



# 边远农牧地区孤岛运行光储交直流微电网控制策略研究

于溱<sup>1</sup>, 曹效义<sup>2\*</sup>, 杨柄元<sup>1</sup>

1. 内蒙古工业大学 电力学院, 呼和浩特 010080;

2. 内蒙古电力经济技术研究院, 呼和浩特 010020

**摘要:** 光储微电网主要包括光伏发电单元、储能设备、互联变换器和交直流负荷。在孤岛运行时, 存在电能质量差、系统稳定性差等问题, 因此需要建立发电、储能和交直流负荷间的自动功率协调控制策略, 保证光能高效利用, 维持系统的安全与稳定。为此, 提出一种适用于光储一体微电网在孤网运行模式下的自动功率协调控制策略。对直流-直流变换器采用稳压控制, 为逆变器提供稳定的直流电压, 提高系统稳定性, 对交直流变换器采用恒压恒频控制策略维持交流侧稳定的功率输出, 以直流母线电压为平衡节点, 发电单元、储能单元、互联变换器三者协同动作, 实现网间自动功率协调。基于偏远农牧户和边防哨所用电工程设计案例, 通过Simulink/Matlab仿真平台, 验证了该控制设计策略可实现光储一体孤岛微电网的自动功率协调控制。

**关键词:** 光伏发电; 储能系统; 光储一体孤岛微电网; 自动功率协调

**中图分类号:** TM7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-4969(2026)01-0028-13

## 引言

内蒙古的偏远农牧户虽说早已告别“油灯粪火”的时代, 但是用电难的问题仍然存在, 因此, 通电升级工程依然是内蒙古自治区的重大民生工程。针对此

项工作, 2024年聚焦服务和改善民生, 要为2万余户偏远农牧民从根本上解决用电不稳定问题, 在筑牢祖国北疆安全稳定屏障中展现国企责任担当, 实现功率大、可靠性高、稳定性强的新能源入户, 全面解决设备不足、储能不够等供电问题。当前, 在远离大电网

**收稿日期:** 2024-10-12 **修回日期:** 2025-05-03

**作者简介:** 于溱 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术。E-mail: 1465437937@qq.com

\*曹效义 (1966—), 男, 国家注册电气工程师, 正高级工程师, 研究方向电力系统咨询、电气设计。E-mail: 3128433133@qq.com (通讯作者)

杨柄元 (1967—), 男, 教授, 研究方向为电力系统规划运行分析、继电保护。E-mail: yangbingyuan@imut.edu.cn

**引用格式:** 于溱, 曹效义, 杨柄元. 边远农牧地区孤岛运行光储交直流微电网控制策略研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(1): 28-40. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240138. CSTR: 32282.14.JES.20240138

YU Z, CAO X Y, YANG B Y. Research on Automatic Power Coordination Control Strategy of Off-Grid Optical Storage AC-DC Microgrid[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(1): 28-40. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240138. CSTR:32282.14. JES.20240138

覆盖的偏远农牧地带,“光储一体化”技术业已实现全天候稳定、不间断的绿色电力供应,为当地居民的生产与生活用电提供了坚实保障,彰显了新能源技术在提升偏远区域能源自给能力和促进可持续发展方面的显著成效。

微电网是一种将分布式电源、负荷和储能装置作为整体,既可并网运行也可孤岛运行的新型电网。微电网并网运行时,对电网而言,微电网是一个整体接口,因而可将其看作是独立统一的可控单元;电网故障或需要检修时,微电网可离网孤岛运行,维持对重要负荷的持续供电。依据微电网所接入母线类型的不同,微电网有三种结构形式:交流、直流以及交直流混合微电网,交直流混合微电网融合了交流微电网与直流微电网的优势,能够同时为交直流负荷供电。它既可以独立控制交/直流微电网,也可以实现协调控制,从而显著提升了微电网的可靠性,使得交直流微电网成了未来微电网发展的重要趋势<sup>[1]</sup>。在孤网运行模式下的光储交直流混合微电网中,如何有效实现光伏发电单元、储能以及负荷间的自动功率协调控制,确保直流母线电压稳定,保障微电网安全运行,已成为该领域研究的热点<sup>[2-5]</sup>。

孤网运行的光储交直流微电网主要由光伏阵列、储能装置、互联变换器,以及交直流负荷构成,是一种小型发配电系统。张哲伟等<sup>[6]</sup>和周建萍等<sup>[7]</sup>通过储能系统和互联变换器来实现功率双向流动,通过蓄电池充放电进行削峰填谷,平抑电网能量波动对功率平衡带来的影响。杨向真等<sup>[8]</sup>则提出了一种多模式功率协调控制策略,将直流子网整体视为具备下垂特性的直流发电单元进行研究。然而,上述两者均未考虑微电网功率盈缺状态及储能SOC(荷电状态)过充/过放对微电网可靠性的影响。王智方等<sup>[9]</sup>和杨旭红等<sup>[10]</sup>通过对储能系统双向DC-DC(直流-直流)变换器采用双闭环PI(比例-积分)控制实现了稳定直流母线电压的效果。但并未考虑交流负荷的投切对直流母线电压的影响。赫亚庆等<sup>[11]</sup>通过改进光伏逆变器的控制策略来提升电能质量,为实现分布式发电机组之间的负荷合理分配,通常采用下垂控制来控制储能逆变器。吕晨宇等<sup>[12]</sup>提出了一种分布式发电单元和蓄电池储能单元间的协同控制能量管理策略。他们分别用

下垂控制方法以及PQ恒功率控制法完成对储能系统的控制<sup>[11-12]</sup>,但对于交直流侧的协调控制仍存在不足之处,也没有通过完整的交直流系统模型进行验证。

因此,本文针对孤网运行的交直流混合微电网,其包含光伏发电单元、储能、互联变换器,以及交直流负荷,基于实际案例提出了一种基于直流母线电压量测的光储交直流微电网自动功率协调控制策略,构建了完整的孤岛运行光储交直流混合微电网数学模型,并通过Matlab/Simulink仿真平台进行验证,结合具体工程实例,在偏远农牧地区实现稳定供电。以期为孤岛运行的光储交直流混合微电网提供参考。

## 1 光储交直流微电网构成

图1展示了一个典型孤网运行模式下的光储交直流微电网控制结构图。在此结构中,直流子网融合了光伏发电单元、蓄电池储能单元以及直流负荷。直流负荷直接并联于直流母线之上,确保了电能是直接供应。光伏发电单元则通过高效的升压斩波(BOOST)电路与直流母线紧密相连,优化了能量的传输效率。同时,蓄电池储能单元利用双向DC-DC变换器接入直流母线,实现了能量的存储与释放。另一方面,交流子网由直接挂在交流母线上的交流负荷构成。交流母线与直流母线之间通过互联变换器实现无缝连接,不仅确保了交直流子网之间的能量交换,还共同构建了一个完整且高效的微电网系统。这样的设计充分展现了光储交直流微电网在孤网运行模式下的灵活性与可靠性<sup>[13-14]</sup>。

