

摘要

在双碳目标与新型电力系统建设背景下，分布式光伏接入规模持续扩大，但其随机波动性与负荷侧不确定性叠加后，容易造成局部配电网功率失衡、电压越限、设备频繁启停以及能源利用率下降。为提升光储系统在并网与离网场景下的安全性、稳定性与经济性，本文基于西门子 S7-1511 PLC，设计并实现了一套光伏储能一体化控制系统。系统以功率平衡+安全约束+联锁保护为核心思想，构建了涵盖主电路配置、PLC I/O 映射、模拟量采集与标定、功率协调策略、并离网联锁、故障诊断与 HMI 可视化的人机协同控制架构。软件层采用 TIA Portal 平台实现模块化编程，主程序负责状态机、启停联锁、充放电模式判定与报警管理，功能块负责模拟量工程化处理与给定输出映射。针对典型工况开展仿真分析，结果表明：系统可在光伏出力波动与负荷变化条件下稳定完成储能充放电切换，并通过 SOC 边界控制、母线电压保护与故障闭锁机制保证运行安全。研究成果对中小型工商业光储系统、教学实训平台和工程化快速部署具有实际参考价值。

关键词：PLC；光伏储能；并离网控制；功率协调；SOC 约束；HMI

Abstract

Under the background of carbon peaking and carbon neutrality, distributed photovoltaic systems are being integrated at a fast pace. However, the stochastic nature of PV generation and the uncertainty of load demand often lead to power imbalance, voltage fluctuations, frequent switching operations, and reduced system efficiency. To address these challenges, this paper proposes and implements an integrated photovoltaic-energy storage control system based on Siemens S7-1511 PLC. The proposed scheme is built upon three core principles: power balance, safety constraints, and interlock protection. A complete architecture is established, including main circuit design, PLC I/O mapping, analog signal acquisition and scaling, power coordination strategy, grid/island interlocking, fault diagnosis, and HMI-based visualization. The software is developed in TIA Portal with modular programming. The main program handles state management, start-stop logic, charging/discharging mode decision, and alarm control, while functional blocks process analog engineering conversion and output setpoint mapping. Simulation under typical operating conditions demonstrates that the system can maintain stable charging/discharging transitions during PV and load fluctuations, while ensuring operational safety through SOC boundaries, DC bus protection, and fault latching logic. The proposed design provides practical value for industrial and commercial PV-storage applications, educational platforms, and fast engineering deployment.

Key Words: PLC; photovoltaic-energy storage integration; grid/island control; power coordination; SOC constraint; HMI

目录

摘要	1
Abstract	2
第 1 章 绪论	8
1.1 研究背景	8
1.1.1 双碳目标驱动下的分布式能源发展	8
1.1.2 光伏波动性对配电侧控制提出的新要求	8
1.1.3 PLC 在光储一体化控制中的优势	9
1.2 国内外研究现状	9
1.2.1 光储控制策略研究进展	9
1.2.2 PLC+HMI 架构在工程中的应用特点	9
1.2.3 现有研究的不足与改进空间	10
1.3 研究目标与主要内容	11
1.3.1 研究目标	11
1.3.2 研究内容	11
1.3.3 技术路线	11
1.4 论文结构安排	12
第 2 章 光伏储能一体化系统总体方案设计	14
2.1 系统功能需求分析	14
2.1.1 功率平衡需求	14
2.1.2 运行安全需求	14
2.1.3 运维管理需求	14
2.2 系统架构设计	14
2.2.1 能量流架构	14
2.2.2 控制流架构	14
2.2.3 通信与信号接口规划	15
2.3 运行模式与状态机设计	16
2.3.1 自动运行模式	16
2.3.2 手动运行模式	16

2.3.3 并网与离网状态切换	16
2.4 关键性能指标定义	16
2.4.1 功率协调指标	16
2.4.2 安全保护指标	16
2.4.3 运维友好指标	16
第3章 硬件系统设计	17
3.1 主电路设计	17
3.1.1 主电路拓扑结构	17
3.1.2 接触器选型与动作要求	17
3.1.3 主回路安全设计要点	17
3.2 PLC 控制硬件设计	18
3.2.1 控制器选型依据	18
3.2.2 模块配置与电源设计	18
3.2.3 抗干扰与布线规范	19
3.3 I/O 接口设计与点位分配	19
3.3.1 数字量输入设计	19
3.3.2 数字量输出设计	20
3.3.3 模拟量输入输出设计	20
3.4 传感与执行设备接口设计	21
3.4.1 功率与电压采样接口	21
3.4.2 SOC 信号接入与可信度评估	21
3.4.3 执行机构驱动与反馈闭环	21
3.5 传感器及硬件选型	22
3.5.1 选型原则与技术要求	22
3.5.2 关键传感器选型	22
3.5.3 关键执行硬件选型	23
3.5.3 安装与调试要点	24
第4章 控制策略设计	25
4.1 控制目标与约束条件	25

4.1.1	功率平衡目标函数	25
4.1.2	SOC 约束条件	25
4.1.3	电压与设备安全约束	25
4.2	模式判定与状态转移策略	26
4.2.1	充电优先模式判定	26
4.2.2	放电补偿模式判定	26
4.2.3	保持与保护模式判定	26
4.3	充放电功率给定计算策略	26
4.3.1	基础给定计算	26
4.3.2	上下限钳位策略	27
4.3.3	斜率限制与防抖动处理	27
4.4	逆变器限功率协同策略	27
4.4.1	逆变器限功率设定逻辑	27
4.4.2	与储能给定的协同关系	27
4.4.3	协同失配风险与处理	27
4.5	故障诊断与保护策略	27
4.5.1	延时判定与抗扰机制	27
4.5.2	故障复位策略	28
第 5 章	PLC 软件设计与实现	29
5.1	软件总体架构	29
5.1.1	程序组织结构	29
5.1.2	变量命名与地址规划	29
5.1.3	扫描周期与实时性分析	29
5.2	主程序逻辑实现	31
5.2.1	首次扫描初始化逻辑	31
5.2.2	启停自保持逻辑	31
5.2.3	模式选择与指示逻辑	31
5.3	自动控制核心网络实现	32
5.3.1	功率偏差中间量计算网络	32

5.3.2	充放电策略判定网络	32
5.3.3	功率限幅与输出网络	32
5.4	并离网联锁逻辑实现	34
5.4.1	并网接触器闭合条件	34
5.4.2	并网允许复位条件	34
5.4.3	并离网指示与状态同步	34
5.5	报警与故障处理实现	34
5.5.1	单项报警生成	34
5.5.2	总故障标志生成	35
5.5.3	声光报警与复位逻辑	35
5.6	模拟量处理功能块实现	36
5.6.1	输入采集与标定	36
5.6.2	输出映射与量程转换	36
5.6.3	数据有效性防护	36
第 6 章	HMI 监控系统设计	39
6.1	HMI 设计原则	39
6.1.1	可视化原则	39
6.1.2	可操作原则	39
6.1.3	可维护原则	39
6.2	根画面功能设计	39
6.2.1	系统控制区	39
6.2.2	系统状态区	39
6.2.3	参数设置区	39
6.3	输入模拟与输出监视设计	40
6.3.1	输入模拟功能	40
6.3.2	输出监视功能	40
6.3.3	趋势曲线与调试支持	40
6.4	报警管理与交互设计	41
6.4.1	报警显示策略	41

6.4.2 报警确认与复位流程	41
6.4.3 权限分级与安全防护	41
6.5 HMI 工程化优化建议	41
6.5.1 画面分层与导航优化	41
6.5.2 数据展示与交互细节优化	41
第 7 章 调试与测试	42
7.1 调试流程	42
7.2 典型工况测试	42
7.3 测试结果分析与工程结论	43
第 8 章 总结与展望	45
致谢	46
参考文献	47

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 双碳目标驱动下的分布式能源发展

随着我国碳达峰、碳中和战略持续推进，新能源占比不断提升，分布式光伏凭借建设周期短、并网灵活、靠近负荷中心等优势，已成为低压配电网中最主要的新能源形态之一。大量分布式电源接入虽有利于减少化石能源消耗，但也改变了传统源随荷动的单向供电模式，局部配电网逐步呈现源荷双随机特征。尤其在园区、工业厂房与公共建筑中，午间高辐照与生产用能不匹配，常出现白天富余、晚间不足的典型矛盾，导致新能源消纳率下降与峰谷差扩大。

1.1.2 光伏波动性对配电侧控制提出的新要求

光伏出力受辐照强度、云层遮挡、组件温度等因素影响，短时波动明显。若仅依赖逆变器自身控制功能，难以同时兼顾系统级功率平衡、储能寿命管理与多设备联锁保护。工程实践表明，缺乏统一协调层时，系统易出现以下问题：其一，储能频繁充放电切换，导致循环寿命下降；其二，母线电压在扰动工况下越限风险增加；其三，设备间时序不一致引发误动作与保护误触发；其四，运维人员无法快速定位故障来源，恢复时间延长。因此，必须构建可编程、可扩展、可维护的现场控制系统。

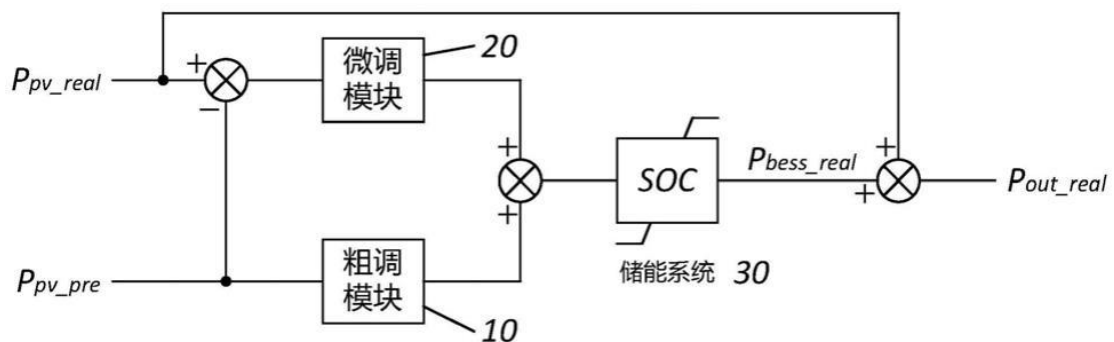


图 1-1 光伏储能系统的出力平滑系统及方法与流程

进一步从运行特性看，光伏与负荷在时间尺度上并不同步：光伏受天气和季节影响显著，而工业负荷往往呈现班次性、冲击性和周期性特征，二者叠加后会在分钟级和小时级形成多层波动。若控制系统缺少对不同时间尺度波动的分层处理，通常会出现慢变量用快控制、快变量用慢策略的错配问题，最终表现为控制

量频繁振荡、执行机构反复动作以及系统能效下降。基于 PLC 的规则控制虽然不追求复杂优化，但可通过死区、延时、优先级和钳位等机制实现工程上足够稳定、可解释、易维护的控制目标，这也是本文选择该技术路线的重要原因。

1.1.3 PLC 在光储一体化控制中的优势

可编程逻辑控制器 PLC 在工业自动化领域应用成熟，具备高可靠性、高实时性、强抗干扰性与长期稳定运行能力。相较纯软件上位机控制，PLC 对现场输入输出响应更直接，逻辑结构更清晰，便于工程交付后维护。对于光储系统而言，PLC 可天然承载开关量联锁、模拟量闭环、报警保护、时序控制与人机交互任务，尤其适合中小型场景中的本地自治+远程扩展架构。基于 PLC 的光储一体化控制不仅可提升系统安全边界，也能为后续接入 EMS 或云平台预留接口。

