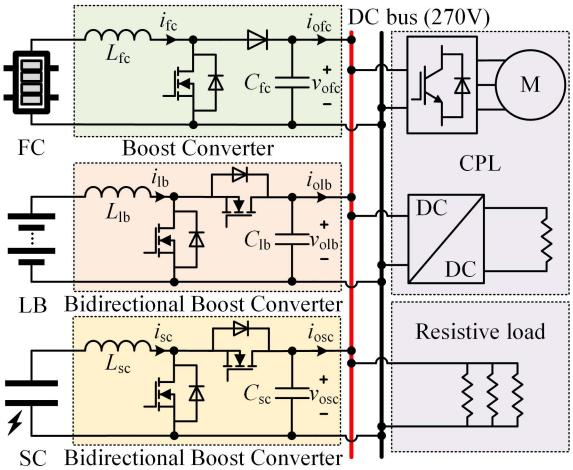

图 1 燃料电池-锂电池-超级电容直流微电网结构

1.1 平均模型与源–母线功率接口

支路i的低压侧电源电压、电感电流、电感、等效串联电阻和占空比分别记为$E_i(\xi_i)$、i_i、L_i、r_i和d_i, 母线电压和母线电容分别记为V和C_{dc}. 在连续导通模式下, 支路平均模型为

$$L_i\dot{i}_i = E_i(\xi_i) - r_i i_i - (1-d_i)V, \tag{2}$$

源侧与母线侧功率分别为

$$P_{s,i} = E_i(\xi_i) i_i, \tag{3}$$

$$P_{b,i} = (1-d_i) V i_i. \tag{4}$$

式 (2) 两边乘i_i得瞬时功率接口关系

$$P_{s,i} - P_{b,i} = r_i i_i^2 + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}(\frac{1}{2} L_i i_i^2), \tag{5}$$

式表明, 暂态过程中源侧功率与母线注入功率并不相等. 为使上层功率分配显式考虑变换器损耗及电感储能变化, 在给定紧运行域内写成

$$P_{b,i} = P_{s,i} + \varepsilon_i, \tag{6}$$

其中

$$\varepsilon_i = -r_i i_i^2 - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}(\frac{1}{2} L_i i_i^2) \ |\varepsilon_i| \leqslant \bar{\varepsilon}_i. \tag{7}$$

其中, $\bar{\varepsilon}_i$为支路i暂态功率不平衡量的上界. 母线功率平衡方程为

$$C_{\mathrm{dc}} V \dot{V} = \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{b,i} - P_{\mathrm{load}}, \tag{8}$$

其中, P_{load}为母线净负载功率, 规定$P_{\mathrm{load}} > 0$表示负载从母线吸收功率, $P_{\mathrm{load}} < 0$表示再生功率注入母线.

注 1　式 (2)–(8) 等价于 Boost 变换器在连续导通模式下的经典状态空间平均模型. 式 (2) 为占空比平均后的电感方程; 将母线电容电流方程$C_{\mathrm{dc}}\dot{V} = \sum_i (1-d_i) i_i - P_{\mathrm{load}}/V$两边乘以$V$, 可得功率平衡式 (8); 式 (5) 则由式 (2) 两边乘以i_i得到. 本文采用功率域模型主要基于以下考虑: 1) 氧过量系数、SOC、温度和超级电容电压等安全状态均受功率影响, 统一到功率域后便于构造第 3 节的容许功率区间; 2) 若在上层保留双线性项$(1-d_i)Vi_i$, 功率分配问题将成为非凸问题, 因此将占空比交由支路本地控制器求解, 使上层 QP 保持凸性; 3) 电感动态通常处于毫秒或微秒尺度, 而电源侧安全动态处于秒级, 上层无需显式保留电感状态, 只需离线确定接口误差界$\bar{\varepsilon}_i$.

1.2　源侧动态模型

电源i的慢速安全动态可统一表示为

$$\dot{\xi}_i = F_i(\xi_i, P_{s,i}) + w_i, \tag{9}$$

其中, F_i表示支路i的标称慢速安全动态, w_i包含建模误差和外部扰动; 由状态估计引起的 CBF 计算误差另由估计裕量补偿, 避免重复计入. 设扰动满足

$$\|w_i\| \leqslant \bar{w}_i. \tag{10}$$

对于源功率呈仿射关系的安全通道, (9) 退化为

$$\dot{\xi}_i = f_i(\xi_i) + g_i(\xi_i) P_{s,i} + w_i. \tag{11}$$

其中, f_i和g_i分别为仿射模型的漂移项和源功率输入系数. 式 (9) 保留了非仿射形式, 以描述电池发热等与功率呈二次关系的安全动态.

对于燃料电池支路, 其代表性的安全状态向量为

$$\xi_{\mathrm{fc}} = [\ p_{\mathrm{fc}} \quad \lambda_{\mathrm{O_2}}\ ]^T, \tag{12}$$

其中, p_{fc}为当前实际燃料电池功率, $\lambda_{\mathrm{O_2}}$为氧气过量比. 在调度时间尺度上, 燃料电池功率的爬坡模型为

$$\dot{p}_{\mathrm{fc}} = u_{\mathrm{fc}}, \ -r_{\mathrm{fc}}^- \leqslant u_{\mathrm{fc}} \leqslant r_{\mathrm{fc}}^+, \tag{13}$$

其中, u_{fc}为燃料电池实际功率变化率, r_{fc}^+和r_{fc}^-分别为允许的最大上升速率和下降速率. 氧气动态可表示为

$$\dot{\lambda}_{\mathrm{O_2}} = f_\lambda(\lambda_{\mathrm{O_2}}, \chi_{\mathrm{air}}) + g_\lambda(\lambda_{\mathrm{O_2}}, \chi_{\mathrm{air}}) P_{s,\mathrm{fc}} + w_\lambda, \tag{14}$$

其中, f_λ和g_λ分别为氧动态的标称漂移函数与源功率系数, χ_{air}表示影响氧动态的供气状态或输入, w_λ表示该通道中的有界扰动; 构造安全区间时, $P_{s,\mathrm{fc}}$作为候选源侧功率, 其实际执行误差由功率接口统一约束. 在正常工作区域内, $g_\lambda < 0$.

对于电池支路, 其代表性的安全状态向量为

$$\xi_{\mathrm{bat}} = [\ s_{\mathrm{bat}} \quad T_{\mathrm{bat}}\ ]^T, \tag{15}$$

其中, s_{bat}为荷电状态 (SOC), T_{bat}为电池温度. 二者分别满足

$$\dot{s}_{\mathrm{bat}} = -\frac{P_{s,\mathrm{bat}}}{Q_{\mathrm{bat}} V_{\mathrm{bat}}(s_{\mathrm{bat}})}, \tag{16}$$

以及

$$C_{T,\mathrm{bat}} \dot{T}_{\mathrm{bat}} = R_{\mathrm{bat}} (\frac{P_{s,\mathrm{bat}}}{V_{\mathrm{bat}}})^2 - h_{\mathrm{bat}}(T_{\mathrm{bat}} - T_a). \tag{17}$$

式 (16) 中, Q_{bat}为以库仑计的电池容量, 安时容量需乘以 3 600; $V_{\mathrm{bat}} = E_{\mathrm{bat}}(\xi_{\mathrm{bat}})$为电池端电压. 式 (17) 中, $C_{T,\mathrm{bat}}$、R_{bat}、h_{bat}和T_a分别为等效热容、内阻、散热系数和环境温度; 其中h_{bat}不是障碍函数.

对于超级电容支路, 忽略等效串联电阻 (ESR) 时, 有

$$C_{\mathrm{sc}} V_{\mathrm{sc}} \dot{V}_{\mathrm{sc}} = -P_{s,\mathrm{sc}}. \tag{18}$$

其中, C_{sc}为超级电容等效电容, V_{sc}为其端电压. 若考虑 ESR, 可将端电流和端电压限值直接并入源侧容许功率集合, 后续功率区间投影方法不变.

1.3　分层架构、安全集与控制目标

控制器采用双层结构. 上层根据源侧 CBF 得到安全功率集合, 并结合接口界 (6)、底层跟踪误差和变换器可行域, 将其投影为母线侧容许功率区间, 据此分配$P_{b,i}^{\mathrm{ref}}$. 下层在各 Boost 支路中求解本地 CLF-

CBF-QP, 通过有界映射$i_i^{\mathrm{ref}}=\Gamma_i(P_{b,i}^{\mathrm{ref}},x_i)$生成电流参考并计算占空比, 同时向上层提供可量化的跟踪误差界. 由于支路不能视为理想功率执行器, 本文将其有限跟踪精度计入系统级安全裕量.

本文将x_i作为集合记号, 用于汇集ξ_i、i_i、V、上一时刻功率及参考整形所需的内部状态; Γ_i表示由母线侧功率参考生成电流参考的本地映射, 不是新增优化变量. 记本地控制周期为T_c, 上层更新周期为T_s, 多速率执行时可取$T_s=NT_c$, N为正整数. 上层参考在更新间隔内保持, 本地电流参考应满足后文的有界性和可微条件. 周期选择须同时兼顾电流跟踪、母线暂态、QP 计算预算以及采样裕量, 不能仅依据源侧慢动态确定. 本文分析针对固定时序且采样间残差被既定裕量覆盖的实现; 不包含任意通信延迟或丢包条件.