## 2 光储交直流微电网自动功率协调策略

### 2.1 光伏发电单元控制策略

根据日常生活的光照条件,为了提高光伏利用率,光伏发电单元采用MPPT控制模式。光伏发电组件通过最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)实现最大功率追踪后,经过BOOST变换器进行升压来达到直流母线电压要求<sup>[15]</sup>。

**2.1.1 光伏发电MPPT控制** 本文采用电导增量法来

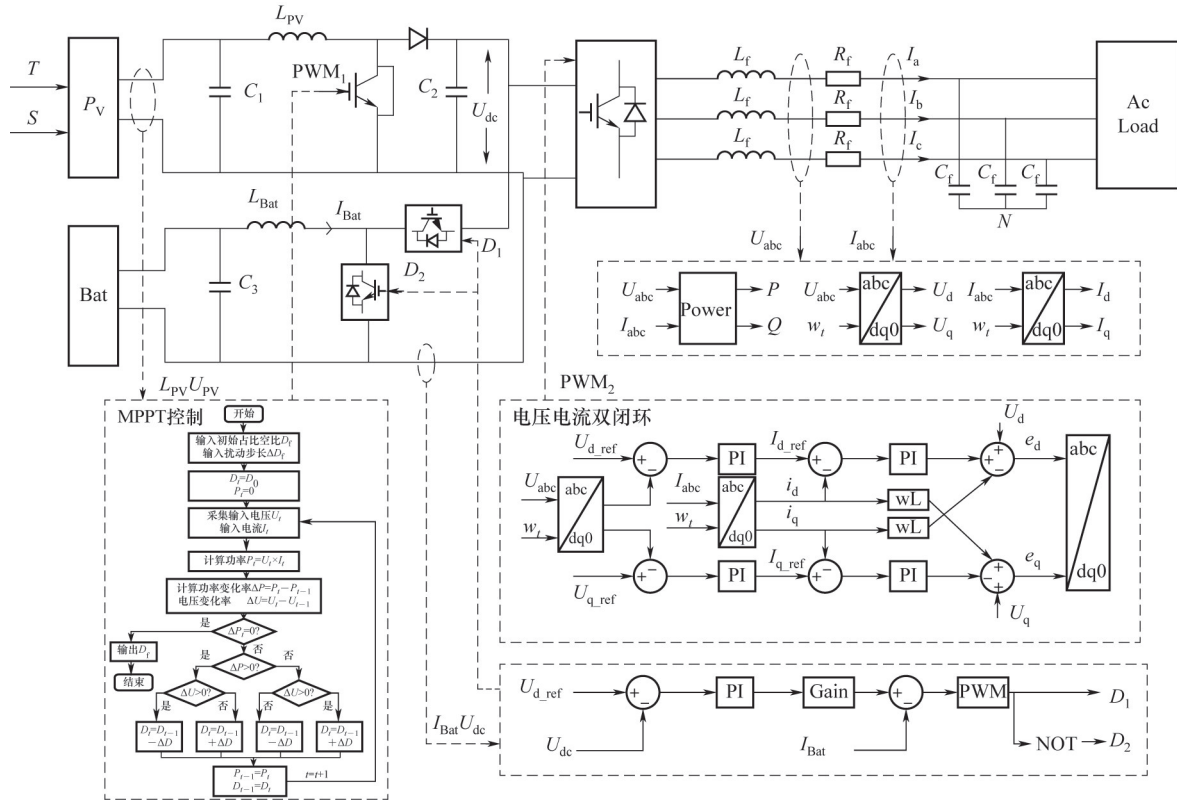


图1 光储交直流微电网控制图

Figure 1 Photovoltaic storage AC-DC microgrids

实现光伏电池 MPPT 控制, 通过观察图 2 光伏发电单元  $P/U$  曲线图可以得出, 当光伏电池功率电压特性曲线斜率为 0 时, 光伏电池功率输出达到最大值。

根据光伏电池输出功率公式  $P=U \times I$ , 对电压求导可得  $\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU}$ , 先对光伏发电单元输出电压

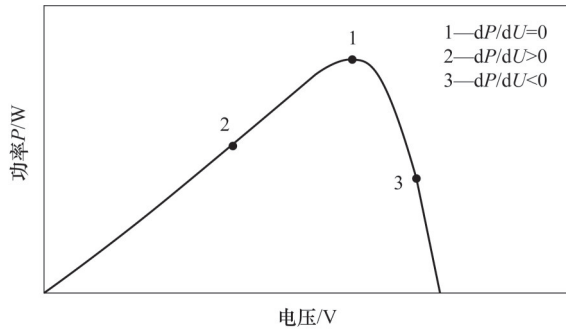


图2 电导增量法最大功率点判别图

Figure 2 Discriminant diagram of the maximum power point of the conductance increment method

$U_{pv}$ 、输出电流  $I_{pv}$  进行采样拟合, 当光伏电池工作在最大功率点时满足  $\frac{dP}{dU} = 0$ , 可推得式 (1):

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \quad (1)$$

因此, 可以通过光伏电池本身的参数来确定  $-I/U$  的值, 既通过  $dI_{pv}/dU_{pv}$  与  $-I_{pv}/U_{pv}$  来判断光伏电池的工作区域, 通过调整  $U_{pv}$  来调整光伏电池的输出功率。当  $dI_{pv}/dU_{pv}$  小于  $-I_{pv}/U_{pv}$  时, 光伏电池工作区域位于最大功率点右侧, 那么系统应降低  $U_{pv}$ , 升高  $P_{pv}$ ; 当  $dI_{pv}/dU_{pv}$  大于  $-I_{pv}/U_{pv}$  时, 光伏电池的工作区域位于最大功率点左侧, 那么系统应增大  $U_{pv}$ , 升高  $P_{pv}$ 。电导增量法可以使光伏电池对辐照度的变化、所处环境温度的改变进行快速地跟踪, 实现最大功率输出。

**2.1.2 BOOST 变换器控制** 将光伏发电单元的输出电压  $U_{pv}$ 、输出电流  $I_{pv}$  分别当作 BOOST 升压电路的输入电压、输入电流; 输出侧各部件等效为电子负

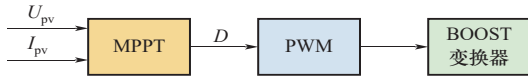


图3 BOOST变换器框图

Figure 3 Block diagram of the BOOST converter

载, 尽可能地提高功率因数, 则负载可等效为  $R_{dc}$ , 输出电压为  $U_{dc}$ , 输出电流为  $I_{dc}$ 。BOOST 变换器控制框图如图3所示<sup>[16]</sup>。

