

面向配电网负荷主动平衡的超快充电研究与设计

刘彤¹, 姜伟², 吴蔚¹, 谢慧勤¹, 王晓涵¹

1. 国网武汉供电公司营销运营中心, 湖北 武汉 430000

2. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461100

DOI:10.61369/EPTSM.2026010010

摘 要 : 【目的】针对超快充电设施大规模接入配电网后引发的负荷快速波动、调控协同不足及调控精度偏低等问题, 提出一种面向配电网负荷主动平衡的超快充电设施柔性调控系统。【方法】构建“多源采集-动态预测-柔性决策-脉冲分配-实时执行-闭环优化”的六模块调控体系, 引入自适应周期-LSTM (Long Short-Term Memory) 融合的动态负荷预测方法, 构建兼顾配电网安全与充电效率的多目标优化模型, 并采用粒子群优化 (PSO) 求解最优总调控功率, 进一步设计基于 SOC-负荷协同策略的脉冲功率分配算法和闭环反馈修正机制。【结果】通过对系统架构及关键模块的设计与机理分析, 表明所提出方法能够在结构上实现配电网层面的负荷主动平衡与站端超快充电设施的柔性协同调控。【结论】所提出柔性调控系统方案能够为超快充电设施大规模接入场景下的配电网-充电设施一体化调控提供可工程实现的设计思路和技术框架, 有效兼顾配电网安全运行、电动汽车补能效率和电池安全, 具有良好的工程应用前景。

关 键 词 : 超快充电设施; 配电网负荷平衡; 柔性调控; 动态负荷预测; 脉冲功率分配; 闭环反馈

Research and Design of Ultra-Fast Charging for Active Load Balance in Distribution Networks

Liu Tong¹, Jiang Wei², Wu Wei¹, Xie Huiqin¹, Wang Xiaohan¹

1. Marketing and Operation Center of State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

2. Henan Xuji Instrument Co., LTD., Xuchang, Henan 461100

Abstract : [Objective] Aiming at the problems such as rapid load fluctuations, insufficient regulation coordination and low regulation accuracy caused by the large-scale integration of ultra-fast charging facilities into the distribution network, a flexible regulation system for ultra-fast charging facilities oriented to active load balance in the distribution network is proposed. [Method] A six-module regulation system of "multi-source acquisition - dynamic prediction - flexible decision-making - pulse distribution - real-time execution - closed-loop optimization" was constructed. A dynamic load forecasting method integrating adaptive period and LSTM (Long Short-Term Memory) was introduced to build a multi-objective optimization model that takes into account both the safety of the distribution network and the charging efficiency. The particle swarm optimization (PSO) is adopted to solve the optimal total regulation power, and a pulse power allocation algorithm and closed-loop feedback correction mechanism based on the SOC-load cooperative strategy are further designed. [Result] Through the design and mechanism analysis of the system architecture and key modules, it is indicated that the proposed method can achieve active load balance at the distribution network level and flexible coordinated regulation of ultra-fast charging facilities at the station end in terms of structure. [Conclusion] The proposed flexible control system scheme can provide an engineering-feasible design concept and technical framework for the integrated control of distribution networks and charging facilities in the scenario of large-scale access to ultra-fast charging facilities. It effectively takes into account the safe operation of distribution networks, the energy replenishment efficiency of electric vehicles, and battery safety, and has a good engineering application prospect.

Keywords : ultra-fast charging facilities; load balance of the distribution network; flexible regulation; dynamic load forecasting; pulse power distribution; closed-loop feedback

引言

随着电动汽车保有量的快速增长，超快充电技术凭借高功率、短时补能的优势，正成为新一代充电基础设施发展的重要方向^[1]。在城市负荷密集区域，大功率超快充电设施集中、随机接入配电网，将显著改变配电网的负荷特性：一方面易诱发节点电压波动及线路瞬时过载，威胁配电网安全稳定运行；另一方面，充电站运营方和用户又期望在保证电池安全前提下实现尽可能高的充电效率和更短的补能时间^[2]。这种“电网安全约束”与“高效补能需求”的双重目标，使配电网与超快充电设施之间的协同调控问题愈发突出。