支路i的源侧安全集定义为

$$\mathcal{C}_{\rangle}=\{\xi_i:h_{i,k}(\xi_i)\geqslant 0,\ k=1,\dots,N_i\},\tag{19}$$

其中, N_i为支路i所考虑的源侧安全约束数量, k为约束编号. 典型安全函数包括: 燃料电池电流约束$h_{\mathrm{fc},I}=I_{\mathrm{fc,max}}-I_{\mathrm{fc}}$和氧过量系数约束$h_{\mathrm{fc},\lambda}=\lambda_{\mathrm{O_2}}-\lambda_{\mathrm{O_2,min}}$; 电池 SOC 约束$h_{\mathrm{soc},1}=s_{\mathrm{bat}}-s_{\min}$、$h_{\mathrm{soc},2}=s_{\max}-s_{\mathrm{bat}}$和温度约束$h_{\mathrm{bat},T}=T_{\max}-T_{\mathrm{bat}}$; 超级电容电压约束$h_{\mathrm{sc},1}=V_{\mathrm{sc}}-V_{\mathrm{sc,min}}$和$h_{\mathrm{sc},2}=V_{\mathrm{sc,max}}-V_{\mathrm{sc}}$. 其中, I_{fc}和$I_{\mathrm{fc,max}}$分别为燃料电池源侧电流及其上限, $s_{\min}$和$s_{\max}$为 SOC 上下限, $T_{\max}$为电池温度上限, $V_{\mathrm{sc,min}}$和$V_{\mathrm{sc,max}}$为超级电容电压上下限. 母线安全集定义为

$$\mathcal{C}_{\lfloor}=\{V:V_{\min}\leqslant V\leqslant V_{\max}\}.\tag{20}$$

控制目标是在满足电源侧、变换器电流、输入和母线电压等硬约束的前提下, 将V调节至V_{ref}. 安全约束不允许松弛, 仅可通过松弛 CLF 约束降低跟踪性能要求.

2 电源侧安全功率能力

2.1 基于 CBF 的源侧安全功率区间

对第k个源侧安全函数$h_{i,k}(\xi_i)$, 由式 (9) 得

$$\dot{h}_{i,k}=\nabla h_{i,k}^{T}F_i(\xi_i,P_{s,i})+\nabla h_{i,k}^{T}w_i.\tag{21}$$

设$\alpha_{i,k}(\cdot)$为扩展$\mathcal{K}$类函数, 鲁棒 CBF 条件为

$$\nabla h_{i,k}^{T}F_i(\xi_i,P_{s,i})+\alpha_{i,k}(h_{i,k})-\sigma_{i,k}\geqslant 0,\tag{22}$$

其中保守裕量

$$\sigma_{i,k}\geqslant\|\nabla h_{i,k}\|\bar{w}_i+\sigma_{i,k}^{\mathrm{samp}}+\sigma_{i,k}^{\mathrm{est}},\tag{23}$$

$\sigma_{i,k}^{\mathrm{samp}}$用于补偿零阶保持下的采样间状态变化, $\sigma_{i,k}^{\mathrm{est}}$用于补偿估计误差. 由第$k$个 CBF 确定的容许源功率集合定义为

$$\mathcal{U}_{s,i,k}^{\mathrm{CBF}}(\xi_i)=\{P_{s,i}:\nabla h_{i,k}^{T}F_i(\xi_i,P_{s,i})+\alpha_{i,k}(h_{i,k})-\sigma_{i,k}\geqslant 0\},\tag{24}$$

并对仿射通道 (11) 记

$$\beta_{i,k}=-L_{f_i}h_{i,k}-\alpha_{i,k}(h_{i,k})+\sigma_{i,k},\tag{25}$$

其中, $L_{f_i}h_{i,k}:=\nabla h_{i,k}^{T}f_i$和$L_{g_i}h_{i,k}:=\nabla h_{i,k}^{T}g_i$分别为安全函数沿漂移项和功率输入方向的 Lie 导数. 则式 (22) 化为半空间

$$L_{g_i}h_{i,k}P_{s,i}\geqslant\beta_{i,k},\tag{26}$$

因此, 仿射源侧 CBF 可转化为功率上界或下界, 非仿射约束则可直接给出有界功率区间. 综合所有安全约束、额定功率约束和爬坡约束, 得到

$$\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{safe}}=\bigcap_{k}\mathcal{U}_{s,i,k}^{\mathrm{CBF}}\cap\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{rated}}\cap\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{ramp}},\tag{27}$$

其中, $\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{rated}}$和$\mathcal{P}_{s,i}^{\mathrm{ramp}}$分别表示额定功率约束与单周期爬坡约束确定的源侧功率集合. 下文带具体通道下标的α和σ, 如$\alpha_\lambda,\alpha_{s,1},\alpha_T,\alpha_{\mathrm{sc},1}$及其对应裕量, 均为通用量$\alpha_{i,k}$和$\sigma_{i,k}$在相应安全通道上的简写. 对于本文模型, 式 (27) 为闭区间$[P_{s,i,\min}^{\mathrm{safe}},P_{s,i,\max}^{\mathrm{safe}}]$. 若下端点大于上端点, 则该支路不存在可行安全功率, 应转入保护状态或退出功率分配.

2.2 燃料电池安全功率能力

燃料电池功率需满足$P_{s,\mathrm{fc}}\geqslant 0$、额定功率和电堆电流约束. 记$V_{\mathrm{fc}}=E_{\mathrm{fc}}(\xi_{\mathrm{fc}})$为燃料电池端电压, $I_{\mathrm{fc}}=P_{s,\mathrm{fc}}/V_{\mathrm{fc}}$为源侧电流, $P_{\mathrm{fc,rated}}$和$I_{\mathrm{fc,max}}$分别为额定功率和最大允许电流. 在上层更新周期T_s内, 非对称爬坡约束为

$$p_{\mathrm{fc}}-r_{\mathrm{fc}}^{-}T_s\leqslant P_{s,\mathrm{fc}}\leqslant p_{\mathrm{fc}}+r_{\mathrm{fc}}^{+}T_s,\tag{28}$$

根据$h_\lambda=\lambda_{\mathrm{O_2}}-\lambda_{\mathrm{O_2,min}}$、式 (14) 以及$g_\lambda<0$, 可进一步得到

$$P_{s,\mathrm{fc}}\leqslant\frac{f_\lambda+\alpha_\lambda h_\lambda-\sigma_\lambda}{-g_\lambda}.\tag{29}$$

综合上述约束, 燃料电池的安全功率区间端点为

$$P_{s,\mathrm{fc,min}}^{\mathrm{safe}}=\max\{0,p_{\mathrm{fc}}-r_{\mathrm{fc}}^{-}T_s\},\tag{30}$$

$$P_{s,\mathrm{fc,max}}^{\mathrm{safe}}=\min\{P_{\mathrm{fc,rated}},V_{\mathrm{fc}}I_{\mathrm{fc,max}},p_{\mathrm{fc}}+r_{\mathrm{fc}}^{+}T_s,(f_\lambda+\alpha_\lambda h_\lambda-\sigma_\lambda)/(-g_\lambda)\}.\tag{31}$$

2.3 电池安全功率能力

由 SOC 下界障碍$h_{s,1}=s_{\mathrm{bat}}-s_{\min}$与式 (16) 得

$$P_{s,\mathrm{bat}}\leqslant Q_{\mathrm{bat}}V_{\mathrm{bat}}(\alpha_{s,1}h_{s,1}-\sigma_{s,1}),\tag{32}$$

由 SOC 上界障碍$h_{s,2}=s_{\max}-s_{\mathrm{bat}}$得

$$P_{s,\mathrm{bat}} \geqslant -Q_{\mathrm{bat}} V_{\mathrm{bat}} (\alpha_{s,2} h_{s,2} - \sigma_{s,2}). \tag{33}$$

源电流限值给出

$$-V_{\mathrm{bat}} I_{\mathrm{ch,max}} \leqslant P_{s,\mathrm{bat}} \leqslant V_{\mathrm{bat}} I_{\mathrm{dis,max}}. \tag{34}$$

其中, $I_{\mathrm{ch,max}}$和$I_{\mathrm{dis,max}}$分别为电池最大充电电流和最大放电电流. 对温度障碍$h_T = T_{\max} - T_{\mathrm{bat}}$, 由式 (17), 当容许热裕量非负时得

$$|P_{s,\mathrm{bat}}| \leqslant V_{\mathrm{bat}} \sqrt{\frac{h_{\mathrm{bat}}(T_{\mathrm{bat}} - T_a) + C_{T,\mathrm{bat}}(\alpha_T h_T - \sigma_T)}{R_{\mathrm{bat}}}}. \tag{35}$$

若根号内为负, 则不存在满足热 CBF 的可行电池功率, 此时应将该支路移出正常功率分配. 电池安全功率区间由式 (32)–(35) 与额定功率、爬坡约束共同确定.

2.4　超级电容安全功率能力

功率为正表示放电. 由式 (18), 电压下界障碍$h_{\mathrm{sc},1} = V_{\mathrm{sc}} - V_{\mathrm{sc,min}}$给出

$$P_{s,\mathrm{sc}} \leqslant C_{\mathrm{sc}} V_{\mathrm{sc}} (\alpha_{\mathrm{sc},1} h_{\mathrm{sc},1} - \sigma_{\mathrm{sc},1}), \tag{36}$$

上界障碍$h_{\mathrm{sc},2} = V_{\mathrm{sc,max}} - V_{\mathrm{sc}}$给出

$$P_{s,\mathrm{sc}} \geqslant -C_{\mathrm{sc}} V_{\mathrm{sc}} (\alpha_{\mathrm{sc},2} h_{\mathrm{sc},2} - \sigma_{\mathrm{sc},2}). \tag{37}$$

结合电流限值

$$|P_{s,\mathrm{sc}}| \leqslant V_{\mathrm{sc}} I_{\mathrm{sc,max}}, \tag{38}$$

其中, $I_{\mathrm{sc,max}}$为超级电容支路允许的最大源侧电流. 即可得到$\mathcal{P}_{s,\mathrm{sc}}^{\mathrm{safe}}$. 当超级电容接近储能边界时, 该区间相应收缩.