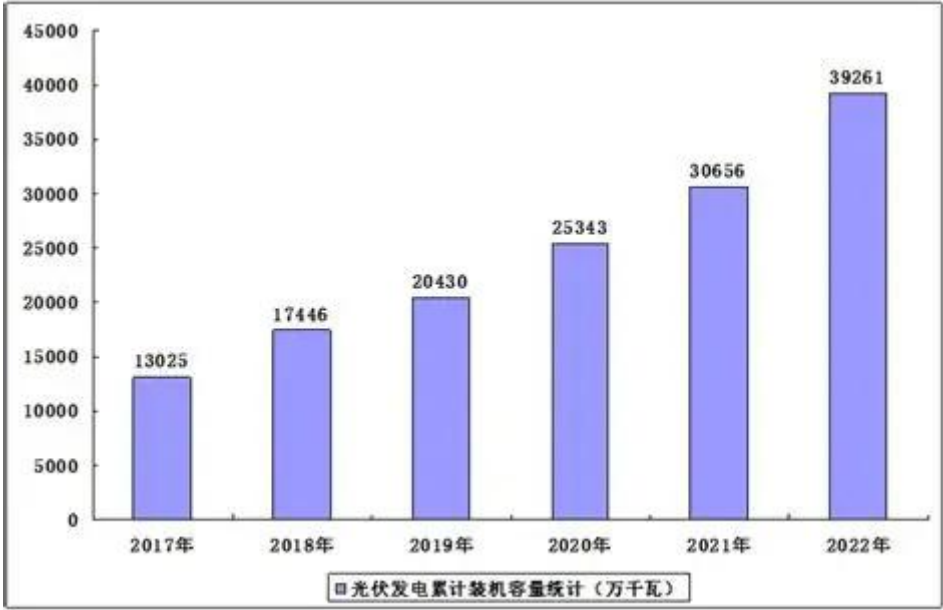


图 1-2 我国新能源与分布式光伏发展趋势图

1.2 国内外研究现状

1.2.1 光储控制策略研究进展

国内外针对光储协调控制已形成多类策略：基于规则的逻辑控制、基于优化的调度控制、基于预测的前馈控制以及多目标协同控制等。基于规则的策略实现成本低、可解释性强、适合工业快速部署；优化调度策略可提升经济性，但计算复杂、对通信与数据质量要求高；预测控制在高质量负荷与气象数据支撑下性能优异，但工程落地依赖算法与平台能力。对多数中小规模应用而言，采用规则控制为主、参数整定为辅的方案更具实用性与可维护性。

1.2.2 PLC+HMI 架构在工程中的应用特点

当前大量工控项目采用 PLC+HMI+现场设备三级架构。该架构优势在于：

控制逻辑固化于 PLC，运行稳定；界面交互集成于 HMI，操作直观；现场设备通过标准信号接入，兼容性好。在光储系统中，该架构可将运行策略、保护门限和设备状态集中管理，显著降低调试难度。但在实际应用中仍存在参数命名不统一、数据标定不一致、报警分层不清晰等问题，影响后续运维效率。因此，规范化的变量体系与模块化程序设计尤为关键。

此外，该架构还具有较强的工程迁移能力。对于同类型项目，可在保持总体程序框架不变的基础上，仅替换参数、I/O 映射和部分设备接口，即可完成快速复制部署。尤其在教学实训与中小型工商业场景中，这种模板化+参数化的实施方式能够显著降低二次开发工作量。需要注意的是，若项目后期计划接入能源管理平台 EMS 或云端数据中心，应在前期就预留数据点位和通信接口，避免后续改造对既有控制逻辑造成大范围影响。

1.2.3 现有研究的不足与改进空间

综合文献与工程案例可见，许多研究侧重理论策略，弱化了现场硬件联锁与容错设计；部分工程方案仅给出功能演示，缺少系统化的软件架构说明与可复现参数体系。本文基于已有资料，从主电路、I/O 点表、程序逻辑、HMI 组态和仿真验证五个层面进行完整梳理，力求形成一套可讲解、可复现、可扩展的光储一体化控制设计方法。

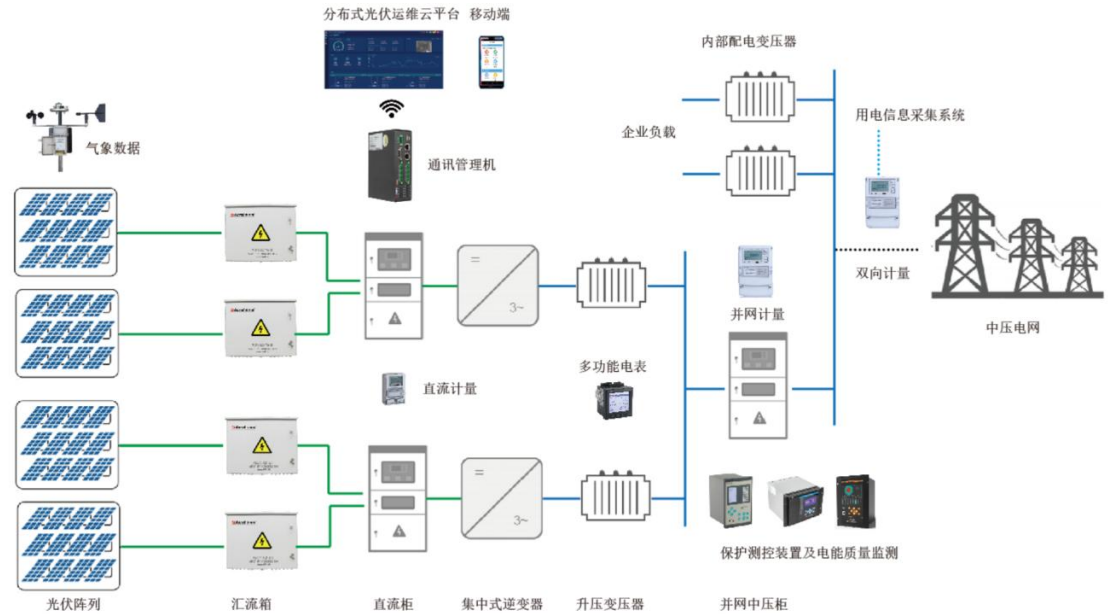


图 1-3 光储一体化应用

1.3 研究目标与主要内容

1.3.1 研究目标

本文目标是设计一套基于 PLC 的光伏储能一体化控制系统，实现以下功能：

- 1) 在光伏与负荷不平衡工况下实现储能协同补偿；
- 2) 在 SOC 与母线电压约束下保障系统安全运行；
- 3) 通过并离网联锁与延时逻辑抑制误动作；
- 4) 通过 HMI 实现参数整定、状态监视与故障定位；
- 5) 形成可工程迁移的设计文档与实现路径。

1.3.2 研究内容

围绕上述目标，本文开展如下工作：

第一，完成系统总体方案设计，明确能量流与控制流。

第二，完成主电路与 PLC 硬件接口设计，建立 I/O 映射关系。

第三，完成核心控制算法设计，包括启停逻辑、模式判断、功率分配、限幅钳位与故障处理。

第四，完成 HMI 界面设计，实现可视化运行管理。

第五，开展典型工况仿真验证并分析系统性能与局限。

1.3.3 技术路线

本文技术路线遵循需求分析—硬件设计—软件实现—界面组态—仿真验证—优化总结的闭环流程。通过资料反向还原与工程化整理，保证论文内容与项目实现的一致性。

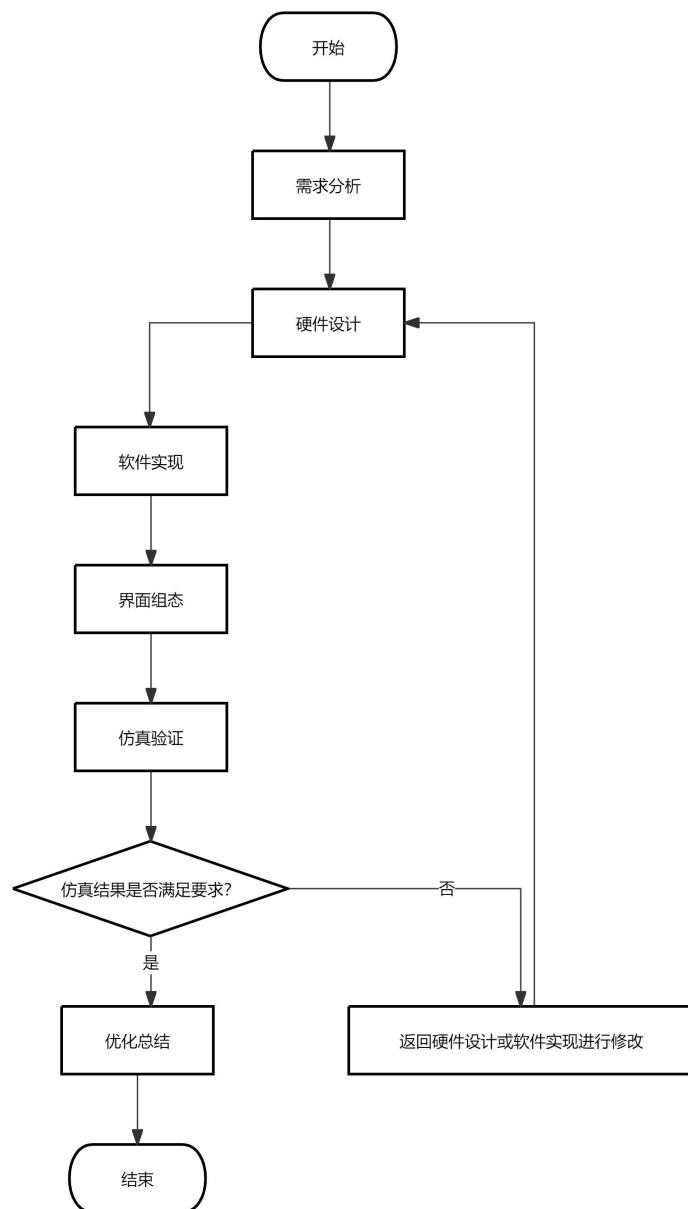


图 1-4 论文技术路线图

1.4 论文结构安排

全文共分八章：第一章绪论；第二章系统总体方案；第三章硬件系统设计；第四章控制策略设计；第五章 PLC 软件实现；第六章 HMI 设计；第七章系统调试与仿真验证；第八章结论与展望。

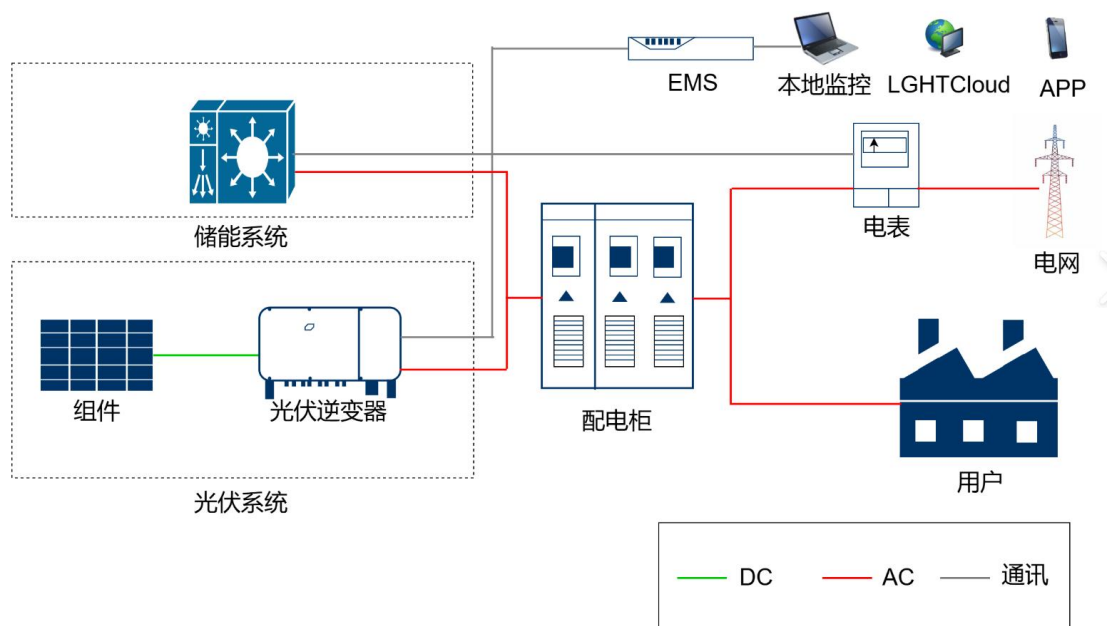


图 1-5 光伏储能结构框图

第 2 章 光伏储能一体化系统总体方案设计

2.1 系统功能需求分析

2.1.1 功率平衡需求

光伏储能一体化系统首要目标是保证负荷侧供电稳定。当光伏出力低于负荷需求时，储能应快速进入放电补偿；当光伏出力高于负荷需求时，储能应吸收富余电能。若储能受 SOC 约束无法持续调节，则应通过逆变器限功率策略和运行模式切换避免系统振荡。

2.1.2 运行安全需求

系统运行安全体现在电气安全与控制安全两方面。电气安全包括母线过压、欠压、设备故障等保护；控制安全包括急停优先、故障闭锁、延时确认、上电复位、模式切换防抖等。只有在状态可确认、信号可追溯、动作可回放基础上，系统才具备长期运行能力。