目前，配电网调控技术在工程实践中已较为成熟，主要通过监测节点电压、线路有功功率等运行状态，结合负荷分配与功率调节手段维持系统安全边界。然而该类系统通常依赖固定时间尺度的负荷预测和调度周期，难以精细捕捉超快充电设施接入后出现的亚秒级至分钟级的负荷尖峰和快速波动^[3]。与之对应，超快充电设施控制技术多聚焦于提升单位时间内充电量、缩短充电时间，例如采用优化的充电曲线、主动温控策略等，但通常以充电桩自身效率为首要目标，缺乏对上层配电网负荷平衡与约束条件的充分考虑，容易在用电高峰或集中充电场景下造成局部线路过载或显著负荷波动。

此外，现有配电网 - 充电设施协同控制架构中，实时闭环反馈机制尚不完善^[4]。一方面，负荷预测模型多基于离线训练及固定参数，难以随运行状态的变化自适应调整；另一方面，调控决策模块缺乏对实际执行偏差和预测误差的动态回溯与修正，导致调控精度不足、鲁棒性有限，当超快充电设施大规模接入时难以满足高可靠性的调控需求。

针对上述问题，本文从“配电网 - 超快充电设施一体化协同调控”的视角出发，设计了一种面向配电网负荷主动平衡的超快充电设施柔性调控系统。该系统的主要创新与贡献如下：

（1）提出“多源采集 - 动态预测 - 柔性决策 - 脉冲分配 - 实时执行 - 闭环优化”六模块协同的系统架构，实现配电网运行状态与超快充电设施充电过程的紧密耦合与统一调控；

（2）构建基于负荷波动系数的自适应预测周期调整机制，并引入 LSTM 深度学习模型实现多源融合的动态负荷预测，显著提升预测精度与对快速波动的响应能力；

（3）建立兼顾配电网负荷波动成本与超快充电效率的多目标优化模型，设计动态权重配置策略，并采用粒子群优化算法求解最优总调控功率，实现安全与效率的权衡；

（4）提出 SOC - 负荷协同的脉冲功率分配策略与错峰脉冲调度机制，在满足总功率约束及电池安全的前提下，实现多台超快充电设施间的灵活功率分配与脉冲时序优化；

（5）设计以负荷预测误差和功率执行偏差为驱动的闭环反馈优化机制，对 LSTM 模型参数与多目标优化权重进行在线修正，提升系统在复杂工况下的调控精度与鲁棒性。

一、面向配电网负荷主动平衡的柔性调控系统总体设计

面向配电网负荷主动平衡的超快充电设施柔性调控系统由六个核心功能模块构成：多源数据采集模块、动态负荷预测模块、柔性调控决策模块、脉冲功率分配模块、实时执行控制模块和闭环反馈优化模块。六个模块形成从数据感知到控制执行再到参数修正的闭环控制链路，其总体信息流向如下：

（1）多源数据采集模块：同步获取配电网运行状态与超快充电设施运行参数，经预处理后形成标准化数据矩阵；

（2）动态负荷预测模块：根据负荷波动特性自适应调整预测周期，利用 LSTM 模型输出未来短时段的负荷预测序列；

（3）柔性调控决策模块：以预测负荷为输入，构建配电网 - 超快充电一体化多目标优化模型，通过 PSO 求解得到下一调控周期内的最优总调控功率；

（4）脉冲功率分配模块：基于各设施 SOC 状态及总调控功率，计算各设施功率分配量，生成错峰脉冲参数指令集；

（5）实时执行控制模块：根据脉冲指令集通过 DSP 产生 PWM

信号，驱动电力电子变流器精确输出脉冲功率，并监测输出偏差；

（6）闭环反馈优化模块：实时对比预测与实际运行数据，计算误差并对预测模型和优化权重进行在线修正，提高系统长期运行精度。

该架构实现了从“感知 - 预测 - 决策 - 执行 - 修正”的闭环调控流程，有利于在超快充电设施随机接入与负荷剧烈波动条件下实现配电网负荷的主动平衡与超快充电设施运行的柔性协同。