2.5　变换器约束、本地 CLF 与母线侧功率投影

对式(2) 定义$h_{I,+} = I_{i,\max} - i_i$、$h_{I,-} = i_i - I_{i,\min}$, 其中$I_{i,\min}$和$I_{i,\max}$为支路电感电流允许的下限和上限, $\alpha_{I,+}, \alpha_{I,-}$及$\sigma_{I,+}, \sigma_{I,-}$分别为两个电流 CBF 通道的扩展$\mathcal{K}$类函数参数与鲁棒裕量. 鲁棒电流 CBF 给出占空比上下界

$$d_i \leqslant \frac{V - E_i + r_i i_i + L_i \alpha_{I,+} h_{I,+} - L_i \sigma_{I,+}}{V}, \tag{39}$$

$$d_i \geqslant \frac{V - E_i + r_i i_i - L_i \alpha_{I,-} h_{I,-} + L_i \sigma_{I,-}}{V}, \tag{40}$$

从而

$$\mathcal{D}_i^{\mathrm{safe}} = [d_{i,\min}, d_{i,\max}] \cap [\underline{d}_i^{\mathrm{CBF}}, \overline{d}_i^{\mathrm{CBF}}]. \tag{41}$$

其中, $d_{i,\min}$和$d_{i,\max}$为物理占空比限值, $\underline{d}_i^{\mathrm{CBF}}$和$\overline{d}_i^{\mathrm{CBF}}$分别为式 (40) 和 (39) 给出的 CBF 下界与上界. 令$e_{I,i} = i_i - i_i^{\mathrm{ref}}$、$V_{I,i} = \frac{1}{2} e_{I,i}^2$. 本地 QP 包含如下软 CLF 约束:

$$e_{I,i} \left[\frac{E_i - r_i i_i - (1 - d_i) V}{L_i} - \dot{i}_i^{\mathrm{ref}} \right] + c_{I,i} V_{I,i} \leqslant \delta_{I,i} \tag{42}$$

其中$\delta_{I,i} \geqslant 0$. 系数$c_{I,i} > 0$为本地电流 CLF 的衰减率参数. 在满足式 (39)–(41) 的条件下, 目标函数取为

$$\min_{d_i, \delta_{I,i}} \frac{1}{2} (d_i - d_i^{\mathrm{ff}})^2 + \rho_{I,i} \delta_{I,i}^2. \tag{43}$$

其中, $\rho_{I,i} > 0$为本地 CLF 松弛量的惩罚权重, $\bar{\delta}_{I,i}$表示后续分析中采用的松弛量有效上界. 在标称轨迹$i_i = i_i^{\mathrm{ref}}$上反解式 (2), 前馈占空比可写为

$$d_i^{\mathrm{ff}} = \mathrm{sat}_{[d_{i,\min}, d_{i,\max}]} \left(1 - \frac{E_i - r_i i_i^{\mathrm{ref}} - L_i \dot{i}_i^{\mathrm{ref}}}{V}\right).$$

其中, $\mathrm{sat}_{[a,b]}(z) = \min\{b, \max\{a, z\}\}$为限幅算子. 该前馈量仅作为性能目标, 最终占空比仍须由本地 QP 满足电流 CBF. 若$\delta_{I,i} \leqslant \bar{\delta}_{I,i}$, 由软 CLF 不等式有

$$V_{I,i}(t) \leqslant e^{-c_{I,i}(t - t_0)} V_{I,i}(t_0) + \frac{\bar{\delta}_{I,i}}{c_{I,i}} (1 - e^{-c_{I,i}(t - t_0)}), \tag{44}$$

其中, t_0为所考察跟踪区间的初始时刻. 从而得到全时间统一电流误差界

$$|e_{I,i}(t)| \leqslant \bar{e}_{I,i} := \sqrt{2 \max\{V_{I,i}(t_0), \frac{\bar{\delta}_{I,i}}{c_{I,i}}\}}. \tag{45}$$

进一步定义参考功率匹配残差$\eta_{\Gamma,i} = (1 - d_i) V i_i^{\mathrm{ref}} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}$. 其中, $\bar{G}_i$和$\bar{\eta}_{\Gamma,i}$分别为功率增益项$|(1 - d_i)V|$与参考匹配残差$|\eta_{\Gamma,i}|$在紧运行域内的有效上界. 若相应上界成立, 则

$$|P_{b,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}| \leqslant \bar{G}_i \bar{e}_{I,i} + \bar{\eta}_{\Gamma,i} =: \bar{e}_{P,i}. \tag{46}$$

令$e_{P,i} := P_{b,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}$为支路母线侧功率跟踪误差. $\bar{e}_{P,i}$既可由上述解析界保守计算, 也可在给定紧运行域和采样周期下通过离线闭环最坏情况误差包络进行标定. 合并接口界与跟踪界

$$\bar{\Delta}_i^{\mathrm{int}} = \bar{\varepsilon}_i + \bar{e}_{P,i}, \tag{47}$$

由$P_{b,i} = P_{s,i} + \varepsilon_i$和$P_{b,i} = P_{b,i}^{\mathrm{ref}} + e_{P,i}$可得

$$|P_{s,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}| \leqslant |e_{P,i}| + |\varepsilon_i| \leqslant \bar{\Delta}_i^{\mathrm{int}}. \tag{48}$$

因此将母线侧参考限制于

$$\mathcal{P}_{b,i}^{\mathrm{src}} = [P_{s,i,\min}^{\mathrm{safe}} + \bar{\Delta}_i^{\mathrm{int}}, P_{s,i,\max}^{\mathrm{safe}} - \bar{\Delta}_i^{\mathrm{int}}], \tag{49}$$

则在任意容许误差下, 实际源功率均不会超出安全区间. 支路最终容许功率区间的两个端点可分别通过低维凸优化求得:

$$P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}} = \max_{P_{b,i}^{\mathrm{ref}}, d_i} P_{b,i}^{\mathrm{ref}}, \; P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}} = \min_{P_{b,i}^{\mathrm{ref}}, d_i} P_{b,i}^{\mathrm{ref}}, \tag{50}$$

约束为$P_{b,i}^{\mathrm{ref}} \in \mathcal{P}_{b,i}^{\mathrm{src}}$、$d_i \in \mathcal{D}_i^{\mathrm{safe}}$、瞬时跟踪一致性

$$|(1-d_i)Vi_i - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}| \leqslant \bar{e}_{P,i} \tag{51}$$

及变换器额定限值. 上层采用的区间记为

$$\mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}} = [P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}}, P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}}]. \tag{52}$$

需要指出, 式 (51) 只描述瞬时一致性, 整个采样区间内的安全跟踪仍以假设 3 为前提. 时间尺度分离有利于减小误差, 但本身不构成上下层输入相容性的证明.

裕量选取按以下顺序进行: 先确定运行域、参考变化范围和固定采样周期; 再依据式 (5) 和 (46) 估计接口误差及功率跟踪误差, 并由离线闭环记录校核其覆盖范围; 随后按式 (47) 组合接口裕量. 源侧采样裕量取保持周期内标称 CBF 残差相对采样时刻变化的上界, 可用残差的 Lipschitz 常数、状态变化率上界与保持时长的乘积保守估计; 母线采样裕量按相同方法在功率量纲下计算. 不同来源的残差应分开核算, 避免重复计入. 裕量过大会使容许区间缩小, 增加电压跟踪与供电需求之间的折中, 甚至造成保守不可行. 对此, 应优先改善底层跟踪与状态估计, 并在有覆盖依据的运行范围内重新标定, 而非为减少减额直接缩小安全界. 对称收紧后区间非空还要求源侧区间宽度不小于$2\bar{\Delta}_i^{\mathrm{int}}$, 应与每周期爬坡窗口联合核对.

2.6 支路级与系统级安全裕量

记$P_{b,i}^{\mathrm{pre}}$为上一上层更新时刻用于计算裕量和运行应力的母线侧基准功率, 支路正、负裕量定义为

$$R_i^{+} = P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}} - P_{b,i}^{\mathrm{pre}},\ R_i^{-} = P_{b,i}^{\mathrm{pre}} - P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}}, \tag{53}$$

聚合容许区间

$$\mathcal{P}_{\Sigma}^{\mathrm{safe}} = [\sum_i P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}}, \sum_i P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}}], \tag{54}$$

以及相对于估计负载$\hat{P}_{\mathrm{load}}$的系统正、负裕量

$$R_{\mathrm{sys}}^{+} = \sum_i P_{b,i,\max}^{\mathrm{safe}} - \hat{P}_{\mathrm{load}}, \tag{55}$$

$$R_{\mathrm{sys}}^{-} = \hat{P}_{\mathrm{load}} - \sum_i P_{b,i,\min}^{\mathrm{safe}}. \tag{56}$$

$R_{\mathrm{sys}}^{+} < 0$表示安全供电能力不足, $R_{\mathrm{sys}}^{-} < 0$表示安全吸收能力不足. 系统可根据这两个指标判断是否需要减额.

3 基于 CLF-CBF 的自主功率决策

3.1 母线 CLF 与标称总功率需求

令$e = V - V_{\mathrm{ref}}$, 取

$$V_b(e) = \frac{1}{2}e^2. \tag{57}$$

记负载估计$\hat{P}_{\mathrm{load}}$, 满足

$$P_{\mathrm{load}} = \hat{P}_{\mathrm{load}} + e_L,\ |e_L| \leqslant \bar{e}_L. \tag{58}$$

由式 (8) 可知, 在未触发减额且忽略支路功率跟踪误差和负载估计误差时, 为使$\dot{e} = -k_v e$, 标称总功率需求应取为

$$P_{\mathrm{req}} = \hat{P}_{\mathrm{load}} - k_v C_{\mathrm{dc}} V e,\ k_v > 0, \tag{59}$$

相应的软 CLF 约束为

$$\frac{e}{C_{\mathrm{dc}}V}(\sum_i P_{b,i}^{\mathrm{ref}} - \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}}) + c_b V_b \leqslant \delta_b, \tag{60}$$

其中, $c_b > 0$为母线电压 CLF 的衰减率参数, $\delta_b \geqslant 0$仅用于松弛电压跟踪要求, 不影响安全约束; $\hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}} = \hat{P}_{\mathrm{load}} - \ell + q$为计及减额后的有效估计负载. 减额激活时, 该 CLF 约束仍保留在 QP 中, 并不会退出电压调节.