其中, 输入电压与输出电压满足:

$$U_{pv} = (1-D)U_{dc} \quad (2)$$

将电路视为理想电路, BOOST 输入功率等于输出功率, 则满足:

$$I_{dc} = (1-D)I_{pv} \quad (3)$$

$$R_{in} = \frac{U_{pv}}{I_{pv}} = R_{dc}(1-D)^2 \quad (4)$$

式中,  $R_{in}$  为BOOST 等效电路输入阻抗。当等效负载恒定时, 通过调节BOOST 电路占空比  $D$  调节  $R_{in}$  的大小, 调节至与光伏发电单元输出阻抗相匹配时便可实现光伏发电单元的最大功率追踪控制。

## 2.2 储能系统控制策略

储能单元作为支撑单元存在于光储交直流微电网中, 当光伏发电单元所产生的能量有盈余时, 储能单元可以对其进行消纳, 当光伏发电单元所产生的功率不能满足电网需求时, 储能单元可为负荷提供能量。本文采用电化学储能, 储能系统主要由蓄电池、双向DC/DC变换器组成<sup>[17]</sup>。

**2.2.1 双向DC/DC变换器** 双向DC/DC变换器是储能系统中的重要组成部分, 控制着蓄电池电流方向, 完成蓄电池的充放电。由两个绝缘栅双极晶体管(IGBT)、电容以及电感组成。通过分别控制  $S_1$  与  $S_2$  的开通与关断可以实现电荷在网间与蓄电池间的双向流动。其原理图如图4所示<sup>[18-19]</sup>。

充电时, 电能从微电网中向蓄电池中流动, 即由右向左流动, 双向DC/DC变换器处于BUCK (降压直流变换) 模式, 此时开关状态为:  $S_1$  可控,  $S_2$  关断。将  $S_1$  导通时, 微电网多余的电能通过电感和电容对蓄电池进行充电; 将  $S_1$  关断,  $S_2$  反向二极管导通时, 电感释放剩余电能, 电能进入蓄电池进行

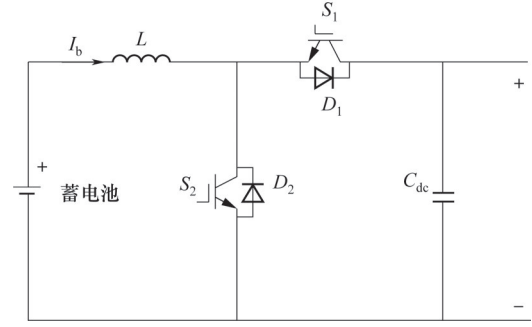


图4 双向DC/DC变换器原理图

Figure 4 Schematic diagram of a bidirectional DC/DC converter

充电。

放电时, 电能由蓄电池流向微电网, 即由左向右流动, 双向DC-DC变换器处于BOOST 升压模式, 此时开关状态为:  $S_2$  可控,  $S_1$  关断。将  $S_2$  导通时, 蓄电池经由电感和电容对微电网负荷进行供电; 将  $S_2$  关断,  $S_1$  反向二极管导通时, 由蓄电池联合电感对微电网负荷进行供电<sup>[20-21]</sup>。

**2.2.2 充放电控制策略** 采用电压电流双闭环控制回路, 外环电压控制, 内环电流控制。电压外环维持母线电压, 保证母线电压稳定不波动; 电流内环控制蓄电池充放电电流, 保障电力电子器件安全的同时缩短系统响应时间。

当母线电压低于参考电压时, 光伏发电单元发出功率无法满足负荷需求, 产生用电缺口, 蓄电池工作在放电状态, 为系统提供能量; 当母线电压高于参考电压, 负荷需求小于光伏发电单元发出功率, 电能有盈余, 蓄电池工作在充电状态, 吸收系统多余的能量。这将导致蓄电池存在过充过放的问题, 因此设定SOC上下限值  $20\% \leq \text{SOC} \leq 80\%$ , 超过SOC界限值时蓄电池退出工作, 从而保护蓄电池, 提升电池寿命<sup>[22]</sup>。

## 2.3 光储交直流微电网互联逆变器控制

互联逆变器主电路结构如图5所示, 其中,  $L$  为滤波电感,  $R$  为滤波电阻;  $U_{dc}$  为逆变器直流侧输入电压,  $I_{dc}$  为逆变器直流侧输入电流;  $U_{wa}$ 、 $U_{wb}$ 、 $U_{wc}$  是逆变器的三相输出相电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为逆变器三相输出相电流;  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为交流母线三相相电压<sup>[23-25]</sup>。

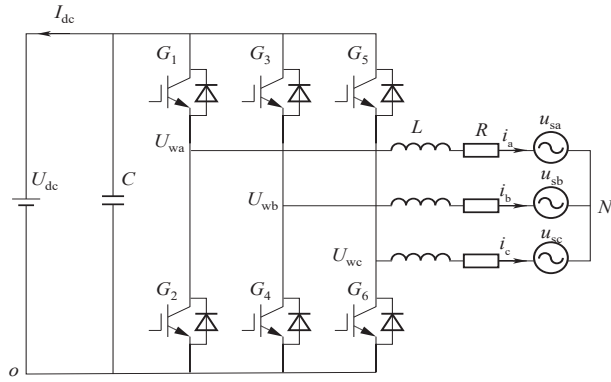


图5 互联逆变器主电路结构图

Figure 5 Diagram of the main circuit of the interconnection inverter

理想状态下, 可以用两种开关信号来描述逆变器的开关状态, 在逆变器同相桥臂上的两个开关互补。例如,  $G_1$  关断,  $G_2$  开通时,  $S_b$  为 1, 即 b 相开关信号为 1, 则对于直流输入电压来说, b 相的输出电压  $u_{sbo} = U_{dc}$ 。反之,  $S_b$  为 0, 则  $u_{sbo} = 0$ , 其中  $S_b$  为 b 相开关信号。

孤网运行的交直流混合微电网不与大电网相连, 交流子网缺少电压和频率的支撑, 故而互联变换器采用恒压恒频的控制策略, 来为交流子网提供可靠的电压、频率支撑。首先将交流侧的电压  $U_{abc}$  进行坐标变换, 得到 d、q 轴分量  $U_d$  和  $U_q$ , 通过与  $U_{d\_ref}$  和  $U_{q\_ref}$  进行比较后, 进入到 PI (比例积分) 调节器, 从而得到  $I_{d\_ref}$  和  $I_{q\_ref}$ , 之后与电流  $I_d$  和  $I_q$  进行比较, 利用 PI 调节获得电压参考值, 再通过坐标反向转, 产生 PWM (脉冲宽度调制) 波形, 完成 VF (电压-频率) 控制, 提供稳定的电压和频率参考。其中, 采用电压外环对交流微电网输入端电压进行稳压, 以确保功率