2.1.3 运维管理需求

在工程应用中，运维人员往往不是编程人员，因此界面必须具备可视化与可操作性。HMI 不仅要显示系统状态，还应支持参数在线调整、报警分级提示、趋势量观察和故障复位。通过 HMI 将复杂控制逻辑转化为可理解的运行信息，是提升可维护性的关键。

2.2 系统架构设计

2.2.1 能量流架构

系统能量流由光伏侧、储能侧、交流负荷侧构成。光伏电能优先供给负荷，剩余部分用于储能充电；当光伏不足时，储能释放电能补偿负荷。并网设备负责与外部电网的功率交换与运行模式切换，保障供能连续性。

2.2.2 控制流架构

控制流由采集层—决策层—执行层—显示层组成。采集层获取 AI 与 DI 信号；决策层在 PLC 中执行状态机与策略计算；执行层输出 DO 与 AO 指令；显示层通过 HMI 展示状态并接收参数输入。该结构实现了控制逻辑与界面交互解耦。

2.2.3 通信与信号接口规划

本系统以硬接线 I/O 为主，模拟量采用标准工程化转换。数字输入承载联锁、反馈与人工按键信号；数字输出控制执行机构与指示设备；模拟输出向逆变器或储能装置提供连续功率给定。后续可扩展 MODBUS TCP 或 PROFINET 进行数据上送。

在接口规划过程中，应明确控制闭环信号与监控展示信号的优先级差异：前者必须保证实时性和可靠性，尽量采用本地硬接线或高可靠通信；后者可根据系统资源采用周期刷新方式。对于关键开关量并网许可、急停、故障反馈，建议采用独立点位+状态校验策略，避免多个功能复用同一信号引发语义冲突。对于模拟量，除工程量换算外，还应建立数据可信性判据量程检查、跳变检查、通信中断判定，确保控制算法输入稳定。

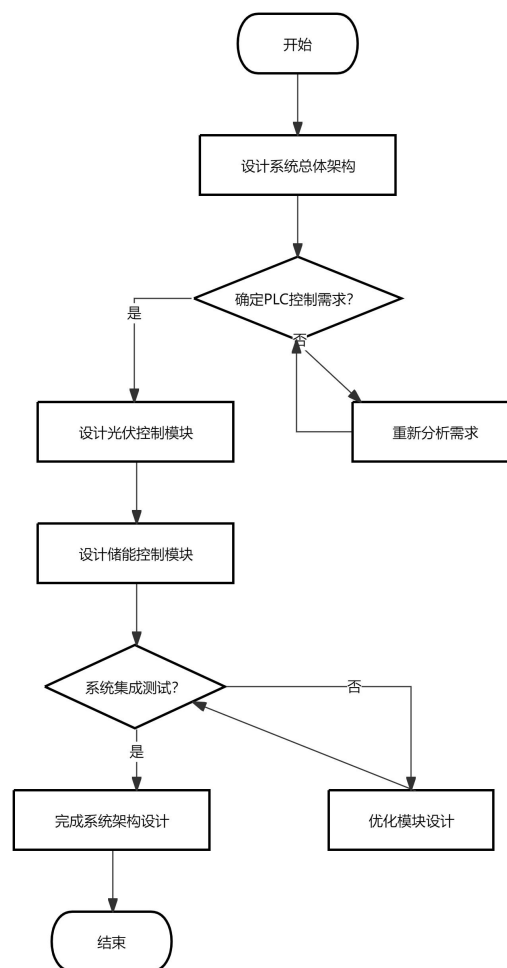


图 2-1 系统总体架构图

2.3 运行模式与状态机设计

2.3.1 自动运行模式

自动模式下，系统依据光伏功率、负载功率、SOC 与母线电压实时决策。核心逻辑为：

- 1) 功率缺口且 SOC 允许时放电；
- 2) 功率富余且 SOC 允许时充电；
- 3) 功率偏差较小或边界受限时进入保持/限功率状态。

该模式强调自适应协调，减少人工干预。

2.3.2 手动运行模式

手动模式主要用于调试与教学。操作员可通过 HMI 模拟关键反馈信号并触发部分动作，验证联锁逻辑正确性。为防止误操作，手动模式下仍保留急停、故障闭锁、越限保护等底层安全约束。

2.3.3 并网与离网状态切换

系统通过并网允许信号、交流侧与直流侧合位反馈、故障状态与延时条件综合判定并网接触器动作。并网切入需满足严格条件，切除可由急停、故障或并网许可撤销触发，确保状态切换可控、可逆、可追踪。

2.4 关键性能指标定义

2.4.1 功率协调指标

包括储能响应时间、功率偏差收敛速度、充放电切换平滑性等。实际工程中可通过趋势曲线观察功率给定与反馈偏差，以评价控制品质。

2.4.2 安全保护指标

包括报警触发准确率、误报警率、故障隔离时长、恢复时长、故障后再启动成功率等。通过延时判定与联锁闭锁机制可显著提升保护可靠性。

2.4.3 运维友好指标

包括画面信息完整性、参数可配置性、告警可解释性、调试便利性与学习成本。对于教学和中小型项目，运维友好性直接影响系统可推广性。

第 3 章 硬件系统设计

3.1 主电路设计

3.1.1 主电路拓扑结构

系统设置三路关键接触器通道：光伏并网输出 KM1、储能充电输出 KM2、储能放电输出 KM3。三路通道覆盖了光伏并网与储能双向能量调节的核心动作点，为上层控制提供执行基础。

3.1.2 接触器选型与动作要求

接触器需满足额定电压、电流及分断能力要求，并具备足够电寿命与机械寿命。考虑系统存在频繁调节场景，建议在工程落地时根据最大充放电功率与短路电流裕度进行复核选型。

3.1.3 主回路安全设计要点

主回路应配置必要的过流保护、短路保护与接地保护。并网与离网切换过程中，需重点关注触点抖动、反灌风险和合闸冲击。通过 PLC 逻辑延时与硬件联锁配合，可降低误合闸概率。

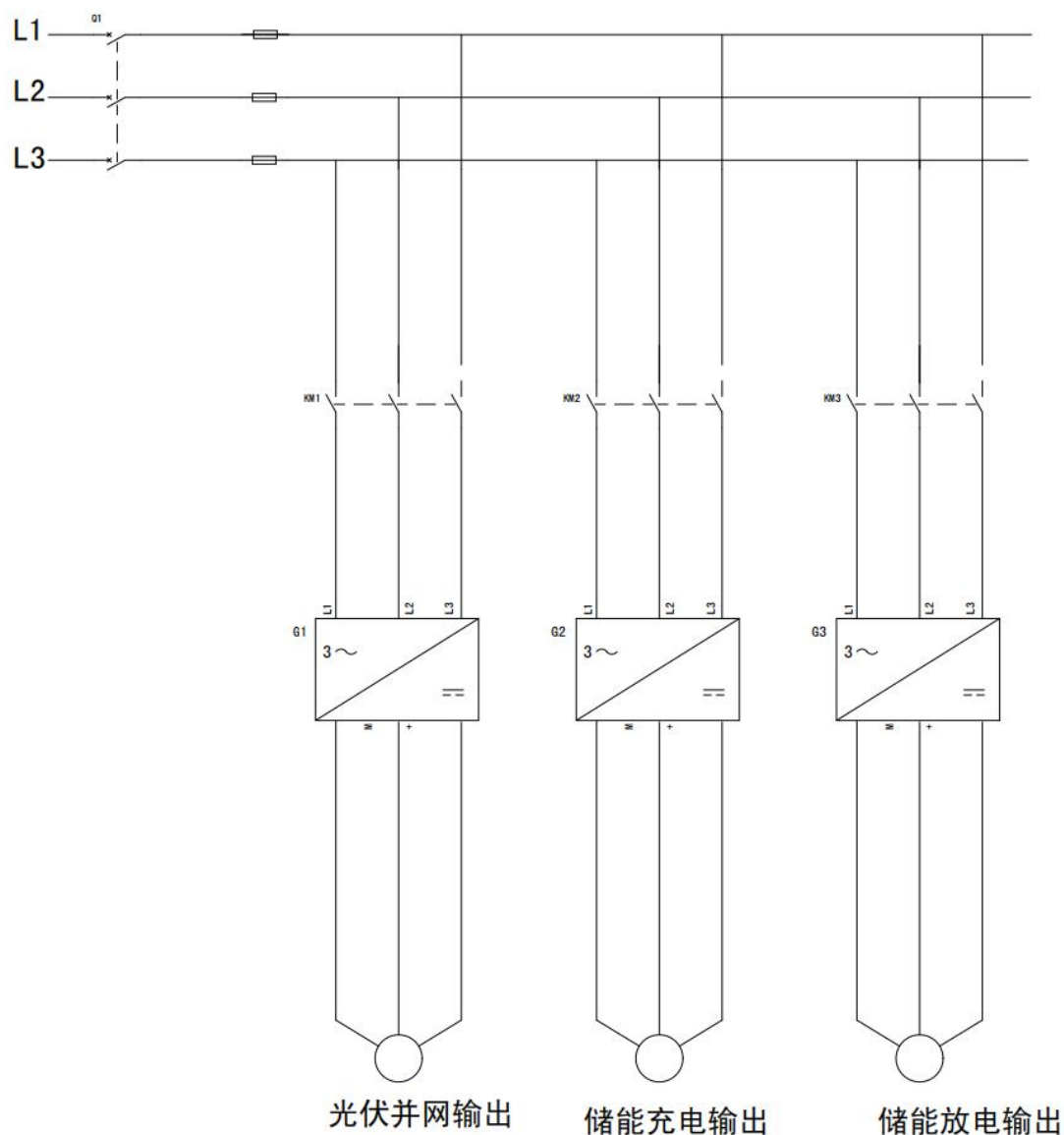


图 3-1 主电路原理图

3.2 PLC 控制硬件设计

3.2.1 控制器选型依据

系统选用西门子 S7-1511 PLC，原因在于其具备较高处理能力、良好模块扩展性及成熟的 TIA 开发生态。对于本项目规模，S7-1511 在 I/O 容量、指令执行速度和后续升级空间方面均满足需求。

3.2.2 模块配置与电源设计

系统采用数字量模块与模拟量模块配合。供电侧采用 AC220V 至 DC24V 电源转换，为 PLC、传感器与继电器线圈提供稳定电源。电源设计需考虑纹波、接

地与隔离，防止干扰耦合影响采样准确性。

在工程配置上，建议将控制电源与执行电源分区设计，并在关键支路配置独立保护器件。对于 PLC 与 HMI 供电，可设置 UPS 或后备电源，保证短时电压跌落时系统能够记录事件并有序停机。对于模拟量采集回路，建议单独设置滤波与隔离环节，减少高频噪声对采样值的影响。若现场存在大功率变频器或高频开关设备，需重点核查接地回路和屏蔽层接法，避免形成环流干扰。

3.2.3 抗干扰与布线规范

模拟量线缆建议采用屏蔽双绞线并单端接地；强弱电分槽敷设，避免并行长距离走线；开关量输入可增加硬件滤波或软件去抖；对关键输出建议增加中间继电器隔离，提高抗冲击能力。

表 3-1 主要硬件配置表

序号	设备名称	型号/类别	主要作用
1	PLC CPU	西门子 S7-1511	执行主控制逻辑、状态机与联锁控制
2	数字量 I/O 模块	DI/DO 扩展模块	采集按钮、故障、反馈信号并驱动执行元件
3	模拟量模块	AI/AO 模块 SM1234	采集功率/SOC/电压并输出功率给定
4	开关电源	AC220V/DC24V	为 PLC 与现场控制回路供电
5	接触器	KM1/KM2/KM3	完成并网、储能充电、储能放电执行控制
6	HMI 触摸屏	TIA 兼容触摸屏	参数设定、状态显示、报警交互

3.3 I/O 接口设计与点位分配

3.3.1 数字量输入设计

数字输入主要包括：急停、启动、停止、复位、自动/手动选择、并网允许、BMS 故障、逆变器故障、交流侧合位反馈、直流侧合位反馈、储能充放电允许反馈等。上述信号构成系统状态判断与联锁触发基础。

3.3.2 数字量输出设计

数字输出主要包括：并网接触器控制、储能充电使能、储能放电使能、并网运行灯、离网运行灯、故障蜂鸣器、故障指示灯、系统运行灯等。输出信号分为执行类与指示类，便于维护分层。