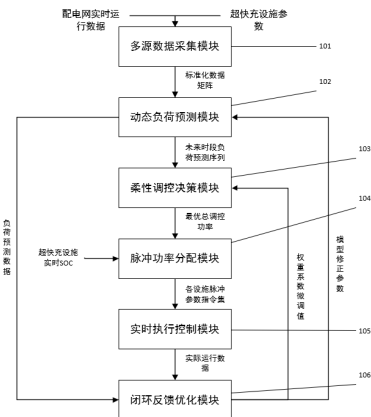


图1 柔性调控系统框图

二、面向配电网负荷主动平衡的柔性调控系统设计

(一) 多源数据采集模块设计

多源数据采集模块主要负责配电网运行状态量与超快充设施关键参数的同步采集和预处理,包括配电网数据采集子单元与设施参数采集子单元两部分。

1. 配电网数据采集子单元

该子单元实时采集配电网主要运行参数,包括节点电压 $U_i(t)$ 、线路有功功率 $P_{\text{line}}(t)$ 、无功功率 $Q_{\text{line}}(t)$ 及负荷波动量 $\Delta P(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{load}}(t - \Delta t)$, 采样频率设定为 50Hz-2kHz, 采集到的时序量测数据首先进行异常值剔除, 随后通过卡尔曼滤波进行噪声抑制, 得到平滑可靠的时间序列。

2. 设施参数采集子单元

设施参数采集子单元面向每台超快充设施, 采集并上传当前荷电状态 $\text{SOC}_i(t)$ 、电池温度 $T_i(t)$ 、额定充电功率 $P_{i,\text{rated}}$ 及脉冲充电周期 $T_{p,i}$, 上述数据与配电网运行数据在时间轴上进行同步对齐, 经标准化处理后构成多源融合特征矩阵, 为后续负荷预测与调控决策提供统一的数据基础。

(二) 动态负荷预测模块设计

动态负荷预测模块基于多源采集的数据, 综合考虑配电网负荷波动特性与超快充设施接入行为, 在自适应预测周期基础上采用 LSTM 模型进行短期负荷预测。

1. 自适应预测周期调整

为提升对快速负荷波动的响应能力, 引入负荷波动系数 α 动态调整预测周期 ΔT 。波动系数可表示为:

$$\alpha = \frac{|\Delta P(t) - \Delta P(t-1)|}{\Delta P(t-1)} \quad (1)$$

其中, $\Delta P(t)$ 为 t 时刻负荷波动量, $\Delta P(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻负荷波动量; 根据 ΔT 的大小, 将预测周期设定为分段自适应形式:

$$\Delta T = \begin{cases} 15 \text{ min}, & \alpha \leq 5\% \\ 5 \text{ min}, & 5\% \leq \alpha < 15\% \\ 1 \text{ min}, & \alpha \geq 15\% \end{cases} \quad (2)$$

2. LSTM 负荷预测模型

在确定预测周期 ΔT 后, 构建基于 LSTM 的多源负荷预测模型^[5]。设标准化后的历史负荷与设施状态数据为:

$$\mathbf{X}(t) = [P_{\text{load}}(t), U_i(t), Q_{\text{line}}(t), \text{SOC}_i(t), T_i(t), \dots] \quad (3)$$

将长度为 L 的时间窗口内的多维特征序列作为 LSTM 输入, 模型通过门控结构捕捉负荷演化与充电行为之间的非线性时序关系, 输出未来 ΔT 个时刻内的配电网负荷预测序列:

$$P_{\text{pred}}(t+1), P_{\text{pred}}(t+2), \dots, P_{\text{pred}}(t+\Delta T) \quad (4)$$

模型离线阶段通过历史运行数据训练, 在线阶段配合闭环反馈模块进行参数增量更新, 以适应工况变化。

(三) 柔性调控决策模块设计

柔性调控决策模块以动态负荷预测结果为基础, 综合配电网安全约束与超快充效率需求, 构建多目标优化模型, 并采用粒子

群优化算法^[6]求解得到最优总调控功率 P_{opt} 。

1. 多目标优化模型

为同时降低配电网负荷波动和兼顾超快充效率, 构建如下多目标优化函数:

$$\min F = \omega C_1 + \lambda C_2 \quad (5)$$

$$C_1 = \sum |\Delta P_{\text{pred}}(t)|^2 \quad (6)$$

$$C_2 = \sum \frac{(1 - \text{SOC}_i(t))}{P_i(t)} \quad (7)$$

其中, C_1 为配电网负荷波动成本, C_2 为超快充效率相关成本; ω 、 λ 为动态权重系数, 满足 $\omega + \lambda = 1$ 。

考虑系统平均 SOC 水平变化对“效率优先”与“安全优先”权衡的影响, 引入平均 SOC, 当平均 SOC 较低时, 优先提升充电效率; 当平均 SOC 较高时, 适度提高配电网安全与电池温升约束权重。

$$\text{SOC}_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{SOC}_i \quad (8)$$

$$\omega = 0.3 + 0.7(1 - \text{SOC}_{\text{avg}}) \quad (9)$$

$$\lambda = 0.7 - 0.7(1 - \text{SOC}_{\text{avg}}) \quad (10)$$

其中, SOC_{avg} 为平均 SOC。

2. 约束条件与 PSO 求解

优化问题需满足下列约束条件:

(1) 配电网线路容量约束:

$$P_{\text{load}}(t) + P_{\text{chg}}(t) \leq P_{\text{line,max}} \quad (11)$$

其中 $P_{\text{chg}}(t)$ 为超快充设施在时刻 t 的总充电功率。

(2) 单台超快充设施功率约束:

$$0 \leq P_i(t) \leq P_{i,\text{rated}} \quad (12)$$

(3) 电池温度约束:

$$T_i(t) \leq T_{\text{max}} \quad (13)$$

在上述约束下, 将最优总调控功率 P_{opt} 视作粒子群优化算法的决策变量。PSO 通过迭代更新粒子位置与速度, 在可行域内搜索 $\min F$ 的解。该功率值将作为下一模块脉冲功率分配的总功率约束。

(四) 脉冲功率分配模块设计

脉冲功率分配模块在已知总调控功率前提下, 根据各设施 SOC 状态与电池温度等信息, 以 SOC - 负荷协同策略分配功率并生成脉冲参数指令集。

1. 功率分配计算

根据柔性调控决策模块输出的最优总调控功率 P_{opt} , 结合各超快充设施的荷电状态 SOC_i , 计算分配系数:

$$k_i = \frac{\text{SOC}_i}{\sum \text{SOC}_i} \quad (14)$$

则第 i 台设施的初始分配功率为:

$$P_i = k_i P_{\text{opt}} \quad (15)$$

2. 脉冲参数生成与错峰调度

基于分配功率 P_i 与设施的额定电压 U_{rated} ，可确定对应的脉冲幅值 I_i 与占空比 D_i 。脉冲电流幅值可由平均功率关系确定：

$$P_i = D_i U_{\text{rated}} I_i \quad (16)$$

结合 SOC 分段策略对占空比与幅值进行调整。

(1) 当 $\text{SOC}_i \leq 30\%$ 时，采用较大占空比 $D_i = 0.8$ ，以提升充电效率；

(2) 当 $30\% \leq \text{SOC}_i \leq 80\%$ 时，降低占空比，

$$D_i = 0.5 + \frac{0.3(\text{SOC}_i - 30\%)}{50\%};$$

(3) 当 $\text{SOC}_i > 80\%$ 时，采用保守策略，如 $D_i = 0.5$ 且将幅值 I_i 线性降至 $0.5I_{\text{rated}}$ ，以控制温升。

生成包含脉冲周期、高电平时长 t_{on} 、低电平时长 t_{off} 及幅值调整曲线的指令集，为减少多台设施在同一时刻的功率峰值叠加，需对各设施高电平时段进行错峰安排，保证在一个脉冲周期内各高电平时段尽量无重叠。

(五) 实时执行控制模块设计

实时执行控制模块负责将脉冲参数指令集转化为具体的 PWM 控制信号，并驱动电力电子变流器实现精确功率输出。

1. 控制信号生成

该子单元通过数字信号处理器 (DSP) 接收脉冲参数指令集，按照各设施的脉冲周期、占空比及幅值要求生成多路 PWM 控制信号。PWM 信号经隔离与驱动电路作用于功率器件，实现所需的脉冲电流/电压输出。

2. 功率输出调节

在执行过程中，实时采集各设施输出电压、电流信号，计算实际输出功率 P_{actual} ，并与指令功率 P_i 进行对比。如果偏差超过设定阈值，则通过 PID 控制器动态修正 PWM 占空比，实现功率输出的闭环调整。