能顺利地传输到交流微电网中, 内环是电流内环, 用来完成对外换有功电流指令的控制和对无功电流进行追踪。互联变换器控制框图如图 6 所示。

### 3 自动功率协调控制策略

在独立运行的光储-交直流微网中, 光伏组件、储能系统、互联变换器, 以及交直流负载, 各个部分运行特性不同, 因此需要制定合理有效的协调控制策略, 实现微电网安全可靠运行的同时, 保障系统的功率平衡。针对目前我国独立运行的光储-交直流微网中所存在的问题, 本文研究了光储-交直流混合微网的拓扑和运行特征, 提出了一种协同优化控制方法。最终达到在交流和直流负载改变情况下, 母线电压保持稳定, 电力稳定供应, 确保微网的安全、可靠运行。在直流子网中, 满足:

$$U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{(P_{pv} + P_{Bat} - P_{dcLoad} - P_t)}{C} \quad (5)$$

式中,  $P_{pv}$  为光伏发出功率;  $P_{Bat}$  为储能系统输出功率;  $P_{dcLoad}$  为直流负荷功率;  $P_t$  为互联变换器传输功率;  $C$  为直流母线电容。

由式 (5) 可得, 利用蓄电池储能装置对直流母线的电压进行稳定调节, 从而达到平衡微电网内功率的目的。在直流微电网中, 光伏电池在最大功率跟踪模式下实时工作, 以最大限度地发挥太阳能的作用, 而蓄电池储能装置则采用双向 DC-DC 转换器进行充放电。在母线电压超过基准值时, 蓄电池储能装置将会处于一个充电的状态, 以消耗多余的能量, 直到电

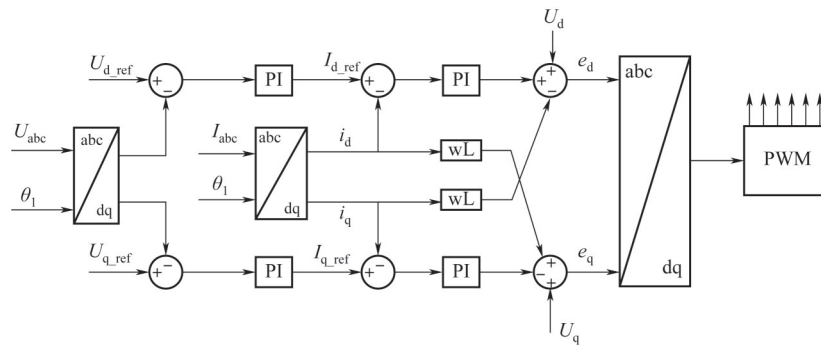


图6 互联变换器控制框图

Figure 6 Control block diagram of the interconnected converter

池 SOC 到达设定的上限值, 蓄电池储能装置暂停充电。在母线电压降至设定值之下时, 蓄电池储能装置将会处于一个放电的状态, 对系统能量进行补偿, 使直流母线的电压得以稳定, 直至电池 SOC 达到设定的下限值, 蓄电池储能装置暂停放电。通过控制蓄电池储装置的充电和放电来达到对直流微电网母线电压的稳定控制, 保证了直流子网的功率平衡<sup>[5]</sup>。

交流子网中, DC-AC 互联变换器始终工作在 VF 模式, 为交流子网提供稳定的电压和频率, 维持交流子网的稳定运行, 保证了交流子网的功率平衡。

4 工程设计案例研究

4.1 工程概况

根据《内蒙古自治区人民政府办公厅关于印发自治区保障偏远农牧户基本生活和基本生产通电升级工程实施方案的通知》<sup>[26]</sup>统计, 全区未通网电且有通电需求用户位于 8 个盟市 37 个旗县, 总户数为 39567 户, 分别为锡林郭勒盟 19282 户、呼伦贝尔市 7481 户、阿拉善盟 5046 户、巴彦淖尔市 3294 户、鄂尔多斯市 1374 户、包头市 1236 户、乌兰察布市 1163 户、赤峰市 691 户。依据要求, 以“新能源供电系统为主, 兼顾电网延伸通电”为原则, 分类解决偏远农牧户和边防哨所用电问题。对不满足电网延伸通电条件的用户通过采取新能源供电方式解决用电问题。

本案例目前已经实施, 主要聚焦于全区偏远农牧户及边防哨所的通电工程项目, 不仅致力于直接改善目标群体的用电状况, 还在实施过程中积极倡导生态保护意识。针对位于生态红线区域内的生产生活用电, 项目团队积极引导用户考虑搬迁, 特别是那些有意愿且具备搬迁条件的用户。而对于选择原地居住的用户, 则原则上通过高效、环保的新能源供电系统来满足其电力需求, 从而在保障民生用电的同时, 也促进了生态环境的保护与可持续发展。

4.2 用电负荷情况

结合近年来相关盟、市技术论证方案, 实地考察, 对自治区偏远农村牧区居民生活用电需求及用电

量进行大量统计, 现取用案例中位于锡林浩特市阿巴嘎旗吉尔嘎朗图苏木某户偏远农牧户用电总量作为本次仿真数据, 如表 1。

表1 吉尔嘎朗图苏木某农牧户用电需求总用电量统计表  
Table 1 Statistics of electricity demand and electricity consumption in remote rural and pastoral areas of our region

| 用电器名称 | 消耗功率/W |
|-------|--------|
| 照明    | 300    |
| 电视    | 120    |
| 冰箱    | 150    |
| 通信    | 20     |
| 电饭锅   | 1500   |
| 电磁炉   | 1800   |
| 净水机   | 25     |
| 小水泵   | 500    |

4.3 具体工程设计方案分析研究

在内蒙古偏远牧区, 由于原有的新能源设备功率低、发电不稳定等原因, 农牧民家里的洗衣机冰箱等电器无法有效使用, 时常出现停电问题。为保障偏远农牧民的基本生产和生活, 按照自治区党委和政府决策部署内蒙古能源集团负责实施, 通电升级工程覆盖全区两万余户偏远农牧民。对于采用光储一体化方案的农牧户通过安装 4×550 W 光伏电池, 12 V 蓄电池等配套设备进行供电, 该工程案例已于 2024 年 11 月低完成预验收。