3.3.3 模拟量输入输出设计

模拟输入采集光伏功率、负载功率、SOC、母线电压；模拟输出下发储能充电功率给定与逆变器限功率给定。模拟量按 0~27648 标准量程进行归一化与工程量转换，保证指令和反馈的一致性。

表 3-2 I/O 点

序号	输入名称	输入地址	输出名称	输出地址
1	急停按钮	I0.0	光伏并网接触器控制	Q0.0
2	系统启动按钮	I0.1	储能充电使能输出	Q0.1
3	系统停止按钮	I0.2	储能放电使能输出	Q0.2
4	故障复位按钮	I0.3	并网运行指示灯	Q0.3
5	自动/手动模式选择	I0.4	离网运行指示灯	Q0.4
6	并网允许信号	I0.5	故障报警蜂鸣器	Q0.5
7	电池管理系统故障输入	I0.6	故障报警指示灯	Q0.6
8	逆变器故障输入	I0.7	系统运行指示灯	Q0.7
9	交流侧断路器合位反馈	I1.0	储能充放电功率给定	QW2
10	直流侧接触器合位反馈	I1.1	逆变器有功功率限值给定	QW4
11	储能充电允许反馈	I1.2		
12	储能放电允许反馈	I1.3		
13	光伏输出功率反馈	IW2		
14	负载功率反馈	IW4		
15	电池荷电状态	IW6		
16	直流母线电压反馈	IW8		

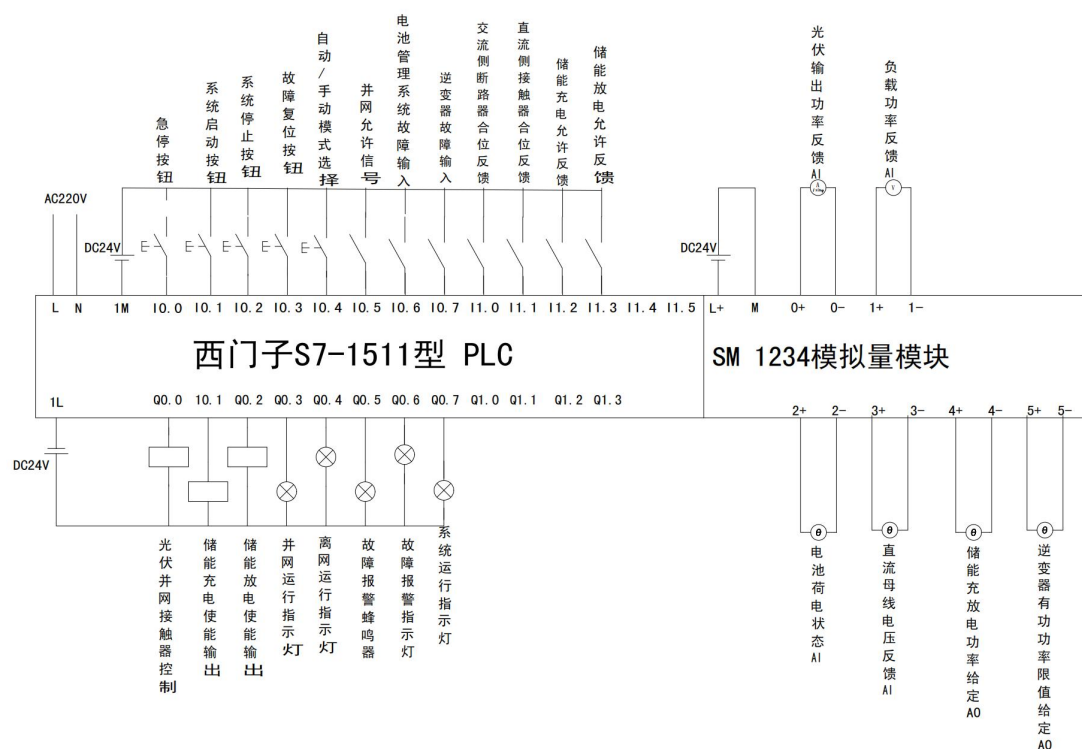


图 3-2 PLC I/O 接线图

3.4 传感与执行设备接口设计

3.4.1 功率与电压采样接口

光伏功率、负载功率和母线电压采样需保证量程覆盖与精度稳定。建议工程实施时进行零点校准与满量程标定，并建立周期校验机制，减少漂移对控制策略的影响。

3.4.2 SOC 信号接入与可信度评估

SOC 一般由 BMS 计算后输出给 PLC。PLC 应将 SOC 作为策略关键约束，但也应通过上下限异常检测判断其可信性。若 SOC 信号异常跳变，应触发告警并进入保守控制。

3.4.3 执行机构驱动与反馈闭环

执行机构驱动应遵循命令-动作-反馈确认闭环原则。以并网接触器为例，输出命令后需验证交流、直流侧反馈是否到位，并在超时情况下触发故障，避免命令成功但动作失败的隐患。

从维护角度看，执行链路应增加动作事件记录机制，命令下发时间、反馈到位时间、动作持续时间和异常代码等。该类信息虽然不直接参与控制，但对故障追溯与预防性维护具有重要价值。例如，当接触器动作延迟持续增加时，可能预

示机械磨损或线圈性能衰减，可提前安排检修，避免运行中突发故障导致停机。

3.5 传感器及硬件选型

3.5.1 选型原则与技术要求

传感器及关键硬件选型应围绕“量程覆盖、精度匹配、接口兼容、环境适应、维护便利”五项原则展开。量程应覆盖系统最大运行工况并留有一定裕度；精度需满足功率分配与报警阈值判定要求；输出接口优先采用 PLC 易接入的标准信号如 4-20mA、0-10V 或标准开关量；设备应适应现场温湿度、电磁干扰和连续运行条件；同时兼顾供货周期、备件通用性与后续运维成本。

3.5.2 关键传感器选型

本系统核心采集量为光伏功率、负载功率、电池 SOC 和母线电压。光伏与负载侧建议采用电参量变送器功率或电流/电压组合测量，要求具有良好线性与抗干扰能力；SOC 信号通常由 BMS 提供，需重点核查通讯/映射一致性；母线电压采样建议采用隔离型电压变送器，确保高压侧与控制侧电气安全隔离。若用于教学和仿真平台，可选用具备本地显示与便捷标定功能的设备，以降低调试门槛。



图 3-3 伏功率/负载功率传感器

表 3-3 传感器选型表

序号	被测对象	建议传感器 / 变送器类型	建议信号类型	选型关注点
----	------	------------------	--------	-------

1	光伏输出功率	三相电参量变送器	4-20mA RS485	/ 响应速度、测量精度、抗谐波能力
2	负载功率	三相电参量变送器	4-20mA RS485	/ 量程覆盖峰值负载、稳定性
3	电池 SOC	BMS 输出 SOC 信号	模拟量/通讯量	映射一致性、刷新周期、异常容错
4	直流母线电压	隔离型电压变送器	0-10V 4-20mA	/ 隔离耐压、温漂、线性度

3.5.3 关键执行硬件选型

执行硬件重点包括并网接触器、储能充放电接触器、中间继电器、开关电源和保护器件。并网及储能主回路接触器应根据额定电流与冲击电流能力选型，并核查触点寿命；中间继电器应关注触点容量与动作可靠性；开关电源建议留有20%~30%功率裕度；保护器件断路器、熔断器、浪涌保护器需按短路容量及配电规范配置，保证故障可隔离、可恢复。

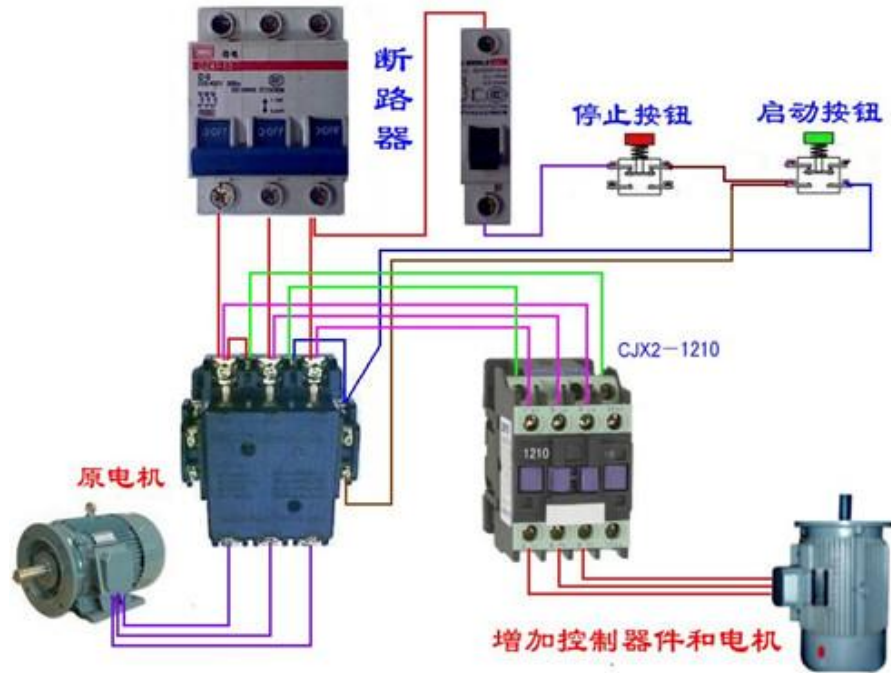


图 3-4 接触器与中间继电器实物安装图

表 3-4 执行硬件选型建议表

序号	设备名称	选型建议	关键参数
1	并网接触器 KM1	工业级交流接触器	额定电流、分断能力、机械寿命
2	充电接触器 KM2	工业级接触器高频动作	电寿命、线圈功耗、辅助触点配置
3	放电接触器 KM3	工业级接触器高可靠	冲击承受能力、触点温升
4	中间继电器	隔离驱动型继电器	触点容量、响应时间、绝缘等级
5	开关电源	AC220V 转 DC24V 工业电源	输出功率裕度、纹波、EMC 等级

3.5.3 安装与调试要点

传感器安装应尽量靠近测点并避开强磁与高热区域；模拟量信号线需屏蔽并与动力线分开敷设；设备投运前应完成零点与量程标定，并在 PLC 中校核工程量映射关系。对于接触器与继电器等执行件，建议在调试阶段记录动作时序与反馈延迟，确保“命令发出—动作到位—状态回传”链路一致。

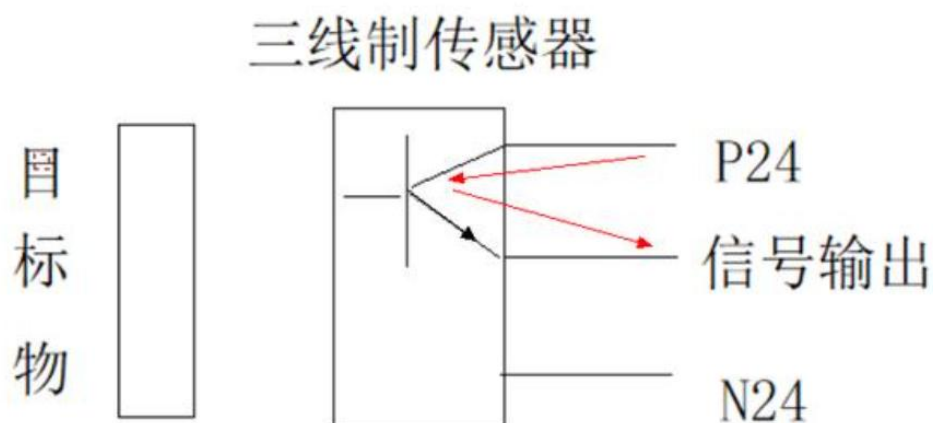


图 3-5 传感器接线图

第 4 章 控制策略设计

4.1 控制目标与约束条件

4.1.1 功率平衡目标函数

设光伏功率为 P_{pv} ，负载功率为 P_{load} ，储能功率为 P_{es} 充电为负，放电为正，系统目标可表示为最小化瞬时功率偏差：

$$\Delta P = P_{load} - P_{pv} - P_{es}$$

当 ΔP 趋近于 0 时，系统功率匹配最佳。

4.1.2 SOC 约束条件

设 SOC 上限为 SOC_{max} ，下限为 SOC_{min} 。控制应满足：

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

当 SOC 接近上限时限制充电；接近下限时限制放电，以避免过充过放并延长电池寿命。

4.1.3 电压与设备安全约束

设母线电压为 U_{dc} ，过压阈值 U_{max} ，欠压阈值 U_{min} 。系统需满足：

$$U_{min} \leq U_{dc} \leq U_{max}$$

越限时需触发报警并采取限功率或闭锁策略。对于故障输入信号 BMS 故障、逆变器故障应具有最高优先级，立即抑制高风险输出。

表 4-1 核心控制参数建议值

参数名称	符号	建议值	单位	说明
功率偏差阈值	ΔP_{th}	2.0	kW	充放电策略切换参考阈值
SOC 上限	SOC_{max}	80	%	超限后限制充电
SOC 下限	SOC_{min}	20	%	低限后限制放电
母线过压限值	U_{max}	800	V	过压报警判据
母线欠压限值	U_{min}	600	V	欠压报警判据