(六) 闭环反馈模块设计

闭环反馈优化模块基于预测数据与实际运行数据的对比，持续优化预测模型与多目标优化权重，提升长期调控性能。

1. 误差计算与分析

在每个反馈周期，采集实际总功率 P_{actual} 并与预测总功率 P_{pred} 对比，计算负荷预测误差：

$$\epsilon = \frac{|P_{\text{pred}} - P_{\text{actual}}|}{P_{\text{actual}}} \quad (17)$$

当 ϵ 超出预设阈值时，触发相应参数修正策略。

2. 参数修正策略

当 $\epsilon > 10\%$ 时，主要认为预测模型的结构性偏差较大，将误差反馈至 LSTM 模型，对其权重矩阵进行在线更新或增量训练，改善模型对新工况的适应性；

当 $\epsilon \leq 10\%$ 时，认为负荷预测大致合理，但权重分配可能不匹配运行状态，此时对柔性调控决策模块中的权重系数 ω 和 λ 进行小幅微调，使得系统在后续调控中更好地平衡安全与效率。

$$\Delta\omega = 0.1 \cdot \epsilon \cdot \text{sign}(\text{SOC}_{\text{avg}} - 0.5) \quad (18)$$

通过上述“预测 - 执行 - 反馈 - 修正”的闭环机制，可持续提升系统在多变工况下的整体调控精度与鲁棒性。

三、结论

本文针对超快充设施大规模接入场景下配电网负荷波动剧烈、调控协同不足和控制精度有限等问题，提出了一种面向配电网负荷主动平衡的超快充设施柔性调控系统设计方案。主要工作与结论如下：

(1) 构建了“多源采集 - 动态预测 - 柔性决策 - 脉冲分配 - 实时执行 - 闭环优化”的六模块协同架构，从系统设计层面实现了配电网层面负荷主动平衡与站端超快充设施的统一调控，为避免线路过载与降低负荷快速波动提供了完整的功能链路。

(2) 提出基于负荷波动系数的自适应预测周期算法，并结合 LSTM 模型实现多源短期负荷预测，从机制上增强了对快速波动工况的响应与适应能力，为后续的精细化调度提供了更为可靠的负荷先验信息。

(3) 构建兼顾配电网负荷波动成本与超快充效率的多目标优化模型，引入基于平均 SOC 的动态权重配置策略，并采用 PSO 算法求解最优总调控功率；在此基础上，设计了 SOC - 负荷协同的脉冲功率分配策略与错峰脉冲调度机制，在系统架构层面实现了安全运行与充电效率之间的平衡。

(4) 从执行与反馈两个层面，设计了基于 DSP - PWM 的实时执行控制模块以及以负荷预测误差和功率执行偏差为驱动的闭环反馈优化模块，使得所提出系统能够在长期运行中自动修正预测模型与权重参数，提高调控策略的鲁棒性和适应性。

本文工作从系统设计与机理分析角度，给出了面向配电网负荷主动平衡的超快充设施柔性调控系统的一套可工程实现的总体方案。

参考文献

- [1] 黄雪琪, 何博, 袁新枚, 等. 中国超快充电站全生命周期经济性分析 [J]. 电力建设, 2018, 39(06): 15-20.
- [2] 徐艳春, 李思佳, 张涛, 等. 计及电力系统承受能力的含超快充电动汽车并网运行风险评估 [J]. 电网技术, 2025, 49(01): 187-197.
- [3] 申晨, 刘文旭, 邢益嘉. 基于多源多路径配电网调控运行的技术和策略 [J]. 电力设备管理, 2024, (15): 250-252.
- [4] 王子豪, 王如强, 张亚宁, 等. 基于反馈控制求解随机动态过程实时优化问题与应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2025, 52(05): 669-679.
- [5] 王庆康, 周冉冉, 王永. 基于 LSTM 的逻辑综合阶段延时预测方法 [J/OL]. 山东大学学报 (工学版), 1-9[2025-11-20].
- [6] 陈文涛, 田世东, 许广林, 等. 一种基于 PSO 算法的实时微电网能量管理策略 [J]. 工业控制计算机, 2025, 38(09): 14-16.