项目地位于内蒙古边远地区。用电负载主要是农牧户的基本生活、基本生产设备, 工作电压为交流 220 V。农牧区户用总容量为 2 kW 采用 4 块 550 W 光伏组件, 结合近年来盟市相关技术论证方案, 我区偏远农村牧区居民生活用电需求及用电量如表 1 所示。2 kW 离网光储系统由 2.2 kW 光伏发电, 利用蓄电池储能, 通过对光伏的功率跟踪、蓄电池充放电控制、交流输出给负载完成供电。考虑用电同时率, 该方案可满足居民日常生产生活用电。

4.4 偏远农牧地区情况分析

偏远农牧地区因其独特的地理环境、气候特征及社会经济条件, 在电力供应模式和应用场景方面呈现

出显著的区域特性。这些地区通常地处偏远, 地形条件复杂, 气候环境多变 (如高海拔、强风沙、极端温差等), 这对供电设备的可靠性提出了更高要求。

**4.4.1 技术方面** 偏远农牧地区的电力需求具有显著的分散性、低负荷密度和季节性波动特征, 主要集中于生活用电和小规模生产活动 (如照明、水泵等)。偏远农牧地区面临传统电网覆盖难度大、供电可靠性较低的突出问题。然而, 这些地区往往具有丰富的太阳能、风能等可再生能源资源, 为发展分布式能源系统提供了优越的自然条件。分散式能源系统不仅能够实现能源自给自足, 还能有效降低对外部电网的依赖, 成为解决偏远地区电力供应问题的可行路径。

**4.4.2 运维管理方面** 偏远农牧地区面临技术资源匮乏的显著挑战, 传统的人工运维模式难以满足实际需求。因此, 这些地区主要依托远程监控技术和智能化管理系统来保障电力系统的稳定运行。通过引入先进的物联网技术、大数据分析和智能算法, 偏远农牧地区的电力系统能够实现实时监控、故障预警和智能调度, 从而显著提升供电可靠性和运维效率。

**4.4.3 经济方面** 偏远农牧地区的电网建设成本较高, 但分布式能源系统的长期运行成本较低, 并能显著降低运输费用, 为当地居民和企业提供了经济的电力解决方案。偏远农牧地区的电力供应不仅影响区域经济发展, 还直接关系到居民生活质量和社会稳定。电力供应的改善能够促进当地经济活动的开展, 从而推动区域经济增长。同时, 稳定的电力供应还能显著提升居民生活水平, 为偏远地区的经济发展提供重要支撑。

综上所述, 偏远农牧地区在电力供应和应用场景方面形成了独特的区域模式。其特殊的地理环境、资源禀赋和社会经济条件, 决定了分散式能源系统在这一地区的重要性和适用性。通过因地制宜地发展分散式能源系统, 偏远农牧地区不仅能够有效解决电力供应难题, 还能为区域经济发展和进步注入新的动力。

## 5 仿真验证

仿真依据《内蒙古自治区人民政府办公厅关于印

发自治区保障偏远农牧户基本生活和基本生产通电升级工程实施方案的通知》为背景, 对不满足电网延伸通电条件的偏远农牧户, 采取新能源供电方式解决基本生活和基本生产等用电问题。时间设置为 6 s, 模拟偏远农牧地区居民生活用电, 利用太阳能进行发电, 蓄电池作为储能单元, 直流母线电压 750 V, 交流母线电压有效值 380 V, 互联变换器采用恒压恒流控制方式。

### 5.1 储能系统稳压控制策略仿真

借助 Matlab/Simulink 平台进行仿真, 设置直流母线电压 750 V, 按上述储能系统控制策略搭建模块, 仿真时间 1.5 s, 输出电压波形如图所示。可以看出储能系统通过稳压控制, 在 0.3 s 左右将直流母线电压稳定在了 750 V, 稳定效果良好。

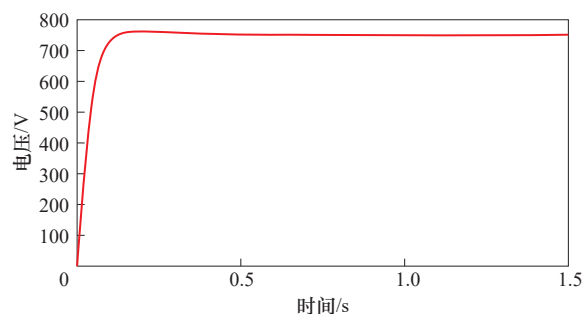


图7 储能稳压控制电压波形图

Figure 7 Waveform diagram of energy storage voltage regulation control voltage

### 5.2 光伏系统MPPT仿真测试

搭建光伏系统仿真模型, 仿真时间 1.5 s, 设置温度 25 °C, 初始光照强度为 1 kW/m<sup>2</sup>, 在 0.5 s 时将光照强度提高到 1200 kW/m<sup>2</sup>, 1 s 时将温度提高到 35 °C, 仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 光伏系统 MPPT 实现了最大功率的追踪, 在外部光照强度、温度发生变化时, MPPT 控制都能实现准确追踪, 效果良好。

### 5.3 互联变换器控制策略仿真

搭建互联变换器仿真模型, 要求其实现  $V/F$  控制, 为交流微电网提供 380 V 电压与 50 Hz 频率参考,

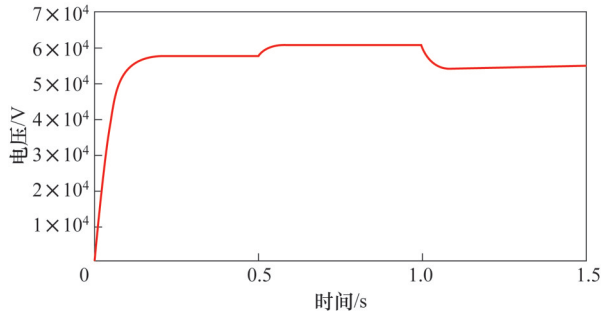


图8 光伏系统MPPT仿真测试图

Figure 8 MPPT simulation test diagram of photovoltaic system

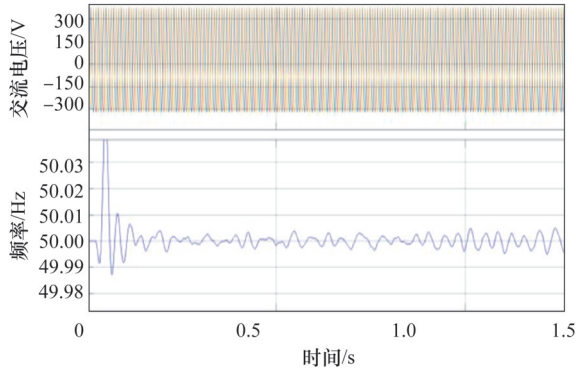


图9 交流子网电压、频率波形图

Figure 9 AC subnet voltage and frequency waveforms

仿真结果如图9所示。

由图9可知, 对交直流互联变换器采用的  $V/F$  控制, 可以对交流子微网提供良好的电压参考和频率参考。

#### 5.4 自动功率协调控制策略仿真

搭建孤网运行光储交直流微电网完整模型, 直流母线电压控制在 750 V, 交流母线电压有效值 380 V, 互联变换器采用恒压恒频控制方式, 场景选取为晴天上午, 辐照度逐渐增强, 辐照度变化如图10所示。