最大充电功率	$P_{chg,max}$	30	kW	充电功率上限
最大放电功率	$P_{dis,max}$	30	kW	放电功率上限
并网延时	T_{grid}	2	s	并网闭合确认延时
电压报警延时	T_{alarm}	3	s	过欠压报警确认延时

4.2 模式判定与状态转移策略

4.2.1 充电优先模式判定

当 $P_{pv} > P_{load}$ 且 $SOC < SOC_{max}$ 时，系统进入充电优先模式。此时输出储能充电使能，储能吸收富余光伏功率，减小弃光风险。若 SOC 达到上限，逐步减小充电功率并退出该模式。

4.2.2 放电补偿模式判定

当 $P_{load} > P_{pv}$ 且 $SOC > SOC_{min}$ 时，系统进入放电补偿模式。通过储能放电弥补缺口，提升负荷供电稳定性。若 SOC 接近下限，则进行放电降额，必要时退出放电模式。

4.2.3 保持与保护模式判定

当功率偏差处于死区或关键约束触发时，系统进入保持/保护状态。保持状态减少频繁切换；保护状态优先处理安全问题，通常伴随报警、限功率或执行输出闭锁。

为避免模式切换抖动，保持状态可引入最小驻留时间 Minimum Dwell Time 思想，即系统进入某一状态后在短时间内不允许再次切换，除非触发高优先级故障。该机制在工程实现上可通过定时器与状态位组合完成，能够显著降低临界点附近反复跳变。保护状态退出时也应采用条件恢复+人工确认双重机制，防止系统在故障边缘反复启停。

4.3 充放电功率给定计算策略

4.3.1 基础给定计算

储能功率给定可按功率差计算：

$$P_{es_ref} = P_{load} - P_{pv}$$

并结合模式方向对给定符号进行约束，确保充电与放电逻辑一致。

4.3.2 上下限钳位策略

为防止超能力输出，设储能功率上下限为 P_{es_min} 、 P_{es_max} ，则：

$$P_{es_cmd} = \text{clamp}(P_{es_ref}, P_{es_min}, P_{es_max})$$

其中 clamp 表示钳位函数。通过钳位处理可防止给定超出设备能力范围。

4.3.3 斜率限制与防抖动处理

为减小设备冲击，可对功率给定增加斜率限制：

$$|P_{es_cmd}(k) - P_{es_cmd}(k-1)| \leq R_{limit}$$

配合模式判定死区，可抑制边界振荡与频繁切换。

4.4 逆变器限功率协同策略

4.4.1 逆变器限功率设定逻辑

逆变器限功率给定用于约束并网侧有功输出。在 SOC 接近上限、储能无法继续充电时，可降低逆变器有功上限，减少过剩功率注入并控制母线波动。

4.4.2 与储能给定的协同关系

逆变器限功率与储能给定并非独立控制量，而应满足协调关系：当储能调节能力降低时，逆变器限功率策略应增强；当储能可用容量充足时，逆变器限功率策略可适当放宽，以提升新能源利用率。

在协同控制中，可将储能状态划分为优先调节区、受限调节区、保护区三个层次。优先调节区内以储能功率调节为主，逆变器限功率仅作边界约束；受限调节区内两者协同分担调节任务；保护区内则以逆变器限功率与安全闭锁为主，储能仅维持最小安全动作。该分层思想有助于在不同运行阶段实现安全性与经济性的平衡。

4.4.3 协同失配风险与处理

若两类给定未协同，可能出现储能饱和+逆变器无限功率的过压风险，或储能正常+逆变器过度限功率的能源浪费。通过统一变量管理与顺序逻辑计算可避免此类失配。

4.5 故障诊断与保护策略

4.5.1 延时判定与抗扰机制

母线过压与欠压采用定时器延时例如 3s 判定，避免瞬态扰动导致误报警。

对于开关量反馈也可设置短延时确认，提升动作判定鲁棒性。

4.5.2 故障复位策略

故障复位应满足故障源消失+人工确认双条件。复位按钮仅清除可恢复故障，若硬件故障仍在，则故障位应重新置位。该机制可防止带病重启。

第 5 章 PLC 软件设计与实现

5.1 软件总体架构

5.1.1 程序组织结构

系统采用 OB+FC+DB 结构：主循环 OB1 负责时序调度与状态决策；FC1 负责模拟量采集、标定与映射；DB 用于定时器与参数存储。该结构清晰、可维护，适合后续模块扩展。

5.1.2 变量命名与地址规划

变量命名遵循功能+对象+属性原则，例如储能充电使能输出母线过压报警等。地址层面分配 DI/DO、AI/AO、M 位和 MW/MD 字节区，保证逻辑可读性与调试效率。

为了提升长期维护性，建议在变量管理中同步建立变量字典，包含变量中文名、英文标识、地址、数据类型、读写属性、来源模块与用途说明。对于跨模块复用变量，应标注主从关系，避免多处写入造成冲突。工程交付时，将变量字典与 I/O 点表、接线图、报警清单一并归档，可显著降低后续扩展与交接成本。

5.1.3 扫描周期与实时性分析

OB1 周期需满足控制实时性。由于本系统主要为逻辑判定与简单计算，扫描负担较低。实际工程可在监控中观察循环时间，确保在扰动工况下仍满足响应需求。

程序块

Main [OB1]

Main 属性							
常规							
名称	Main	编号	1	类型	OB	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题	"Main Program Sweep (Cycle)"	作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					
名称		数据类型	默认值		注释		
▼ Input							
Initial_Call		Bool			Initial call of this OB		
Remanence		Bool			=True, if remanent data are available		
Temp							
Constant							

图 5-1 PLC 程序块结构图 OB1、FC1、DB1~DB3

程序块

模拟量采集 [FC1]

模拟量采集 属性							
常规							
名称	模拟量采集	编号	1	类型	FC	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题		作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					
名称		数据类型	默认值	注释			
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
模拟量采集		Void					

图 5-2 PLC 程序块结构图 OB1、FC1、DB1~DB3

程序块 / 系统块 / 程序资源

IEC_Timer_0_DB [DB1]

IEC_Timer_0_DB 属性									
常规									
名称	IEC_Timer_0_DB	编号	1	类型	DB	语言	DB		
编号	自动								
信息									
标题		作者	Simatic	注释		系列	IEC		
版本	1.0	用户自定义 ID	IEC_TMR						
名称	数据类型	起始值	保持	从 HMI/OPC UA/Web API 可访问	从 HMI/OPC UA/Web API 可写	在 HMI 工程组态中可见	设定值	监控	注释
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

图 5-3 PLC 程序块结构图 OB1、FC1、DB1~DB3

程序块 / 系统块 / 程序资源

IEC_Timer_0_DB_1 [DB2]

IEC_Timer_0_DB_1 属性									
常规									
名称	IEC_Timer_0_DB_1	编号	2	类型	DB	语言	DB		
编号	自动								
信息									
标题		作者	Simatic	注释		系列	IEC		
版本	1.0	用户自定义 ID	IEC_TMR						
名称	数据类型	起始值	保持	从 HMI/OPC UA/Web API 可访问	从 HMI/OPC UA/Web API 可写	在 HMI 工程组态中可见	设定值	监控	注释
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

图 5-4 PLC 程序块结构图 OB1、FC1、DB1~DB3

IEC_Timer_0_DB_2 [DB3]

IEC_Timer_0_DB_2 属性									
常规									
名称	IEC_Timer_0_DB_2	编号	3	类型	DB	语言	DB		
编号	自动								
信息									
标题		作者	Simatic	注释		系列	IEC		
版本	1.0	用户自定义 ID	IEC_TMR						
名称	数据类型	起始值	保持	从 HMI/OPC UA/Web API 可访问	从 HMI/OPC UA/Web API 可写	在 HMI 工程组态中可见	设定值	监控	注释
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