3.2 鲁棒母线电压 CBF

实际母线功率满足$P_{b,i} = P_{b,i}^{\mathrm{ref}} + e_{P,i}$, 其中$|e_{P,i}| \leqslant \bar{e}_{P,i}$. 将支路跟踪误差与负载估计误差合并, 定义实际母线功率平衡误差

$$\Delta_b = \sum_i e_{P,i} - e_L,\ |\Delta_b| \leqslant \bar{\Delta}_b^{\mathrm{bal}}. \tag{61}$$

由三角不等式可保守取$\bar{\Delta}_b^{\mathrm{bal}} = \sum_i \bar{e}_{P,i} + \bar{e}_L$; 若采用聚合误差的离线包络, 则可获得更紧的界. 对于上层零阶保持实现, 再以等效功率裕量$\bar{\Delta}_b^{\mathrm{samp}} \geqslant 0$补偿采样间状态变化, 并定义母线 CBF 采用的总鲁棒裕量

$$\bar{\Delta}_b = \bar{\Delta}_b^{\mathrm{bal}} + \bar{\Delta}_b^{\mathrm{samp}}. \tag{62}$$

其中$\bar{\Delta}_b^{\mathrm{samp}}$可依据给定紧运行域内 CBF 条件的 Lipschitz 界、一步可达集或离线采样闭环包络确定. 母线通道中的$\alpha_{b,1}$和$\alpha_{b,2}$分别为电压下界与上界 CBF 对应的扩展$\mathcal{K}$类函数. 对$h_{b,1} = V - V_{\min}$和$h_{b,2} = V_{\max} - V$, 保证母线电压下界和上界 CBF 成立的充分条件分别为

$$\sum_i P_{b,i}^{\mathrm{ref}} \geqslant \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}} - C_{\mathrm{dc}} V \alpha_{b,1}(V - V_{\min}) + \bar{\Delta}_b, \tag{63}$$

$$\sum_i P_{b,i}^{\mathrm{ref}} \leqslant \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}} + C_{\mathrm{dc}} V \alpha_{b,2}(V_{\max} - V) - \bar{\Delta}_b. \tag{64}$$

由式 (63) 和 (64) 可得鲁棒母线安全总功率区间$\mathcal{B}_{\mathrm{r}}(V, \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}})$, 下标r表示该区间已计入鲁棒收紧. 因此, 系统在当前时刻的容许总参考功率集合为

$$\mathcal{S}_{\pm} = \mathcal{P}_{\pm}^{\mathrm{safe}} \cap \mathcal{B}_{\mathrm{r}}(V, \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}}). \tag{65}$$

3.3 集中式 CLF-CBF-QP 自主决策器

记ℓ为切负荷功率, q为需要耗散的再生功率, 并规定

$$0 \leqslant \ell \leqslant \ell_{\max},\ 0 \leqslant q \leqslant q_{\max}, \tag{66}$$

其中, $\ell_{\max}$和$q_{\max}$分别为当前可执行的最大切负荷功率和最大再生功率耗散能力. 有效估计负载为

$$\hat{P}_{\text{load}}^{\text{eff}} = \hat{P}_{\text{load}} - \ell + q. \tag{67}$$

在本文的聚合减额模型中, 减额作用于实际负载, 式 (8) 相应采用$P_{\text{load}}^{\text{eff}} = P_{\text{load}} - \ell + q$. 此处不另建离散负载块和投切延迟模型; 实际装置的执行偏差若不可忽略, 应纳入总功率误差界后重新校核. 定义支路安全区间中心$P_{i,c}^{\text{safe}} = (P_{b,i,\min}^{\text{safe}} + P_{b,i,\max}^{\text{safe}})/2$, 并以$m_i = \min\{P_{b,i,\max}^{\text{safe}} - P_{b,i}^{\text{pre}}, P_{b,i}^{\text{pre}} - P_{b,i,\min}^{\text{safe}}\}$表示当前功率到两侧边界的最小距离. 相应的状态相关权重取为

$$\gamma_i(x_i) = \gamma_{i,0} + \frac{\kappa_i}{\epsilon_\gamma + \max(m_i, 0)}, \tag{68}$$

当安全裕量减小时, $\gamma_i(x_i)$增大, 使分配结果趋近容许区间中心并远离安全边界. 运行应力代价定义为

$$J_{\text{health}} = c_{\text{fc},r}(\frac{P_{b,\text{fc}}^{\text{ref}} - P_{b,\text{fc}}^{\text{pre}}}{T_s})^2 + c_{\text{bat},I}(\frac{P_{b,\text{bat}}^{\text{ref}}}{V_{\text{bat}}})^2 + c_{\text{sc},E}(E_{\text{sc}}^{+} - E_{\text{sc,mid}})^2, \tag{69}$$

其中, $E_{\text{sc}} = \frac{1}{2}C_{\text{sc}}V_{\text{sc}}^2$为超级电容当前储能, $E_{\text{sc}}^{+} = E_{\text{sc}} - T_s P_{b,\text{sc}}^{\text{ref}}$为一步预测储能. 系数$c_{\text{fc},r}$、$c_{\text{bat},I}$和$c_{\text{sc},E}$分别为燃料电池功率变化率、电池电流应力和超级电容储能偏差的非负权重. 令$E_{\text{sc,mid}} = \frac{1}{2}C_{\text{sc}}(V_{\text{sc}}^{\text{ref}})^2$, 其中$V_{\text{sc}}^{\text{ref}}$为期望中间电压. $\gamma_{i,0}$和κ_i为安全裕量权重参数, $\epsilon_\gamma > 0$为避免分母为零的小常数. 本文不预先指定各支路的固定功率目标, 支路间的分配偏好由动态安全区间中心项与运行应力代价共同表征. 取决策变量

$$y = [P_{b,\text{fc}}^{\text{ref}}, P_{b,\text{bat}}^{\text{ref}}, P_{b,\text{sc}}^{\text{ref}}, \delta_b, \ell, q]^T, \tag{70}$$

自主功率决策 QP 写为

$$\min_{y} \sum_{i\in\mathcal{I}} \gamma_i(x_i)(P_{b,i}^{\text{ref}} - P_{i,c}^{\text{safe}})^2 + J_{\text{health}} + \rho_b\delta_b^2 + \rho_\ell\ell^2 + \rho_q q^2 \tag{71}$$

$$\text{s.t. } P_{b,i,\min}^{\text{safe}} \leqslant P_{b,i}^{\text{ref}} \leqslant P_{b,i,\max}^{\text{safe}},\ i \in \mathcal{I}, \tag{72}$$

$$\frac{e}{C_{\text{dc}}V}(\sum_i P_{b,i}^{\text{ref}} - \hat{P}_{\text{load}}^{\text{eff}}) + c_b V_b \leqslant \delta_b, \tag{73}$$

$$\hat{P}_{\text{load}}^{\text{eff}} - C_{\text{dc}}V\alpha_{b,1}(V - V_{\min}) + \bar{\Delta}_b \leqslant \sum_i P_{b,i}^{\text{ref}}, \tag{74}$$

$$\sum_i P_{b,i}^{\text{ref}} \leqslant \hat{P}_{\text{load}}^{\text{eff}} + C_{\text{dc}}V\alpha_{b,2}(V_{\max} - V) - \bar{\Delta}_b, \tag{75}$$

$$\delta_b \geqslant 0,\ 0 \leqslant \ell \leqslant \ell_{\max},\ 0 \leqslant q \leqslant q_{\max}. \tag{76}$$

其中, $\rho_b > 0$、$\rho_\ell > 0$和$\rho_q > 0$分别为母线 CLF 松弛、切负荷与再生耗散的惩罚权重. 各支路容许区间确定后, 关于y的硬安全约束均为仿射约束; 优化问题中仅允许通过δ_b松弛 CLF 约束.

权重整定应先依据各变量的允许变化尺度统一代价量级, 再比较惩罚强度, 避免直接比较不同量纲的ρ_b、ρ_ℓ和ρ_q. 归一化后可从支路代价的单位量级出发, 提高减额相对电压跟踪的惩罚以抑制非必要减额, 同时避免过大的权重比造成数值条件恶化. 本文严格保证的是硬安全约束优先于可松弛的 CLF, 电源协同、电压松弛与减额之间则属于单一 QP 的加权折中.

3.4　减额、切负荷与不可行处理

当$\ell = q = 0$且硬约束可行时, 系统具备无减额供电的可行解. 若无减额时的集合$\mathcal{P}_{\pm}^{\text{safe}} \cap \mathcal{B}_{\text{r}}(V, \hat{P}_{\text{load}})$为空, 则必须利用有界减额恢复可行性, 或进入保护; 实际 QP 输出还受目标权重影响. 请求功率或系统裕量可用于反映供需紧张程度, 但不直接等同于严格的减额启停阈值. 若任意有界的(ℓ, q)均不能恢复式 (65) 的非空性, 则判定上层硬约束不可行, 并启动适当保护; 不通过松弛 CBF 继续运行. 本文的ℓ是聚合可削减功率, 不包含具体负载组合优化. 工程上可优先降低可调负载功率, 再切除低优先级非关键负载, 关键负载不纳入常规切除序列; $\ell_{\max}$取实际可削减容量. 能力恢复后, 可按重要性由高到低恢复负载, 并在投入前重新检查安全功率区间和母线约束, 结合滞环或保持时间避免频繁投切. q需由实际耗能装置执行, 未配置时取$q_{\max} = 0$.

3.5　决策流程

在每个上层更新周期内, 控制器依次执行以下步骤:

步骤 1: 测量或估计V、$\hat{P}_{\text{load}}$、i_i、ξ_i及上一时刻的支路功率;

步骤 2: 计算各电源的源侧安全功率集合$\mathcal{P}_{s,i}^{\text{safe}}$;

步骤 3: 计算$\bar{\varepsilon}_i$、$\bar{e}_{P,i}$以及鲁棒源–母线功率区间 (49);

步骤 4: 根据式 (41) 计算$\mathcal{D}_i^{\text{safe}}$, 并进一步利用式 (50) 计算最终母线侧容许区间$\mathcal{P}_i^{\text{safe}}$;

步骤 5: 构造$\mathcal{P}_{\pm}^{\text{safe}}$、$R_i^{\pm}$、$R_{\text{sys}}^{\pm}$和鲁棒母线功率区间;

步骤 6: 求解式 (71)–(76) 所示 QP, 得到$P_{b,i}^{\text{ref}}$和所需的减额量;

步骤 7: 将$P_{b,i}^{\text{ref}}$下发至本地 CLF-CBF-QP, 计算d_i并执行本地安全控制;

步骤 8: 若支路容许区间为空, 或经有界减额后上层问题仍不可行, 则触发支路切除、硬件保护或任

务级重构.