设定起始光照强度为  $500 \text{ W/m}^2$ , 随时间不断增加, 2 s 时达到  $1000 \text{ W/m}^2$ , 4 s 后达到峰值  $1600 \text{ W/m}^2$ 。

光伏输出功率如图11所示。

光伏输出功率随着辐照度的增加而逐渐上升, 在不同的辐照度下稳定追踪最大输出功率。

对日常家用电器进行投切, 负荷吸收功率如图

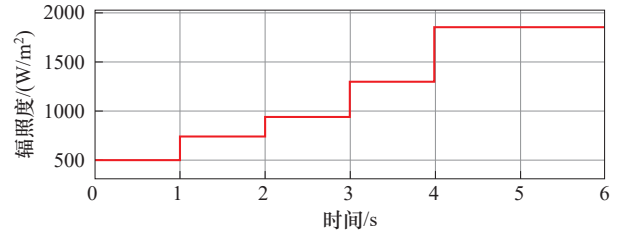


图10 辐照度变化曲线

Figure 10 Irradiance curve

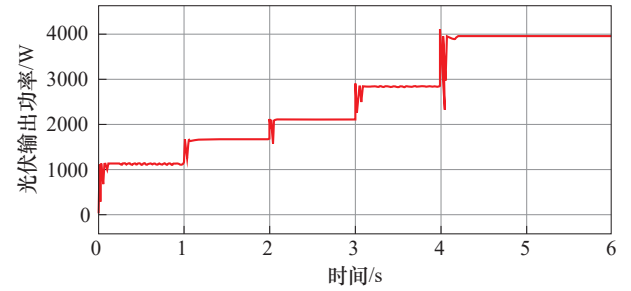


图11 光伏输出功率

Figure 11 Photovoltaic cell output power

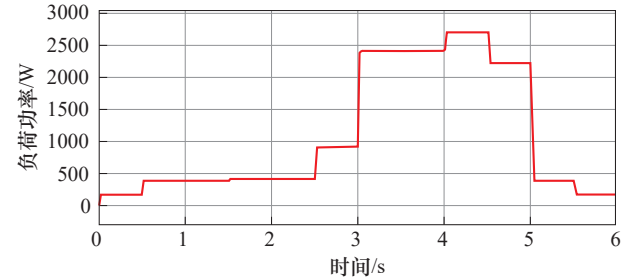


图12 负荷功率曲线图

Figure 12 Load power curve

12所示。

负荷投切时, 微电网内能量发生变化, 储能系统通过充放电进行功率协调控制, 储能系统充放电功率如图13所示。

直流母线电压如图14所示, 稳定在 750 V 左右, 负荷投切时也能迅速稳定。

如图15所示互联变换器始终将交流微电网电压和频率维持在 380 V 和 50 Hz 左右, 在投入/切除负荷发生波动时, 也能够重新稳定。

本次仿真时长设置为 6 s, 初始辐照度为  $500 \text{ W/m}^2$ , 随时间的增加, 辐照度逐渐增加到  $1600 \text{ W/m}^2$ , 光伏输出功率从 1000 W 逐渐增加到 4000 W。初始光

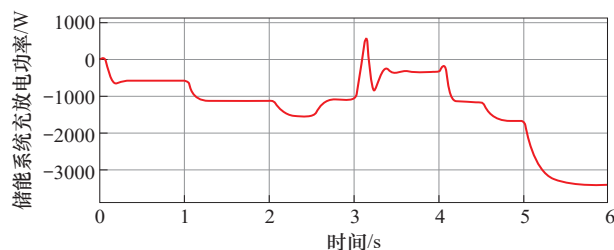


图13 储能系统充放电功率

Figure 13 Charging and discharging power of the energy storage system

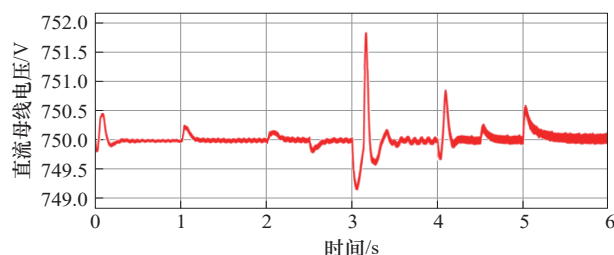


图14 直流母线电压

Figure 14 DC bus voltage

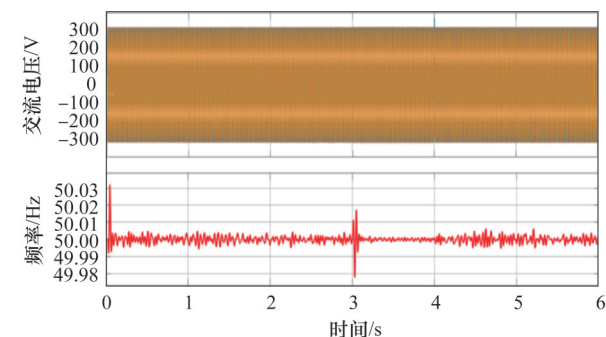


图15 交流微网电压、频率图

Figure 15 AC microgrid voltage and frequency diagram

功率输出为  $1000 \text{ W/m}^2$ , 在  $1 \text{ s}$  时突变到  $1500 \text{ W/m}^2$ ,  $2 \text{ s}$  时突变到  $2000 \text{ W/m}^2$ ,  $3 \text{ s}$  时突变到  $2860 \text{ W/m}^2$ ,  $4 \sim 6 \text{ s}$  内为  $4000 \text{ W/m}^2$ 。负荷在  $0 \sim 0.5 \text{ s}$  为  $150 \text{ W}$ ,

$0.5 \text{ s}$  增加  $200 \text{ W}$  到  $350 \text{ W}$ ,  $1.5 \text{ s}$  增加到  $400 \text{ W}$ ,  $2.5 \text{ s}$  增加到  $900 \text{ W}$ ,  $3 \text{ s}$  时增加到  $2400 \text{ W}$ ,  $4 \text{ s}$  时增加到  $2700 \text{ W}$ ,  $3.5 \text{ s}$  时减到  $2200 \text{ W}$ ,  $5 \text{ s}$  时减到  $350 \text{ W}$ ,  $5.5 \text{ s}$  减到  $150 \text{ W}$ 。在负荷变动的同时, 储能系统通过充放电控制一直保持母线电压恒定, 保持系统功率平衡。实现了孤网运行的光储交直流微电网的自动功率协调控制, 说明该控制策略可以在远离大电网的偏远农牧地区可以很好的实现生产生活供电。