图 5-5 PLC 程序块结构图 OB1、FC1、DB1~DB3

5.2 主程序逻辑实现

5.2.1 首次扫描初始化逻辑

首次扫描中对并网接触器输出复位，并完成阈值参数初始化，SOC 上下限、功率上下限、母线过欠压限值、最大充放电功率等，避免上电后参数未定义导致误动作。

5.2.2 启停自保持逻辑

启动、停止、急停、故障标志共同构成系统运行自保持网络。逻辑遵循启动置位、停止复位、急停优先、故障闭锁原则，确保系统启停行为可预测。

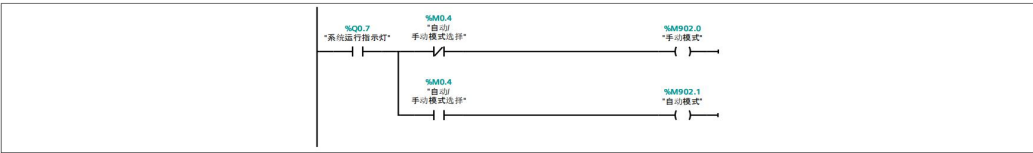
5.2.3 模式选择与指示逻辑

自动/手动模式选择通过模式位实现，并同步驱动状态显示。系统运行灯、并网运行灯、离网运行灯等输出按模式与状态组合控制，提高界面可理解性。

网络 1：首次扫描复位并网接触器



网络 2：系统运行与模式指示



网络 3：系统启停自保持逻辑

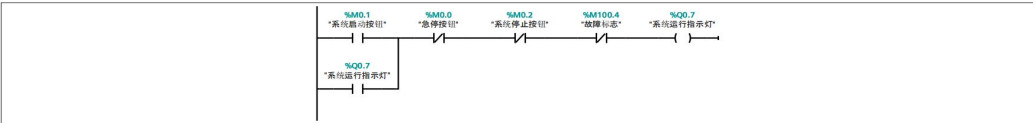


图 5-6 自动/手动模式选择

5.3 自动控制核心网络实现

5.3.1 功率偏差中间量计算网络

通过对 P_{pv} 与 P_{load} 进行差值计算，生成 DeltaP 及中间变量，为后续模式判定与给定计算提供输入。中间量分离有利于调试和异常追踪。

5.3.2 充放电策略判定网络

根据 DeltaP 方向、SOC 区间、故障状态进行综合判定，置位充电优先模式或放电补偿模式。策略网络中加入模式互斥，防止同一扫描周期同时置位。

5.3.3 功率限幅与输出网络

在基础给定上加入最大充放电功率、上下限钳位与零点处理，最终生成储能功率给定与逆变器限功率给定，并写入模拟输出映射区。

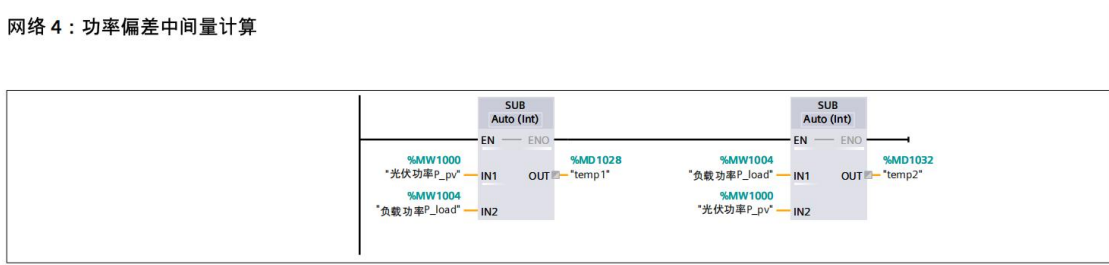


图 5-7 功率偏差计算网络图

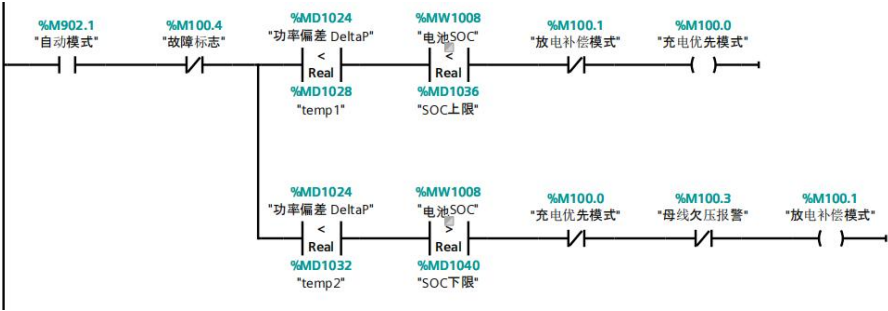


图 5-8 充放电策略判定网络图

网络 6：储能充/放电使能输出

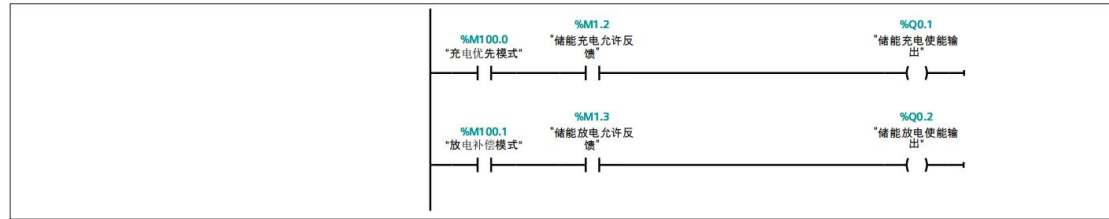
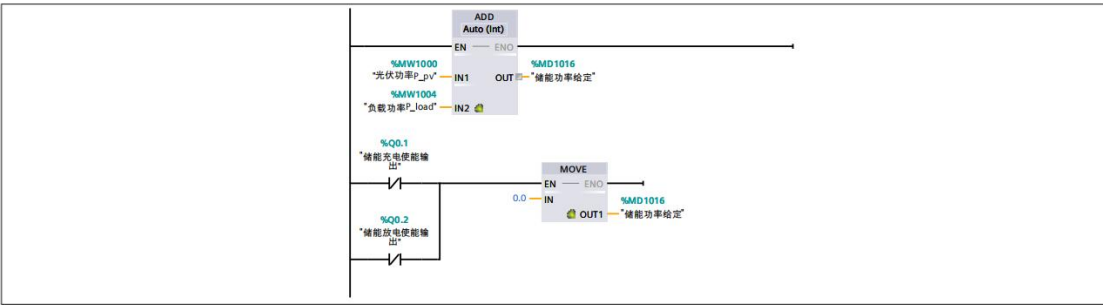
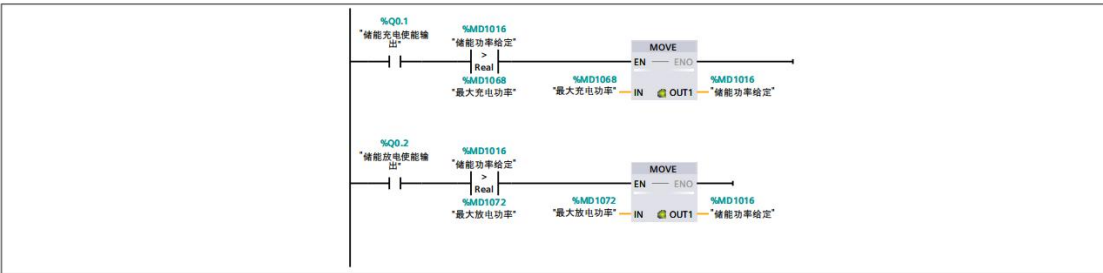


图 5-9 充放电使能输出网络图

网络 16：储能功率给定基础计算



网络 17：最大充/放电功率限幅



网络 18：逆变器限功率给定计算

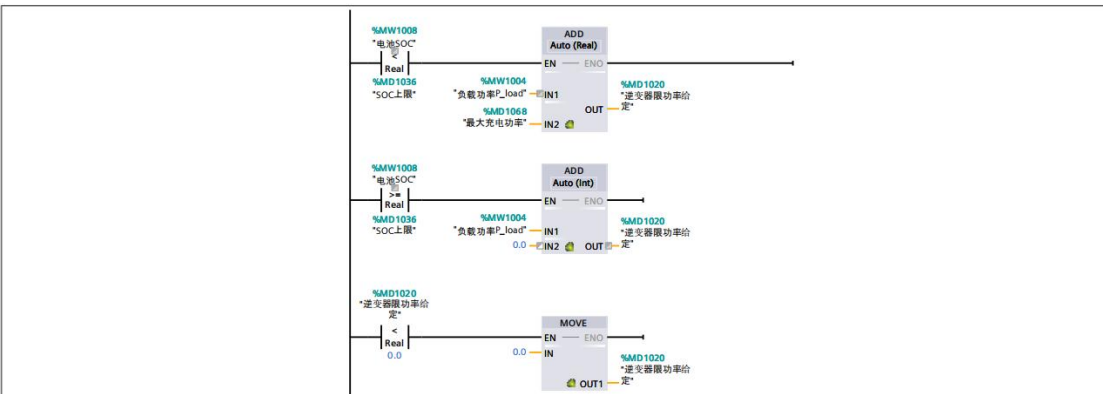


图 5-10 储能功率给定计算与限幅网络图

网络 20：逆变器限功率上下限钳位

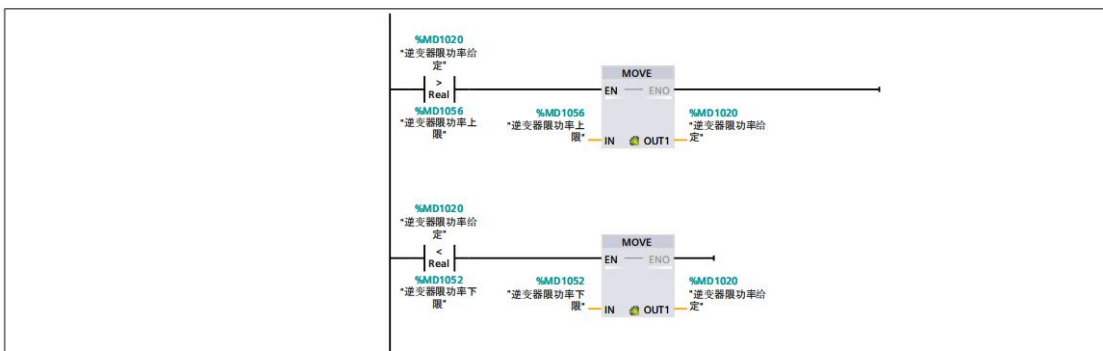


图 5-11 逆变器限功率给定与钳位网络图

5.4 并离网联锁逻辑实现

5.4.1 并网接触器闭合条件

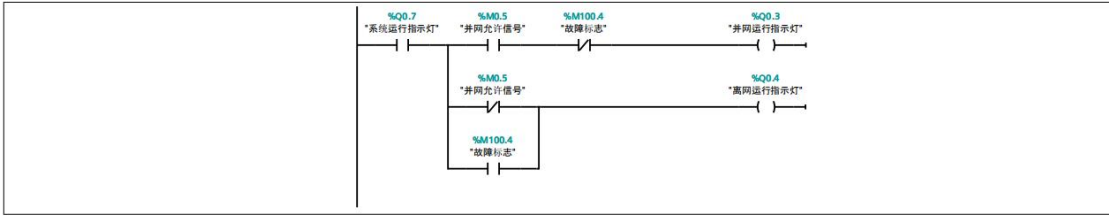
并网输出需同时满足：系统运行、并网允许、交流侧与直流侧反馈到位、无总故障等条件。并网操作附加延时 2s 确认，防止反馈毛刺引发误合闸。

5.4.2 并网允许复位条件

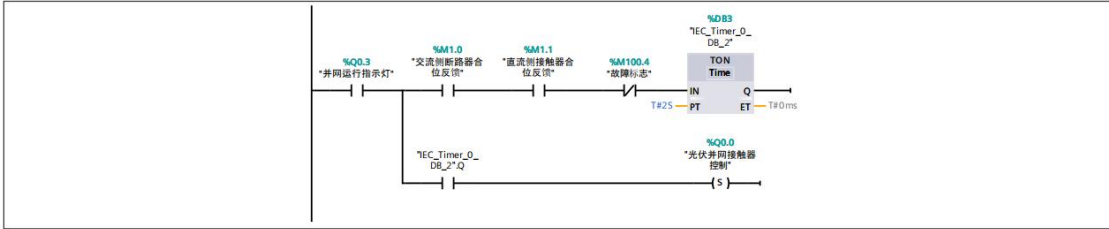
当急停、故障、系统停止或离网状态触发时，并网允许应复位，确保并网动作不在异常状态下保持。该逻辑体现安全优先、功能次之原则。