4 安全性与稳定性分析

4.1 假设

假设 1(正电压与紧运行域) 取包含候选安全集的预定紧运行域Ω, 并以V_{dom}表示该运行域内采用的正电压下界, 其中$V \geqslant V_{\mathrm{dom}} > 0$、$V_{\mathrm{dom}} \leqslant V_{\min}$且$E_i(\xi_i) > 0$. 相关函数具备所需的连续性和局部 Lipschitz 性质, 闭环解存在; 以下结论在轨迹未离开该运行域期间成立.

假设 2 (已知鲁棒与采样数据界) 在Ω上, 模型、负载估计、接口及跟踪误差的既定界有效; 源侧、电流和母线采样裕量能够覆盖固定执行周期内的相应 CBF 残差变化. 该条件针对给定时序, 并不自动覆盖任意增大的采样周期或通信延迟.

假设 3 (底层安全跟踪) 对任意$P_{b,i}^{\mathrm{ref}} \in \mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}}$, 本地问题 (43) 在给定运行域内可行, 且最优 CLF 松弛量满足

$$0 \leqslant \delta_{I,i} \leqslant \bar{\delta}_{I,i}. \tag{77}$$

电流参考i_i^{ref}及其导数在所考虑运行域内有界.

该安全跟踪条件针对实际本地 QP 沿同一闭环轨迹在整个保持区间内执行的结果, 而非仅要求瞬时存在某个可行占空比. 离散实现中, $\bar{\delta}_{I,i}$还应包含本地 CLF 的采样间残差上界. 此外, 存在有限常数$\bar{G}_i$和$\bar{\eta}_{\Gamma,i}$, 使得

$$|(1-d_i)V| \leqslant \bar{G}_i,\ |\eta_{\Gamma,i}| \leqslant \bar{\eta}_{\Gamma,i}, \tag{78}$$

其中$\eta_{\Gamma,i} = (1-d_i)Vi_i^{\mathrm{ref}} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}$为参考功率匹配残差.

假设 4 (有界减额能力) 实际减额装置满足式 (66). 只有当上层硬约束可在该范围内恢复可行时, 所设计的分配器才能保证母线安全; 否则应判定硬约束不可行, 并启动硬件保护或任务级保护.

4.2 局部安全性

引理 1 (源侧安全) 若$\xi_i(0) \in \mathcal{C}_\wedge$, 且$P_{s,i}(t)$对每个源侧安全函数均满足式 (22), 则在给定运行域内, $\mathcal{C}_\wedge$前向不变.

证明 由式 (21)、$\|w_i\| \leqslant \bar{w}_i$和裕量定义 (23) 可得$\dot{h}_{i,k} \geqslant -\alpha_{i,k}(h_{i,k})$. 根据比较引理, 当$h_{i,k}(0) \geqslant 0$时, 对任意$t \geqslant 0$均有$h_{i,k}(t) \geqslant 0$, 因此各安全子集的交集$\mathcal{C}_\wedge$前向不变. □

引理 2 (变换器安全与跟踪) 若$I_{i,\min} \leqslant i_i(0) \leqslant I_{i,\max}$, 且本地控制器满足式 (39)、(40) 及物理占空比约束, 则电流安全集

$$\mathcal{C}_{I,i} = \{i_i : I_{i,\min} \leqslant i_i \leqslant I_{i,\max}\} \tag{79}$$

前向不变. 若进一步满足假设 3, 则本地电流跟踪误差在全时间内有界, 且支路功率跟踪误差满足

$$|P_{b,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}| \leqslant \bar{e}_{P,i}. \tag{80}$$

证明 由式 (39) 和 (40) 可知, 两个电流 CBF 均满足

$$\dot{h}_{I,\pm} \geqslant -\alpha_{I,\pm}(h_{I,\pm}), \tag{81}$$

因此根据比较引理, 当$I_{i,\min} \leqslant i_i(0) \leqslant I_{i,\max}$时, 电流安全集$\mathcal{C}_{I,i}$前向不变, 同时物理占空比约束与电流 CBF 共同保证$d_i \in \mathcal{D}_i^{\mathrm{safe}}$.

另一方面, 由式 (42) 以及假设 3 中的$\delta_{I,i} \leqslant \bar{\delta}_{I,i}$可得

$$\dot{V}_{I,i} \leqslant -c_{I,i}V_{I,i} + \bar{\delta}_{I,i}. \tag{82}$$

根据比较引理可得式 (44), 进而由式 (45) 有

$$|e_{I,i}(t)| \leqslant \bar{e}_{I,i},\ t \geqslant t_0. \tag{83}$$

又由

$$P_{b,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}} = (1-d_i)Ve_{I,i} + \eta_{\Gamma,i}, \tag{84}$$

结合假设 3 中的$|(1-d_i)V| \leqslant \bar{G}_i$及$|\eta_{\Gamma,i}| \leqslant \bar{\eta}_{\Gamma,i}$, 可得

$$|P_{b,i} - P_{b,i}^{\mathrm{ref}}| \leqslant \bar{G}_i\bar{e}_{I,i} + \bar{\eta}_{\Gamma,i} =: \bar{e}_{P,i}, \tag{85}$$

即得到式 (46). 因此, 本地电流安全集前向不变, 且电流与功率跟踪误差均保持有界. □

4.3 聚合即时可行性

引理 3 (聚合功率分配的即时可行性) 给定非空区间$\mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}} = [\underline{P}_i, \overline{P}_i]$和聚合母线侧参考功率$P_\Sigma$, 存在满足$P_{b,i}^{\mathrm{ref}} \in \mathcal{P}_i^{\mathrm{safe}}$且$\sum_i P_{b,i}^{\mathrm{ref}} = P_\Sigma$的参考组, 当且仅当

$$P_\Sigma \in [\sum_i \underline{P}_i, \sum_i \overline{P}_i]. \tag{86}$$

证明 由各支路功率上下界可直接得到必要性. 另一方面, 有限个闭区间的 Minkowski 和仍为闭区间, 其下、上端点分别等于各区间下、上端点之和, 因此式 (86) 也足以保证存在满足要求的参考功率分配. □

因此, 硬分配约束可行的充要条件是存在有界(ℓ, q)使

$$\mathcal{P}_\pm^{\mathrm{safe}} \cap \mathcal{B}_{\mathrm{r}}(V, \hat{P}_{\mathrm{load}}^{\mathrm{eff}}) \neq \varnothing. \tag{87}$$

式 (87) 刻画了当前时刻的可行性. 递归可行性还需要对后续更新过程建立受控不变性或可生存性条件, 不在本文的分析范围内.

4.4 鲁棒母线安全性

引理 4 (鲁棒母线安全) 若$V(0) \in [V_{\min}, V_{\max}]$、$|\Delta_b| \leqslant \bar{\Delta}_b$, 且分配器满足式 (63) 和 (64), 则在给定

采样运行域内, 母线安全集$\mathcal{C}_[$前向不变.

证明　对下界障碍有

$$\dot{h}_{b,1}=\frac{1}{C_{\rm dc}V}(\sum_i P_{b,i}^{\rm ref}-\hat{P}_{\rm load}^{\rm eff}+\Delta_b). \tag{88}$$

在最不利情形$\Delta_b=-\bar{\Delta}_b$下, 将式 (63) 代入上式, 可得$\dot{h}_{b,1}+\alpha_{b,1}h_{b,1}\geqslant 0$. 对上界障碍函数, 在$\Delta_b=+\bar{\Delta}_b$时可作同样推导. 由比较引理可知$V(t)\in[V_{\min},V_{\max}]$, 采样间状态变化由假设 2 中的裕量补偿. □

4.5　复合安全性

记x为由母线电压、各源侧状态、各支路电感电流及参考整形状态组成的总闭环状态. 将各子安全集视为该状态空间中的约束, 定义总安全集

$$\mathcal{C}=\mathcal{C}_b\cap\bigcap_{i\in\mathcal{I}}(\mathcal{C}_i\cap\mathcal{C}_{I,i}), \tag{89}$$

占空比约束作为输入容许条件, 通过$d_i\in\mathcal{D}_i^{\rm safe}$单独保证.

定理 1 (复合安全)　在假设 1–4 成立的条件下, 设$x(0)\in\mathcal{C}$. 若每个更新时刻各支路容许区间非空, 且经有界减额后上层硬约束可行, 则在上述条件持续成立期间, $\mathcal{C}$前向不变, 所有占空比满足输入约束. 若后续可行性或误差界条件失效, 则不再保证复合安全; 局部安全能否维持仍取决于其自身条件, 应启动相应保护.

证明　各子安全条件需要由同一组实际输入同时满足. 由非空支路区间及式 (87), 选取一组可行的$P_{b,i}^{\rm ref}$和减额量. 假设 3 保证对这组参考, 本地 QP 执行的d_i同时满足电流 CBF、占空比限值及功率跟踪误差界. 由式 (48) 与 (49), 同一轨迹上的实际源功率满足$|P_{s,i}-P_{b,i}^{\rm ref}|\leqslant\bar{\Delta}_i^{\rm int}$, 因而位于相应源侧安全区间; 源侧采样裕量进一步补偿保持期间的状态变化.

另一方面, 同一组占空比产生$P_{b,i}=P_{b,i}^{\rm ref}+e_{P,i}$. 将这些实际功率代入母线方程, 聚合残差由$\bar{\Delta}_b$覆盖, 因此所选总参考功率同时满足母线 CBF 的充分条件. 于是各源侧、电流及母线安全函数沿同一闭环轨迹满足相应比较不等式. 由引理 1、引理 2 和引理 4, 每个保持区间内均不越界, 再利用更新时刻物理状态的连续性逐段延拓, 得到复合前向不变性. 该论证依赖持续可行性和有效误差界, 不把时间尺度分离或单时刻可行性等同于递归可行性. □

4.6　母线电压实用稳定性

定理 2 (实用稳定)　设在未触发减额且$V\geqslant V_{\min}>0$的运行区间内, 分配器实现如下标称总参考功率:

$$\sum_i P_{b,i}^{\rm ref}=\hat{P}_{\rm load}-k_vC_{\rm dc}Ve. \tag{90}$$

若$|\Delta_b|\leqslant\bar{\Delta}_b$, 则

$$|e(t)|\leqslant e^{-k_v(t-t_0)}|e(t_0)|+\frac{\bar{\Delta}_b}{k_vC_{\rm dc}V_{\min}}(1-e^{-k_v(t-t_0)}), \tag{91}$$

从而

$$\limsup_{t\to\infty}|e(t)|\leqslant\frac{\bar{\Delta}_b}{k_vC_{\rm dc}V_{\min}}. \tag{92}$$

当$\Delta_b\equiv 0$时, 母线电压误差指数收敛到零.