## 6 结论

在偏远农牧区的微电网一般孤岛运行, 光伏电源输出功率具有随机性、波动性以及负荷功率突变等, 这些问题可能导致系统不稳定, 控制系统电压和频率成了亟待解决的问题。本文基于光储一体孤岛微电网自动功率协调控制策略研究, 针对远离大电网, 偏远农牧地区居民生活用电, 通过 Matlab/Simulink 平台搭建了光伏发电单元、储能单元、互联变换器以及交直流负荷的仿真模型和相应的控制策略, 由此组成了孤网运行的光储交直流混合微电网, 并提出一种自动功率协调控制策略, 该控制策略可以在负荷变动的同时, 微电网快速响应, 维持系统的安全运行, 保障系统功率平衡。本文结合具体工程案例分析, 验证了该策略的可行性, 为在远离大电网的偏远地区使用光储交直流混合微电网实现了稳定的生产生活供电。这种模式的成功实践, 不仅为类似地区提供了可借鉴的经验, 也为推动能源转型和实现可持续发展目标提供了重要参考。未来的研究应进一步深入探索其控制策略、储能系统管理、系统保护与安全性等方面的问题, 以推动该技术的广泛应用和发展。

## 参考文献

- [1] 岳应娟, 凤林, 蔡艳平, 等. 交直流混合微电网运行控制技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12242-12252.  
Yue Y J, Feng L, Cai Y P, et al. AC-DC hybrid microgrid operation control technology[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12242-12252.
- [2] 安允展, 张亚亚, 董学育. 自抗扰控制在直流微网混合储能中的应用[J]. 电工技术, 2019(6): 97-100.  
An Y Z, Zhang Y Y, Dong X Y. Application of active disturbance rejection control in hybrid energy storage of DC microgrid[J]. Electric Engineering, 2019(6): 97-100.

- [3] 曹善康, 马啸, 汪光远, 等. 网侧故障下系统友好型直流微网协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7950-7963.  
Cao S K, Ma X, Wang G Y, et al. System-friendly DC microgrid coordination control strategy under AC grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7950-7963.
- [4] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-98.  
Wang C S, Li W, Wang Y F, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98.
- [5] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.  
Li X L, Guo L, Huang D, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [6] 张哲伟, 韩肖清, 张鹏, 等. 光储交直流混合微电网协调控制策略及试验设计[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 203-208.  
Zhang Z W, Han X Q, Zhang P, et al. Coordinated control strategy and its experimental design for photovoltaic and energy storage AC/DC hybrid microgrid[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 203-208.
- [7] 周建萍, 张纬舟, 王涛, 等. 含V2G的直流微电网电压分层控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 19-25.  
Zhou J P, Zhang W Z, Wang T, et al. Hierarchical control strategy for DC micro-grid voltage with V2G[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 19-25.
- [8] 杨向真, 李玉宁, 杜燕, 等. 交直流混合微电网多模式功率协调控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1262-1274.  
Yang X Z, Li Y N, Du Y, et al. Multi-mode power coordination control strategy for AC/DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1262-1274.
- [9] 王智方, 钟建伟, 张钦惠, 等. 基于混合储能光伏微网孤岛运行下的能量管理[J]. 电工材料, 2020(5): 48-51, 55.  
Wang Z F, Zhong J W, Zhang Q H, et al. Energy management under islanding operation of photovoltaic microgrid based on hybrid energy storage[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(5): 48-51, 55.
- [10] 杨旭红, 尹聪聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.  
Yang X H, Yin C C. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [11] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.  
He Y Q, Wang W Q, Wang H Y, et al. Research on stability of the improved control strategy for photovoltaic inverters[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [12] 吕晨宇, 谢炯. 计及源/荷双重波动的光储微网孤岛稳定控制[J]. 电力电子技术, 2024, 58(6): 131-135.  
Lyu C Y, Xie J. Stability control of PV-storage microgrid island with dual source/load fluctuations[J]. Power Electronics, 2024, 58(6): 131-135.
- [13] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.  
Li B, Bao H L, Guo L. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15.
- [14] 梁荣伟, 吕智林, 许柳, 等. 光储交直流混合孤岛微电网控制策略研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3): 685-695.  
Liang R W, Lyu Z L, Xu L, et al. Research on control strategy of PV/battery AC-DC hybrid islanded microgrid[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(3): 685-695.
- [15] 李鹏, 信鹏飞, 窦鹏冲, 等. 计及光伏发电最大功率跟踪的光储微电网功率协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 8-13, 103.  
Li P, Xin P F, Dou P C, et al. Power coordinated control of photovoltaic/energy-storage system in microgrid under photovoltaic maximum power point tracking condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 8-13, 103.
- [16] 王妮儿. 含电化学储能的孤岛微电网系统优化运行研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.  
Wang N E. Study on optimal operation of islanded microgrid system with electrochemical energy storage[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [17] Kim J, Dvorkin Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4996-5006.
- [18] 苏泳, 陈艳峰. 基于非线性扰动观测的储能双向DC-DC变换器非奇异终端滑模控制策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1523-1531.  
Su Y, Chen Y F. Nonsingular terminal sliding mode control strategy of bidirectional DC-DC converter in energy storage system based on