5.4.3 并离网指示与状态同步

并网与离网指示灯应与内部状态机一致。建议统一由状态位驱动显示，避免不同网络重复赋值导致显示与实际动作不一致。



网络 11：并网接触器闭合条件与延时输出



网络 12：并网允许复位条件

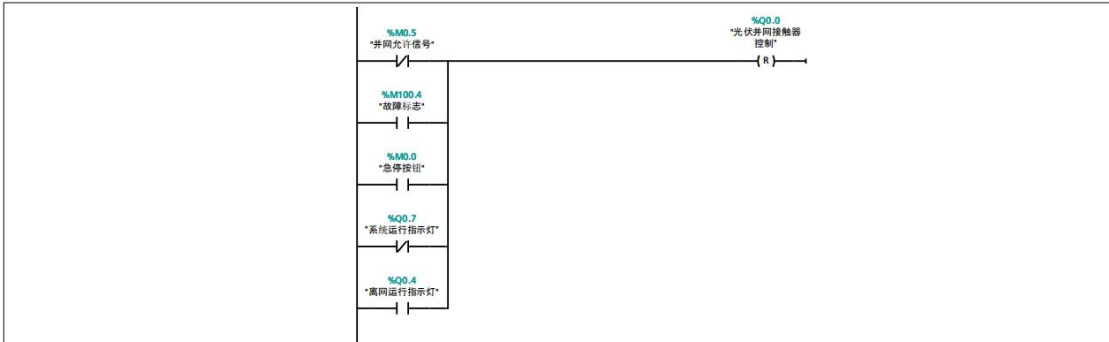


图 5-12 并离网指示

5.5 报警与故障处理实现

5.5.1 单项报警生成

包括 SOC 上限报警、SOC 下限报警、母线过压报警、母线欠压报警、BMS

故障报警、逆变器故障报警等。单项报警独立生成有助于故障定位。

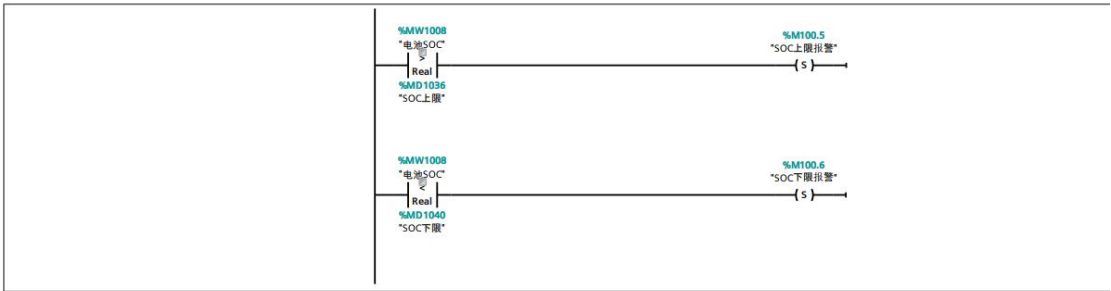
5.5.2 总故障标志生成

将关键报警经逻辑或运算形成总故障标志，用于统一闭锁高风险输出并触发声光告警。总故障位兼具系统保护与运维提示双重作用。

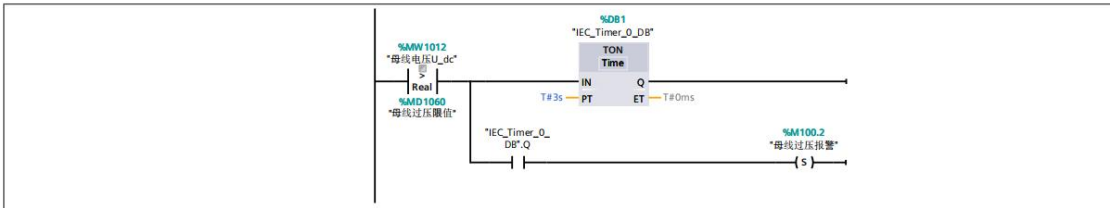
5.5.3 声光报警与复位逻辑

总故障置位时驱动蜂鸣器与故障灯。复位按钮仅在故障条件消失后有效，避免假复位。必要时可增加报警保持时间，防止告警闪断。

网络 7：SOC 超限报警置位



网络 8：母线过压延时报警



网络 9：母线欠压延时报警

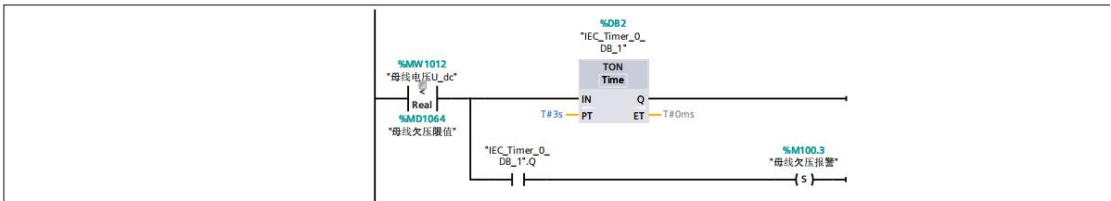


图 5-13 声光报警网络

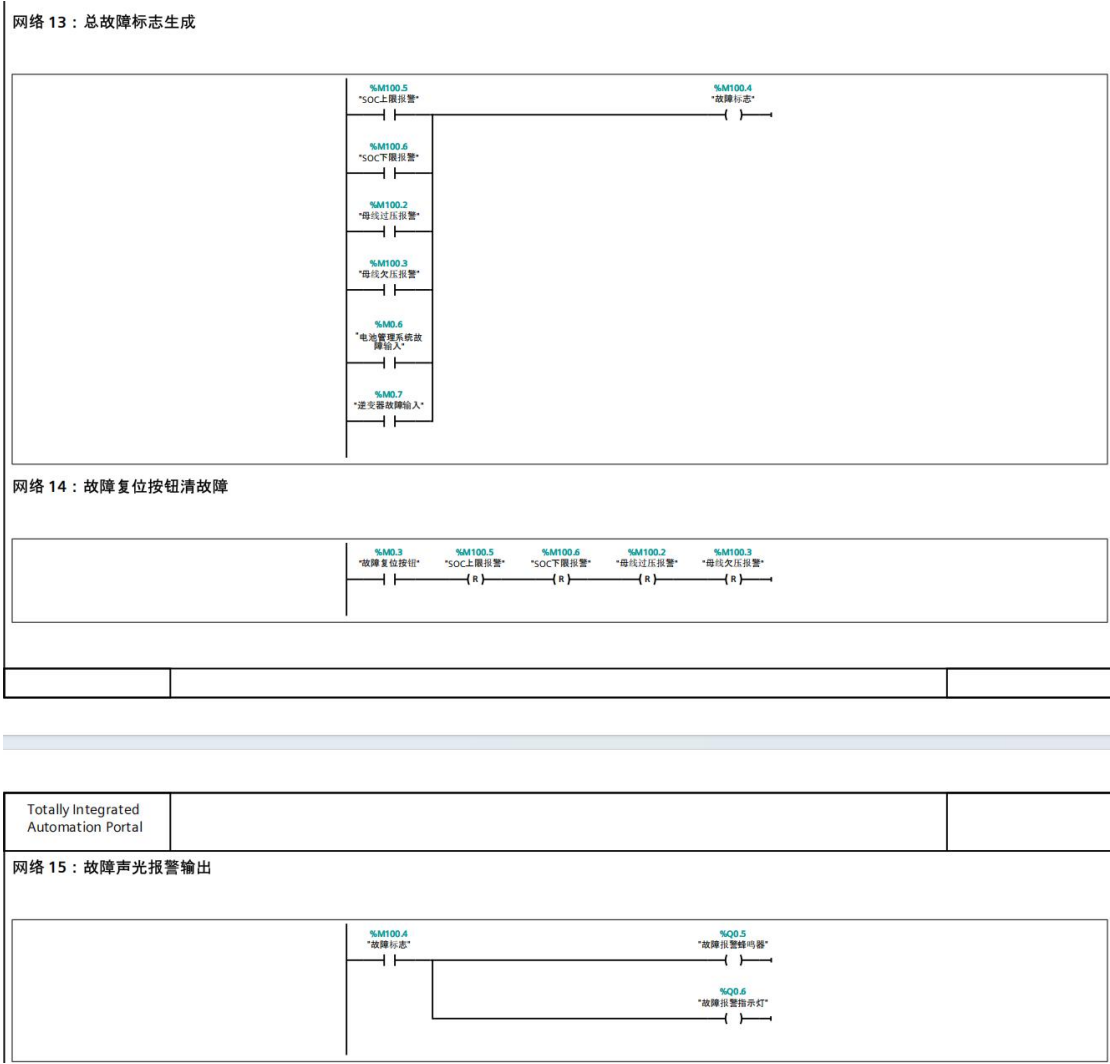


图 5-14 总故障生成与复位网络图

5.6 模拟量处理功能块实现

5.6.1 输入采集与标定

功能块 FC1 使用 NORM_X 与 SCALE_X 将原始 AI 量转换为工程量，覆盖光伏功率、负载功率、SOC 与母线电压。该过程保证策略计算在统一物理量域中进行。

5.6.2 输出映射与量程转换

储能功率给定和逆变器限功率给定经反向映射输出至 AO 通道。通过明确的上下限定义，保证输出不会超出执行设备可接受区间。

5.6.3 数据有效性防护

对输入数据进行范围检查和异常截断，防止传感器故障或通信异常导致极端值进入控制回路，提升系统鲁棒性。

除静态范围检查外，还可增加动态一致性检查，例斜率上限判断、短周期内突变次数统计、冗余信号交叉校验等。当检测到数据异常但未达到故障闭锁条件时，系统可采用保持上一有效值+告警提示的降级策略，确保控制连续性。该策略在传感器短时抖动或通信瞬断场景下尤其有效，能够避免控制量突变引起的二次扰动。

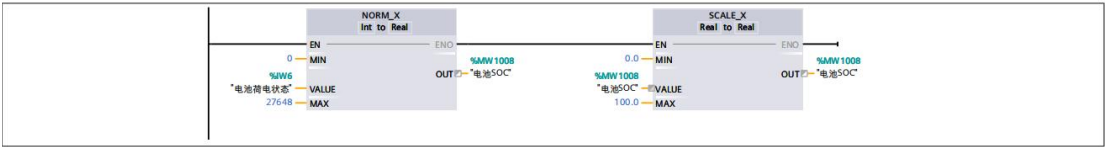
网络 1：光伏输出功率采集与标定



网络 2：负载功率采集与标定



网络 3：电池 SOC 采集与标定



网络 4：直流母线电压采集与标定



网络 5：数据有效范围防护（输入侧）

图 5-15 功率标定

网络 5：数据有效范围防护（输入侧）

网络 6：储能功率给定量程映射（输出侧）



网络 7：逆变器限功率量程映射（输出侧）



图 5-16 逆变器功率给定

第 6 章 HMI 监控系统设计

6.1 HMI 设计原则

6.1.1 可视化原则

界面布局按控制区-状态区-参数区-趋势区划分，关键信息集中显示，减少跨屏操作。颜色编码遵循常用工业习惯：绿色表示正常/运行，红色表示故障/报警，灰色表示未激活。

6.1.2 可操作原则

关键操作按钮启动、停止、急停、复位位置固定且样式区分明显。对可写参数设置输入范围与权限控制，避免误输入导致系统异常。

6.1.3 可维护原则

每个状态指示与变量绑定保持一一对应，命名与 PLC 一致。报警信息应包含故障名+触发条件+处理建议，提升运维效率。

6.2 根画面功能设计

6.2.1 系统控制区

提供启动、停止、急停、复位及自动/手动模式切换。该区域承担运行状态切换核心操作，应设置明显边界并防误触。

6.2.2 系统状态区

显示并网接触器、充电使能、放电使能、并网运行、离网运行、故障状态等指示灯。通过动态颜色和闪烁强化异常识别。

6.2.3 参数设置区

支持功率偏差阈值、SOC 上下限、储能功率上下限、逆变器限功率上下限、母线过欠压阈值、最大充放电功率等在线配置。参数修改应记录时间与操作者。

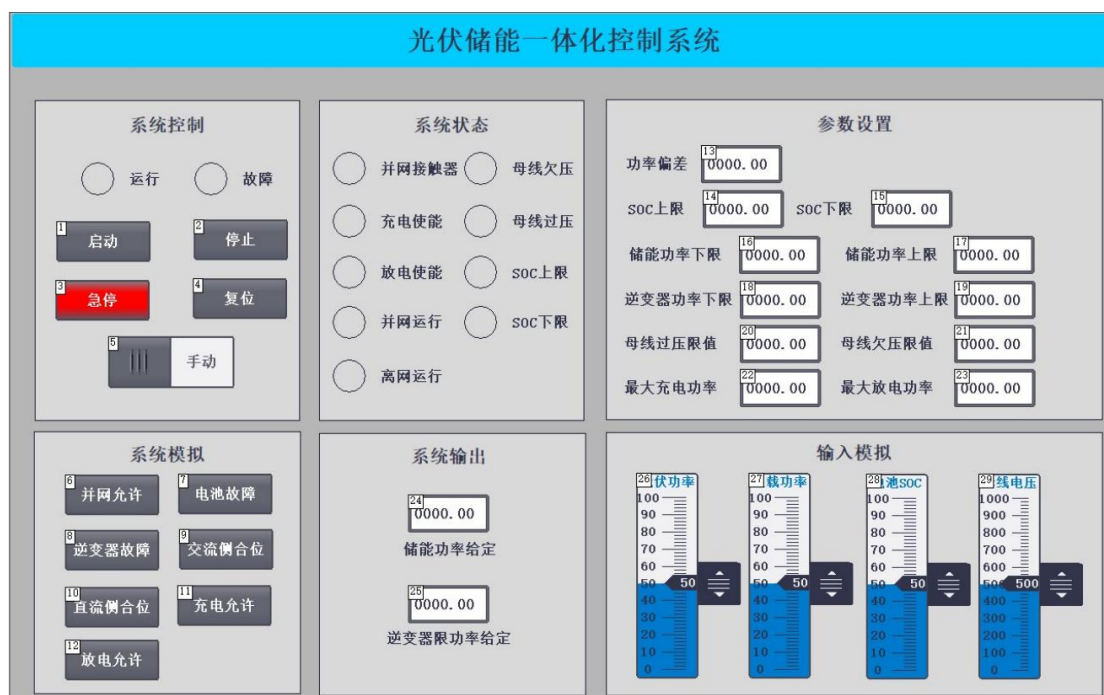


图 6-1 HMI 根画面总览图

6.3 输入模拟与输出监视设计

6.3.1 输入模拟功能

为便于离线调试，HMI 提供光伏功率、负载功率、SOC、母线电压的模拟输入通道。该功能可在无完整现场设备条件下验证控制逻辑。

6.3.2 输出监视功能

HMI 展示储能功率给定与逆变器限功率给定，并可实时观察其随工况变化的响应。通过数字显示与条形图结合，提高可读性。

6.3.3 趋势曲线与调试支持

建议在工程拓展中增加趋势曲线页面，记录关键变量随时间变化，用于分析控制性能、参数合理性和故障前兆。

趋势页面建议至少包含光伏功率、负载功率、储能功率给定、SOC、母线电压、并网状态和总故障标志等关键变量，并支持多时间尺度切换 5 分钟、1 小时、24 小时。通过历史曲线可直观观察参数设置对控制效果的影响，例功率死区过小会导致切换频繁，SOC 边界设置过宽可能加剧电池循环压力。基于趋势分析开展参数回归优化，可使系统逐步达到更优运行状态。