证明　由式 (8)、(90) 和 (61) 可得$\dot{e}=-k_ve+\Delta_b/(C_{\rm dc}V)$. 由于$V\geqslant V_{\min}$, 扰动项的幅值不超过$\bar{\Delta}_b/(C_{\rm dc}V_{\min})$. 利用标量比较方程即可得到式 (91) 和 (92). □

若采用软 CLF 约束 (60), 且存在有效松弛上界$\delta_b\leqslant\bar{\delta}_b$, 其中离散实现的$\bar{\delta}_b$同时覆盖采样间 CLF 残差, 则$\dot{V}_b\leqslant-c_bV_b+\bar{\delta}_b+|e|\bar{\Delta}_b/(C_{\rm dc}V_{\min})$. 令$a=\bar{\Delta}_b/(C_{\rm dc}V_{\min})$, 由 Young 不等式可得$\dot{V}_b\leqslant-\frac{c_b}{2}V_b+\bar{\delta}_b+a^2/c_b$, 因此母线电压误差实用稳定, 并满足

$$\limsup_{t\to\infty}|e(t)|\leqslant 2\sqrt{\frac{\bar{\delta}_b}{c_b}+\frac{a^2}{c_b^2}}. \tag{93}$$

减额期间, CLF 使用有效负载, 所以上述有界性分析仍适用. 减额退出后, 若总参考重新满足式 (90), 可将退出时刻作为式 (91) 的初始时刻描述电压恢复; 若仍有 CLF 松弛, 则采用式 (93) 的有界邻域结论. 减额退出不意味着松弛量立即为零, 也不保证电压单调恢复.

4.7　讨论

各类 CBF 在优化中同时作为硬约束, 不作相互替代. CLF 可通过δ_b松弛, 有界ℓ和q用于调整有效供需关系. 硬安全约束与软性能目标的优先关系由约束形式保证, 其余性能取舍由代价权重决定. 若硬约束仍不可行, 则启动硬件保护或任务级保护.

鲁棒裕量分为两类. 源侧裕量$\sigma_{i,k}$用于补偿模型误差、估计误差和采样间状态变化, 并相应收紧本地 CBF 约束; $\bar{\Delta}_b$用于综合补偿底层功率跟踪误差、负载估计误差以及上层零阶保持引起的采样间 CBF 残差变化, 并收紧母线 CBF 约束. 这些裕量可根据模型的 Lipschitz 界、可达性分析或辨识得到的最坏情况包络确定. 提高状态估计与功率跟踪精度, 可减小所需裕量并扩大容许功率区间.

对于电池内阻或超级电容 ESR 随温度、老化引起的变化, 只要其对源侧动态、端压映射及功率接口造成的偏差能够由既定模型和误差界覆盖, 就可纳

入原有鲁棒约束. 电池内阻增大应反映为热模型的最不利发热量, 超级电容 ESR 影响应计入源侧损耗或端压误差, 不能认为变换器串联电阻已自动包含源内部 ESR. 若参数变化超出原标定范围, 则需重新估计误差界、收缩允许功率或转入保护.

5 仿真验证

5.1 仿真设置

基于第 2 节建立的系统模型开展仿真验证. 燃料电池、电池和超级电容分别通过 Boost 变换器接入 270V 直流母线, 主要仿真参数见表 1. 按燃料电池、电池和超级电容的顺序, 接口误差界与功率跟踪误差界分别取$[\bar{\varepsilon}_{\mathrm{fc}}, \bar{\varepsilon}_{\mathrm{bat}}, \bar{\varepsilon}_{\mathrm{sc}}] = [75, 75, 100]$ W 和$[\bar{e}_{P,\mathrm{fc}}, \bar{e}_{P,\mathrm{bat}}, \bar{e}_{P,\mathrm{sc}}] = [450, 350, 300]$ W, 负载估计误差界取$\bar{e}_L = 100$ W. 上层主 QP 仅含 6 个决策变量, 各本地 QP 仅含 2 个决策变量, 均为低维稠密 QP. 文献表明, 此类规模的 QP 采用活动集法或内点法在主流数字信号处理器上的求解时间处于微秒至数十微秒量级 [19], 远小于所取更新周期, 故优化求解不构成实时性瓶颈. 仿真设置中本地控制周期T_c与上层更新周期T_s分别为 0.2 ms 和 2 ms.

表 1 主要仿真参数

项目	参数及取值
直流母线	$V_{\mathrm{ref}} = 270$ V, $[V_{\min}, V_{\max}] = [250, 290]$ V
	$C_{\mathrm{dc}} = 20$ mF
燃料电池支路	额定5.5 kW, $I_{\mathrm{fc,max}} = 55$ A, $\lambda_{\mathrm{O_2,min}} = 2.0$
	爬坡率$+4/-5$ kW/s
电池支路	± 4 kW, 20 Ah, SOC$\in [0.20, 0.90]$
	$T_{\max} = 323.15$ K
超级电容支路	± 5 kW, $C_{\mathrm{sc}} = 20$ F, $V_{\mathrm{sc}} \in [70, 115]$ V
	$I_{\mathrm{sc,max}} = 60$ A, $V_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{ref}} = 100$ V
误差界	$[\bar{\varepsilon}_{\mathrm{fc}}, \bar{\varepsilon}_{\mathrm{bat}}, \bar{\varepsilon}_{\mathrm{sc}}] = [75, 75, 100]$ W
	$[\bar{e}_{P,\mathrm{fc}}, \bar{e}_{P,\mathrm{bat}}, \bar{e}_{P,\mathrm{sc}}] = [450, 350, 300]$ W
	$\bar{e}_L = 100$ W

为验证所提方法在正常运行、单一电源能力退化以及系统聚合供能能力不足等情况下的控制性能, 设置以下 6 种典型工况: A) 标称负载阶跃; B) 燃料电池缺氧; C) 电池接近 SOC/温度安全边界; D) 超级电容接近电压下限; E) 聚合安全供能能力不足; F) 存在负载估计误差; G) 深度多源退化.

5.2 标称工况下的多源协同功率分配

工况 A 中, 负载功率依次由 4 kW 增至 7 kW($t = 0.8$ s), 随后在$t = 1.8$ s 降至 4.5 kW. 由图 2(a) 可以看出, 在未预先规定固定功率分配比例的情况下, 所提方法能够根据各电源的动态响应特性形成协调的功率分担. 负载突增初期, 超级电容快速提供暂态功率支撑; 随后电池承担主要的中间过程功率, 燃料电池则按照其爬坡能力逐渐增加输出. 随着系统进入稳态, 电池和超级电容的输出功率逐步回落至零, 最终由燃料电池承担约 4.49 kW 的稳态负载功率. 如图 2(b) 所示, 整个负载变化过程中母线电压始终保持在安全范围 $[250, 290]$ V 内, 实际变化范围为 261.0～274.5 V, 表明所提功率分配策略能够在协调不同动态特性电源的同时维持母线电压稳定. 三个支路的最大功率跟踪误差分别为 39、211 和 209 W, 均未超过按燃料电池、电池和超级电容顺序给出的误差界 $[\bar{e}_{P,\mathrm{fc}}, \bar{e}_{P,\mathrm{bat}}, \bar{e}_{P,\mathrm{sc}}] = [450, 350, 330]$ W, 说明第 3 节中用于安全功率区间投影的功率跟踪误差界能够覆盖实际闭环跟踪误差.

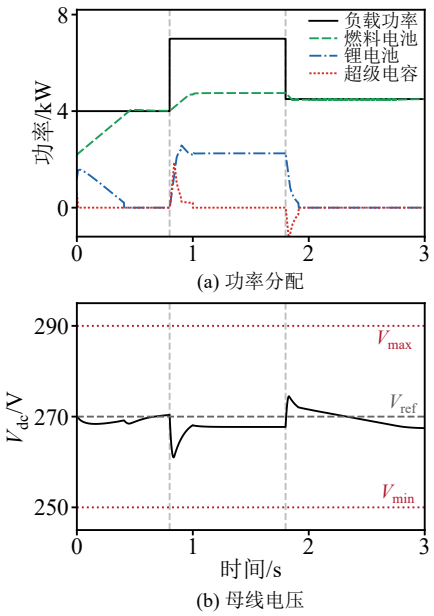

图 2 工况 A 下所提方法的功率分配与母线电压

5.3 源侧运行能力退化下的安全约束效果

1) 燃料电池缺氧 (工况 B): 负载在$t = 1.0$ s 由 4.5 kW 阶跃至 6.5 kW, 并在$t = 1.2 \sim 1.5$ s 期间将空气过量系数指令由 2.8 降低至 2.1, 以模拟燃料电池供氧能力下降. 随着氧气供给能力减弱, 燃料电池对应的安全功率区间随运行状态动态收缩, 如图 3 所示. 在氧过量系数 CBF 约束作用下, 燃料电池输出功率被限制在约 3.35 kW 以内, 其无法承担的负载功率主要由电池补偿, 电池输出功率约为 2.90 kW, 超级电容仅在负载突变初期提供短时快速功率支撑. 整个过程中, 氧过量系数始终满足$\lambda_{\mathrm{O_2}} \geqslant \lambda_{\mathrm{O_2,min}} = 2.0$, 其最小值为 2.047; 与此同时, 母线电压最低为 263.6 V. 结果表明, 当燃料电池安全供能能力因缺氧

而下降时, 所提方法能够及时收缩其可分配功率范围, 并将功率需求重新分配至其他支路, 从而避免燃料电池越过氧安全边界.