6.4 报警管理与交互设计

6.4.1 报警显示策略

报警界面按时间倒序显示，包含报警等级、触发时间、恢复时间、持续时长。对未确认报警进行高亮提示，减少漏报风险。

6.4.2 报警确认与复位流程

建议采用确认不等于复位机制：确认表示运维人员已知晓，复位表示故障已消除且允许系统恢复。两者分离有利于运维规范化。

6.4.3 权限分级与安全防护

HMI 应设置操作员、工程师、管理员等权限等级。关键参数与模式切换建议仅向高权限开放，降低误操作风险。

6.5 HMI 工程化优化建议

6.5.1 画面分层与导航优化

在实际项目中，HMI 页面数量往往会随功能扩展而快速增加。为防止页面多、入口乱、查找慢的问题，建议采用分层导航结构：一级页面展示总览信息与关键操作入口；二级页面对应系统状态、参数整定、报警管理、趋势分析等模块；三级页面用于设备级诊断和维护操作。通过分层设计可降低操作员认知负担，提高异常处理效率。导航按钮应保持统一位置与统一命名，减少因界面切换导致的误操作风险。对于关键页面，建议设置返回总览快捷入口，并采用面包屑式路径提示，保证操作路径可追踪。

6.5.2 数据展示与交互细节优化

除传统数值显示外，建议在 HMI 中增加状态卡片+趋势小窗+阈值标识的组合展示方式。例如，SOC、母线电压、储能功率等核心变量可同时显示当前值、正常范围和变化趋势，帮助运维人员快速判断是否存在潜在风险。对于可写参数，建议采用输入校验+越界提示+二次确认三步机制：先校验格式，再提示范围，最后确认生效，避免无效或危险参数直接写入 PLC。对于报警界面，可增加同类报警聚合故障处理建议模板一键跳转关联画面等功能，使 HMI 从显示终端升级为运维助手。若项目后续接入远程监控平台，建议保持变量命名与单位规范一致，避免出现本地与云端口径不统一的问题。

第 7 章 调试与测试

7.1 调试流程

系统调试采用硬件检查—单元测试—系统联调—回归验证的步骤开展。硬件阶段重点核对供电、接线极性、I/O 地址映射以及急停回路有效性；单元测试阶段逐项验证启停逻辑、自动/手动模式切换、并网联锁、报警触发与复位功能；系统联调阶段在不同输入条件下观察储能充放电使能、并离网指示及模拟量输出变化，确保控制逻辑与设计预期一致。

7.2 典型工况测试

在测试中设置四类典型工况：光伏不足时验证放电补偿策略、光伏富余时验证充电吸收策略、母线电压越限时验证报警闭锁策略、并网许可变化时验证并离网切换策略。测试结果表明系统能够按规则稳定切换模式，关键报警链路完整，故障复位流程清晰，满足工程应用对安全性、稳定性和可维护性的要求。

为提高测试结论可信度，建议在后续工作中补充边界工况测试与长时稳定性测试。边界工况可重点覆盖 SOC 临界点附近的模式切换稳定性、母线电压阈值附近的报警抗抖动能力以及并网条件快速变化时的联锁可靠性；长时稳定性测试可观察 24 小时以上连续运行中的温升、误报警率、执行件动作次数和数据完整性。通过补充这两类测试，可进一步验证系统在实际工程环境中的鲁棒性。

表 7-1 调试与测试结果汇总表

测试编号	测试场景	预期结果	实测结果	判定
T1	启停与急停测试	启动后自保持，急停后关键输出立即断开	与预期一致	通过
T2	自动/手动切换测试	模式切换后逻辑分支与指示状态同步	与预期一致	通过
T3	光伏不足放电补偿	放电使能置位，储能补偿负载缺口	与预期一致	通过

测试编号	测试场景	预期结果	实测结果	判定
T4	光伏富余充电吸收	充电使能置位，储能吸收富余功率	与预期一致	通过
T5	母线越限保护测试	越限延时后报警置位并闭锁高风险输出	与预期一致	通过
T6	并网联锁测试	满足联锁与延时条件后并网输出有效	与预期一致	通过

7.3 测试结果分析与工程结论

从测试过程看，系统在逻辑正确性、执行一致性和报警完整性方面表现稳定。启停与模式切换测试验证了状态机转换路径清晰，未出现互斥状态并存或异常自复位现象；并网联锁测试验证了许可条件+反馈条件+延时条件三重约束的有效性，能够在保障安全的前提下完成并网动作；过压欠压测试验证了延时机制对瞬态扰动具有良好抑制作用，减少了误报警和误闭锁。总体而言，系统符合先安全、后功能的工程控制原则。

进一步分析可知，本系统采用的规则控制方法在中小规模场景中具有明显优势：一是逻辑可解释性强，便于工程师排障和优化；二是实现复杂度适中，对硬件算力和通信条件要求较低；三是参数可在线调整，适合现场逐步整定。与此同时，也应认识到该方法在强不确定工况下的局限性，对未来负荷与光照变化缺乏前瞻能力，对经济性最优目标支持有限。针对这些问题，建议后续在不改变现有控制骨架的前提下，逐步引入预测辅助模块、参数自整定机制和事件驱动优化策略，形成基础规则控制+轻量智能优化的混合方案。

在工程交付层面，建议将测试工作从功能通过提升到全生命周期质量管理。除投运前的联调测试外，还应建立定期巡检和回归验证机制，每月进行一次关键联锁抽检、每季度进行一次参数合理性评估、每半年进行一次故障演练。通过持续测试可及时发现设备老化、参数漂移和操作偏差等隐患，防止小问题累积为系统性故障。此外，建议将测试记录标准化，形成可追溯的测试台账，内容至少包

括测试日期、工况设置、关键变量曲线、报警记录和处理结论，为后续运维决策提供数据支撑。

第 8 章 总结与展望

本文完成了基于 PLC 的光伏储能一体化控制系统全套设计与工程实现工作，围绕分布式光伏出力波动消纳、储能削峰填谷、并离网可靠切换及负荷稳定供电的实际工程需求，搭建了涵盖主电路拓扑设计、PLC 控制器 I/O 端口配置、核心控制策略编制、模块化 PLC 程序开发及 HMI 人机界面可视化监控的完整一体化技术管控链路。系统严格遵循工业自动化及光伏储能电站安全运行相关标准，实现光伏发电单元、储能单元、用电负荷与电网交互环节的协同联动集中管控，有效解决了光伏发电间歇性、随机性带来的供电不稳及消纳率偏低等实际问题。经过多工况现场联合调试与性能实测试验，整套控制系统运行响应迅速、工况切换平稳、功率调节精准可靠，可根据光伏实时出力与负荷波动自动完成储能充放电协同调控，显著提升光伏就地消纳水平，降低光伏并网对配电网的冲击扰动。同时，系统集成电池 SOC 荷电约束、交直流母线过欠压保护、并离网运行联锁及故障告警闭锁多重安全防护机制，有效规避电池过充过放、电网冲击、设备故障运行等安全风险，全方位保障电站设备与运维运行安全。该控制系统硬件布线规整、检修便捷，软件模块化程度高、参数调整灵活，具备良好的工程实用性、运行稳定性与后期可维护性，能够适配工商业光伏储能电站、园区微电网及乡村独立供电等多种应用场景。

为进一步提升系统智能化运行水平与综合应用价值，推动系统从基础可控运行向智能自治管控升级，后续可从三方面开展优化完善。其一，引入光照强度与用电负荷预测算法，结合滚动优化调控逻辑，改变系统被动实时调控模式，提前预判供需变化并优化储能充放电计划，有效提升电站整体运行经济性与能源利用效率。其二，融合电池 SOH 健康状态、工作温度、循环老化等多维度参数，优化单一 SOC 管控逻辑，构建寿命友好型精细化充放电策略，减缓电池老化衰减，延长储能设备服役周期，降低后期运维更换成本。其三，拓展标准化通信协议与云端数据对接接口，打通与 EMS 能源管理系统的数据协同通道，实现远程运维、故障溯源与参数在线调试，支撑多光伏储能站点集群统一调度，逐步实现系统智能感知、自主决策与智慧运维的高阶智能化运行目标。

致谢

本课题基于 PLC 的光伏储能一体化控制系统设计与研发工作，从课题选题方向敲定、整体研究框架搭建、核心控制方案论证，到硬件器件选型接线、PLC 控制程序编写调试及论文撰写修改完善，全程均在导师的悉心指导与耐心点拨下有序推进完成。研究过程中，导师凭借扎实的工业自动化控制专业功底、丰富的光伏储能工程实践经验以及严谨务实的科研治学态度，在系统控制策略优化、软硬件调试难点攻克、论文核心内容梳理等关键环节给予我诸多关键性指导和针对性改进建议，及时帮助我化解研究过程中遇到的技术瓶颈与设计困惑，让我能够顺利理清研究思路、完善系统设计、完成各项试验测试工作。同时，导师求真务实的科研作风、精益求精的治学理念和踏实严谨的工作态度，不仅助力我顺利完成本次毕业设计研究任务，更让我在专业知识学习、工程实践能力锤炼和科研思维培养等方面受益匪浅，在此，谨向我的指导老师致以最诚挚的谢意与最衷心的感谢。

在校学习及课题研究期间，衷心感谢学校为我们提供了完善的 PLC 实训实验室、光伏储能实验平台及各类专业学习资源，为本次控制系统硬件搭建、程序调试与性能测试工作提供了坚实的场地与设备保障，为专业理论知识落地实操、提升工程实践创新能力筑牢良好基础。同时，感谢身边同窗好友与实验室同门在课题研究过程中的互帮互助与一路陪伴，在系统调试、程序优化及论文撰写阶段，大家相互交流研究心得、共享调试经验、共同攻克技术难题，营造了浓厚良好的学习科研氛围。此外，由衷感谢家人一直以来的默默支持、理解与包容，成为我安心学业、潜心科研、攻坚克难的坚实后盾。最后，衷心感谢所有参与本次论文评审和答辩工作的各位专家与老师，感谢各位老师给予的宝贵评审意见与悉心指导，我将带着所学所知、所获所悟，在今后的学习和工作中继续深耕专业、踏实前行、不断精进。

参考文献

- [1]董洪霞,朱国强. 基于 PLC 的光伏储能一体化控制系统设计与实现[J].电气时代,2025,(11):94-96.
- [2]李泽帅. 基于 PLC 技术的风光储一体新型电力系统设计探析[J].仪器仪表用户,2025,32(07):130-132+135.
- [3]潘群. 基于 PLC 控制的风光互补系统研究[J].电工技术,2025,(12):16-20.
- [4]查俊杰.太阳能耦合压缩空气循环脉冲滴灌装置研发及初步应用[D].西北农林科技大学,2025.
- [5]龚波. 站控系统在超高海拔地区离网型“氢氧电热”多能联供系统中的应用[J].节能,2025,44(05):59-62.
- [6]柏杰,张海丽,胡海,等. 光伏储能智慧农业监测在花卉温室大棚中的应用[J].工业控制计算机,2025,38(01):174-176.
- [7]王萃萃,杨辉,李建峰. 风光储一体新型电力运维系统设计与分析[J].电工技术,2024,(24):147-150+165.
- [8]郭英芳. 基于风-光互补的温室大棚供电系统设计[J].科技视界,2024,14(21):89-92.
- [9]马海涛.计及温控负荷的光储型园区双层优化调度控制策略研究[D].北京交通大学,2024.
- [10]侯倩,彭坤,董小彤,等. 面向新型电力系统的监控系统设计与实现[J].信息化研究,2023,49(06):52-59.
- [11]黄一清,冯冬雷. 基于 PLC 风光储一体的新型电力系统的设计[J].黑龙江科学,2023,14(22):97-99.
- [12]李智博.基于 PLC 的光伏储能一体化控制系统设计[D].大连交通大学,2023.
- [13]王越.基于 IEC 61499 的嵌入式软 PLC 设计与应用研究[D].浙江大学,2023.
- [14]周伯伟. 绿色船舶能量管理系统设计与研究[J].工业技术与职业教育,2023,21(02):17-20.
- [15]杨泽勋.源/荷扰动影响下的孤岛微网群协调控制策略与平台验证研究[D].南京邮电大学,2022.
- [16]徐德光.差值功率处理结构光伏系统的优化控制方法及应用研究[D].中国

矿业大学,2022.

[17]马楚韵.公路侧光伏发电群协调控制策略研究[D].中国地质大学(北京),2022.

[18]全学文.沙漠地区光伏发电提水灌溉系统控制的研究[D].内蒙古科技大学,2020.

[19]赵峥.离网式光伏储能式电动汽车充电桩的研究[D].内蒙古科技大学,2020.

[20]黄志洪,叶洪江,周表. 基于 PLC 控制的混合整数线性规划家庭多能源能量管理系统的研究[J].电工技术,2020,(08):11-13.