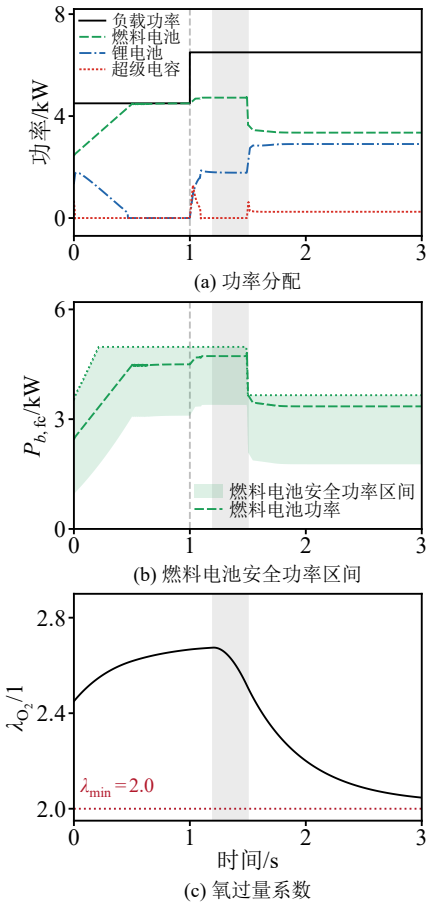

图 3　工况 B 下的功率分配、FC 安全包络与氧过量系数

2) 电池接近 SOC 和温度安全边界 (工况 C): 设置电池初始 SOC 为 0.225、初始温度为 322.8 K, 环境温度为 320 K, 并在$t = 0.8$ s 将负载由 4 kW 增至 6.5 kW. 由于电池初始状态已经接近 SOC 下限和温度上限, 其允许放电功率由额定 4 kW 逐渐收缩至约 2.25 kW, 如图 4 所示. 所提方法根据实时安全功率区间限制电池输出, 使其在接近当前允许放电功率上限的条件下运行, 最小功率裕量为 88 W, 且全过程未发生安全约束越界. 电池受限后产生的功率缺额主要由燃料电池承担, 超级电容则仅提供负载突变期间的快速功率支撑, 并在暂态结束后退出功率分担. 仿真期间 SOC 始终高于 0.20, 最低值为 0.224 4; 电池温度始终未超过$T_{\max} = 323.15$ K.

3) 超级电容接近电压下限 (工况 D): 将超级电容初始端电压设置为 72 V, 使其运行状态接近 70 V 的安全下限. 此时, 受端电压安全约束限制, 超级电容的可用放电功率明显减小. 在$t = 0.8 \sim 1.3$ s 施加 6.5 kW 负载脉冲期间, 所提方法能够识别超级电容放电能力的下降, 并相应减小其功率分配量, 将

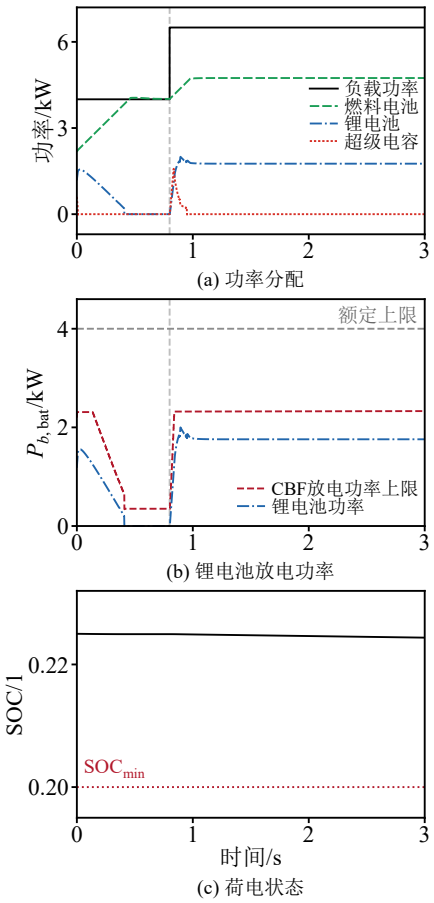

图 4　工况 C 下的功率分配、放电功率上限与 SOC

主要暂态功率需求转移至电池, 如图 5 所示. 在整个过程中, 超级电容输出始终保持在动态安全功率区间内, 其端电压最低为 71.93 V, 未越过 70 V 的安全下限. 负载脉冲结束后, 电池和超级电容输出功率均逐步恢复至 0 W, 稳态负载重新由燃料电池承担, 其输出功率约为 3.50 kW. 结果说明, 所提方法能够根据超级电容端电压实时调整其可用功率范围, 避免在能量储备不足时继续对其施加过大的放电功率指令.

5.4　聚合安全供能能力不足下的自主减额

工况 E 用于进一步验证多个电源同时接近安全边界时的系统级功率协调能力. 设置燃料电池氧过量系数$\lambda_{O_2} = 2.2$、电池 SOC 为 0.23、温度为 322.5 K、超级电容端电压为 74 V, 并在$t = 1.0$ s 将负载由 3.5 kW 突增至 9.5 kW, 如图 6 所示. 该工况采用聚合减额模型, 用于考察连续可削减功率对供需平衡的作用, 不涉及具体离散负载的分级投切. 由于多个支路的安全供能能力同时受到限制, 负载突增后系统聚合正向功率裕量R^{+}_{sys}最低降至 −3.87 kW, 表明该时刻各支路安全供能能力之和暂时不足以满足负载功率需求. 对此, 决策器自动启用减额变量ℓ, 其峰值约为 2.4 kW, 在暂态阶段短时降低实际供电需求,

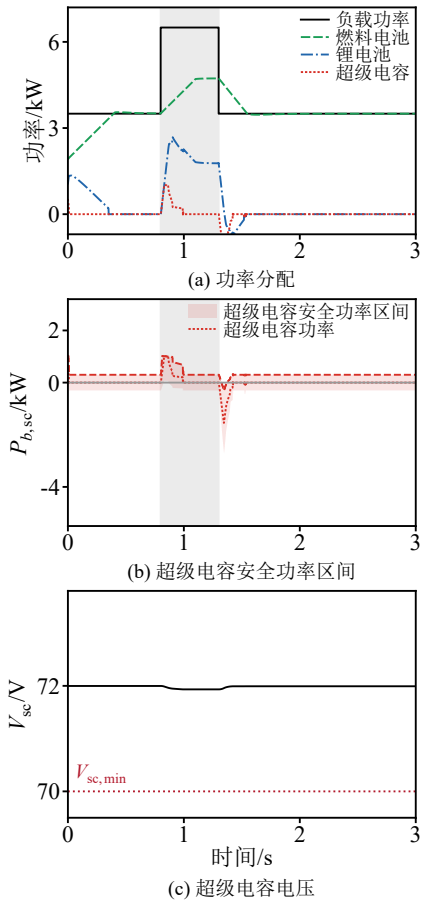

图 5 工况 D 下的功率分配、SC 安全包络与端电压

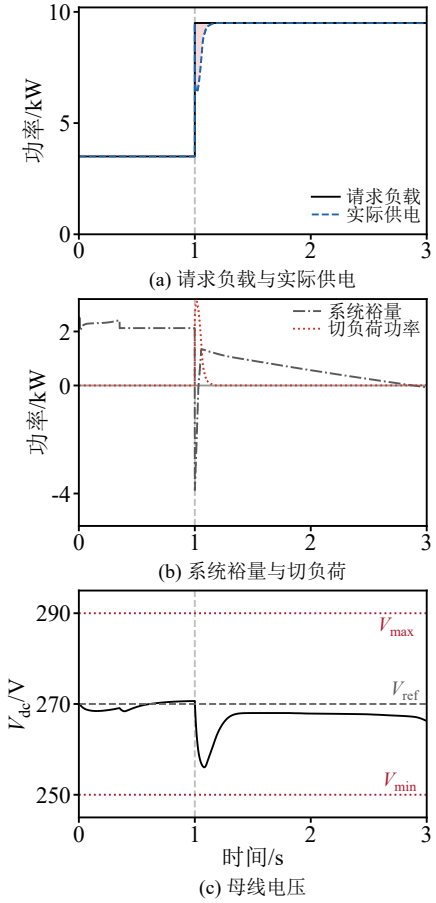

图 6 工况 E 下的请求/实际供电、系统裕量与母线电压

并在约 0.15 s 后恢复至全额供电. 整个过程中累计切负荷能量为 188 J, 随后 9.5 kW 负载得到完整供电. 此过程中母线 CLF 松弛量δ_b的变化曲线如图 7 所示, 仅在负载突变时出现短时脉冲, 稳态阶段迅速恢复至接近零, 说明正常运行期间电压调节目标与各项安全约束基本兼容.

尽管系统短时存在聚合功率不足, 母线电压仍始终保持在$[250, 290]$ V 安全范围内, 最低值为 256.0 V; 同时未触发硬不可行判定, 所有源侧 CBF 和变换器 CBF 约束均得到满足. 上述结果说明, 聚合安全功率裕量能够直接反映当前安全供能能力与负载需求之间的功率缺口, 并为功率减额决策提供量化依据.

5.5 负载估计误差下的鲁棒性

工况 F 在$t = 0.5$ s 的 5 kW→7 kW 阶跃期间注入负载估计误差$e_L = 80\sin(2\pi \cdot 7t) + 20\sin(2\pi \cdot 19t)$ W, 且满足$|e_L| \leqslant \bar{e}_L = 100$ W, 如图 8 所示. 在周期性负载估计误差持续存在的情况下, 鲁棒母线 CBF 仍能够有效约束母线电压. 整个仿真过程中母线电压始终处于$[250, 290]$ V 安全范围内, 且相对于 270 V 参考值的最大偏差约为 5 V. 结果表明, 在给定负载估计误差界内, 所构造的鲁棒裕量能够有效

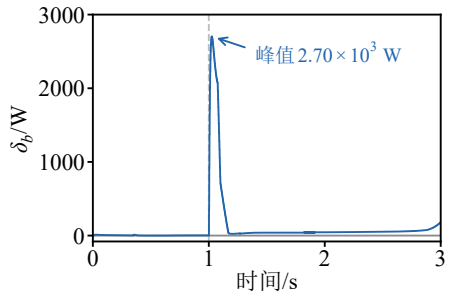

图 7 工况 E 下母线 CLF 松弛量δ_b的变化曲线

补偿负载估计误差对母线电压安全约束的影响.

5.6 动态安全功率区间的对比验证

前述工况按“所提方法贴近边界工作”设计, 退化程度尚不足以使传统策略真正越界. 为直观凸显动态安全功率区间的价值, 增设工况 G(深度多源退化): 初始 $\mathrm{SOC}_0 = 0.24$、$T_{bat,0} = 322.9$ K、$V_{sc,0} = 71.5$ V、$\lambda_{O2,0} = 2.30$; 负载在$t = 0.8$ s 由 4 kW 阶跃至 7.5 kW, 空气供应λ_{air}在$t = 1.0 \sim 1.3$ s 由 2.8 降至 2.05, 燃料电池可持续功率随之降至约 2 kW, 聚合安全能力 (约 4.5 kW) 显著低于负载需求. 为量化“对动态安全区间的背离程度”, 定义支路指令越限能量$\int \max(0, P_{i,\mathrm{ref}} - P_{i,\max})\mathrm{d}t$(下限侧对称), 其中$P_{i,\max}$为沿各方法自身状态轨迹按第 3 节接口重算

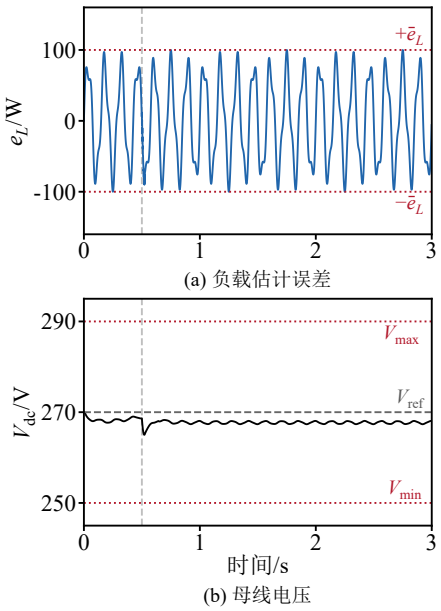

图 8　工况 F 下的估计误差轨迹与母线电压

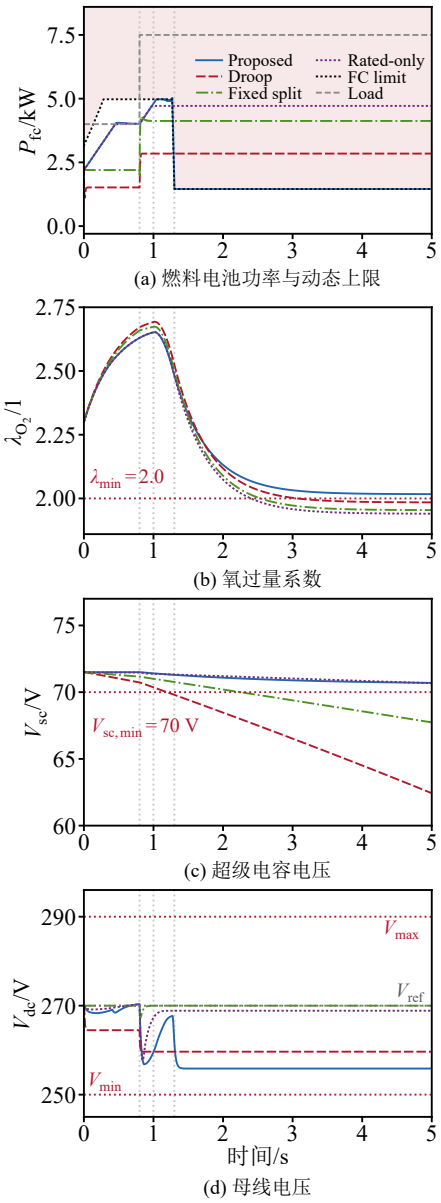

图 9　工况 G 下的所提方法与传统分配策略的对比

的动态安全上限.

仿真结果如图 9 所示. 所提方法将全部状态保持在安全界内 (λ_{O_2}最低 2.017、V_{sc}最低 70.70 V、母线最低 255.9 V); 其 FC 功率被动态上限精确压住, 指令越限能量仅 2.0 J. 三种对照均把指令伸入越限区: 额定消融、定比例与下垂的λ_{O_2}分别跌至 1.940、1.954、1.985(低于下限 2.0, 对应燃料电池缺氧), 下垂与定比例还使V_{sc}跌破 70 V(最低 62.4 V 与 67.7 V, 对应超级电容深度放电), 源越限时间分别达 5.74 s 与 5.21 s; 三者的指令越限能量高达 14.0～27.6 kJ.

6　结　论

本文面向直流微电网多源协同运行, 提出了安全裕量驱动的 CLF-CBF 自主功率决策方法. 主要结论如下: 1) 所提安全能力投影将异构电源约束统一映射为状态依赖的母线侧容许功率区间, 为多源协同提供了量纲一致、可实时计算的决策基础; 2) 集中式 CLF-CBF-QP 在保持源侧与母线 CBF 为硬约束的同时自主形成按响应速度分级的功率分配, CLF 仅在调节与安全冲突时软化; 3) 聚合安全功率裕量使控制器能自主识别能力不足, 并在不可行指令下发之前决策有界减额或切负荷; 4) 仿真表明, 所提方法在标称、源侧退化、能力不足与估计误差等 7 种工况下均保持全部安全约束, 稳态储能严格归零, 缺电暂态切负荷有界, 动态安全功率区间使越限从隐性设备损伤转化为可认证的减额决策.

参考文献 (References)

[1] 王灿, 刘恩博, 杨世海, 等. 基于预定时间博弈的直流微电网分布式二次调控[JL]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0216.
(Wang C, Liu E B, Yang S H, et al. Prescribed-time game-based distributed secondary control for DC microgrids[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0216.)

[2] 沈佳俊, 杨溟, 陈英豪, 等. 基于物理约束梯度引导的微电网能量调度安全强化学习策略[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1231.
(Shen J J, Yang H, Chen Y H, et al. Physics-constrained and gradient-guided reinforcement learning for secure energy dispatch in microgrids[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1231.)

[3] 吴煜轩, 王睿, 郭宇涵, 等. 直流微电网内多源协同变换器信息-能量复合调制的 Goertzel 高效解调技术[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0036.].
(Wu Y X, Wang R, Guo Y H, et al. Goertzel-based efficient demodulation technology for cyber-energy dual modulation in multi-source coordinated converters within DCmicrogrids[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2026.0036.00360216.)

[4] Liu X K, Wang S Q, Chi M, et al. Resilient secondary control and stability analysis for DC microgrids under mixed cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(2): 1938-1947.

[5] Song Q C, Chen J W, Chen J, et al. Completely decentralized energy management system for fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(1): 438-449.

[6] Liu S, Guo F H, Wu X, et al. A distributed secure and robust power management framework for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 9248-9263.

[7] Song Q C, Loo K H, Liu J W, et al. An enhanced droop controller for accurate transient and static current sharing and power quality improvement in DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 13(5): 6611-6623.

[8] Xiao J J, Li P Q, Mao Z Y, et al. Hierarchical coordinated control strategy for enhanced performance of energy storage system in secondary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(3): 1874-1888.

[9] Yuan Q F, Wang Y W, Liu X K, et al. Game-based secondary control for DC microgrids with Nash equilibrium[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(3): 2179-2190.

[10] Huang Y, Liu G P, Yu Y, et al. Data-driven distributed predictive control for voltage regulation and current sharing in DC microgrids with communication constraints[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(9): 4998-5011.

[11] Ao W J, Chen J W, Chen P W, et al. Large-signal stabilization of on-board hybrid power supply systems supplying constant power load based on composite control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026. DOI:10.1109/TIE.2026.3692833.

[12] Jiang W T, Wang Z S, Li X K, et al. Large-signal stabilization of interleaved multilevel boost converter interfaced high-power DC microgrid using an adaptive observer-based nonlinear control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8242-8253.

[13] 刘建刚, 杨胜杰, 谢小良, 等. 并联 DC-DC 变换器系统的固定时间分布式协同控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2912-2918.
(Liu J G, Yang S J, Xie X L, et al. Fixed-time based distributed cooperative control for parallel DC-DC converter systems[J]. Control and Decision, 2023, 38(10): 2912-2918.)

[14] Ames A D, Xu X R, Grizzle J W, et al. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(8): 3861-3876.

[15] Kosaraju K C, Sivaranjani S, Gupta V. Safety during transient response in direct current microgrids using control barrier functions[J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 6: 337-342.

[16] Lang J L, Yang T, Jin H R, et al. Safety-certified secondary control for transient state constraint in autonomous DC microgrids *via* proximal-reserve control barrier functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2026, 22(6): 5576-5587.

[17] Liu Q, Zhao C C, Luo X Y, et al. Resilient distributed control for ensuring safety and stability in DC microgrids against false data injection attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(6): 5486-5499.

[18] Tang Z Y, Li D J, Xiang Y, et al. Distributed safe frequency control for networked microgrids using control barrier functions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2026, 17(4): 3621-3624.

[19] Stellato B, Banjac G, Goulart P, et al. OSQP: An operator splitting solver for quadratic programs[J]. Mathematical Programming Computation, 2020, 12(4): 637-672.

作者简介

敖文杰 (1996−), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为直流微网功率控制技术, E-mail: wenjie.ao@cqu.edu.cn;

陈家伟 (1986−), 男, 教授, 博士, 博士/硕士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统先进控制技术, E-mail: echenjw@cqu.edu.cn;

王浩 (1990−), 男, 博士研究生, 主要研究方向为混合供电系统先进控制技术, E-mail: 20221301026g@stu.cqu.edu.cn;

贾启彤 (1998−), 女, 博士研究生, 主要研究方向为直流微网先进控制技术, E-mail: 202513157788@stu.cqu.edu.cn.