- the nonlinear disturbance observer[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1523-1531.
- [19] 杨惠, 骆姗, 孙向东, 等. 光伏储能双向DC-DC变换器的自抗扰控制方法研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(5): 1342-1350.  
Yang H, Luo S, Sun X D, et al. Research on adrc method for bidirectional DC-DC converter of solar energy storage system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(5): 1342-1350.
- [20] 李骄阳, 王勇, 杨舒婷, 等. 直流微网中光伏并网储能系统研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(10): 2879-2886.  
Li J Y, Wang Y, Yang S T, et al. Research of pv grid-connected and islanded storage system in DC microgrid[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2017, 38(10): 2879-2886.
- [21] 王伟, 刘宝泉, 冯浪浪, 等. 大功率双向DC/DC储能变换器寄生参数振荡及抑制方法[J]. *电子器件*, 2023, 46(5): 1399-1405.  
Wang W, Liu B Q, Feng L L, et al. Parasitic parameter oscillation and suppression method of bidirectional high power DC/DC energy storage converter[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2023, 46(5): 1399-1405.
- [22] 刘国宏. 模型预测直接功率控制光伏储能双向DC-DC变换器研究[J]. *黑龙江电力*, 2023, 45(3): 241-245.  
Liu G H. Research on the bi-directional DC-DC converter for photovoltaic energy storage with model predictive direct power control[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2023, 45(3): 241-245.
- [23] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 94-103.  
Wang H, Nie J Y, Li B, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 94-103.
- [24] 田浩, 黄文焘, 余墨多, 等. 交直流混合独立微网互联变换器自适应双向下垂控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(19): 7063-7074.  
Tian H, Huang W T, Yu M D, et al. Adaptive bidirectional droop control strategy for the interlinking converter in the islanding hybrid AC/DC microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 7063-7074.
- [25] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 孤立交直流混合微电网双向AC/DC换流器功率控制与电压波动抑制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6225-6238.  
Liu Z W, Miao S H, Fan Z H, et al. Power control and voltage fluctuation suppression strategy of the bidirectional AC/DC converter in the islanding hybrid microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6225-6238.
- [26] 内蒙古自治区人民政府办公厅. 关于印发自治区保障偏远农牧户基本生活和基本生产通电升级工程实施方案的通知[A/OL]. (2023-08-10)[2024-02-15]. [https://www.nmg.gov.cn/ztzl/zqsk/hmzc/fpjj/202308/t20230814\\_2361124.html](https://www.nmg.gov.cn/ztzl/zqsk/hmzc/fpjj/202308/t20230814_2361124.html).  
General Office of the People's Government of the Inner Mongolia Autonomous Region. Notice on the issuance of the autonomous region's implementation plan for ensuring the basic livelihood of remote farmers and herdsmen and their basic production and upgrading the project [A/OL]. (2023-08-10)[2024-02-15]. [https://www.nmg.gov.cn/ztzl/zqsk/hmzc/fpjj/202308/t20230814\\_2361124.html](https://www.nmg.gov.cn/ztzl/zqsk/hmzc/fpjj/202308/t20230814_2361124.html).

# Research on Automatic Power Coordination Control Strategy of Off-Grid Optical Storage AC-DC Microgrid

YU Zhen<sup>1</sup>, CAO Xiaoyi<sup>2\*</sup>, YANG Bingyuan<sup>1</sup>

1. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Economic and Technical Research Institute, Hohhot 010020, China

## Highlights

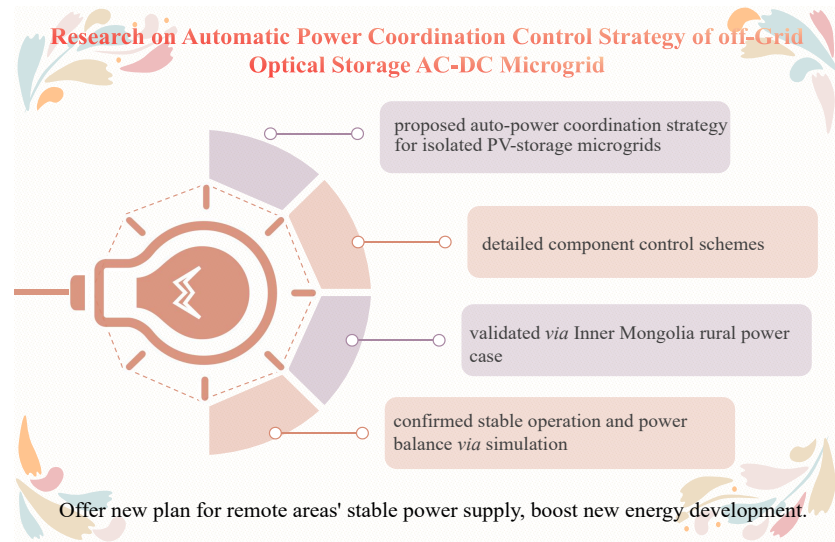
Proposed a coordinated control strategy for isolated operation of a photovoltaic-storage AC/DC hybrid microgrid.

Provided control schemes for each part of the photovoltaic-storage AC/DC hybrid microgrid.

Verified the strategy's effectiveness via a case study of a remote area's power supply project.

Demonstrated through simulation that the strategy can stabilize microgrid operation and balance power.

## Graphical Abstract



**Abstract:** In the context of economic globalization, the escalating demand for electricity from residential, commercial, and industrial sectors has accelerated the depletion of non-renewable energy resources such as coal, oil, and natural gas. Coupled with mounting environmental concerns, this trend has prompted global efforts to accelerate the development of renewable energy technologies, with solar energy emerging as a primary focus. As part of this international movement, China has been steadily advancing its sustainable energy development strategy to optimize energy structure and reduce carbon emissions.

However, the inherent limitations of distributed power generation systems—including intermittent power output, low operational flexibility, and grid integration challenges—necessitate innovative solutions. Microgrids have emerged as a promising technical approach to address these issues, particularly in remote or off-grid areas where reliable power supply cannot be guaranteed by conventional utility grids. Presently, microgrid systems are classified into three operational architectures: DC microgrids, AC microgrids, and hybrid AC/DC microgrids. The hybrid configuration, which integrates the complementary advantages of both AC and DC systems, has become a focal area of contemporary research.

For isolated microgrids operating in island mode, the photovoltaic (PV) storage AC/DC hybrid system represents a critical technological solution. This system architecture typically comprises PV generation units, battery energy storage systems (BESS), AC/DC busbars, interlinking power converters, and bidirectional AC/DC loads. Given the inherent volatility and unpredictability of standalone PV systems, BESS plays a pivotal role as an energy buffer to mitigate power imbalances. To ensure efficient solar energy utilization while preventing premature battery degradation from overcharging/discharging, a sophisticated collaborative power regulation mechanism must be established among generation, storage, and load components.

This paper proposes an adaptive power coordination control strategy specifically designed for islanded PV storage AC/DC microgrids. The control architecture adopts a hierarchical structure: (1) the energy storage system maintains DC bus voltage stability through droop control or model predictive control algorithms; (2) the interlinking converter implements a V/f (voltage-frequency) control strategy to establish stable AC subnet parameters; and (3) the DC bus voltage serves as the system's power

balance reference, enabling autonomous power coordination among PV arrays, BESS, and converters.

Simulation validation on a real-time digital simulator demonstrates the strategy's efficacy across three operational scenarios:

(1) Under varying environmental conditions (temperature fluctuations, irradiance changes), the PV system achieves accurate maximum power point tracking (MPPT) with >98% efficiency.

(2) The V/F-controlled interlinking converter maintains AC subnet voltage within  $\pm 2\%$  of rated value and frequency stability within  $\pm 0.1$  Hz, providing reliable reference signals for downstream loads.

(3) During abrupt load transitions ( $\pm 50\%$  step changes in AC/DC demand), the DC bus voltage remains regulated within 3% deviation from nominal value, while the BESS exhibits smooth power absorption/injection characteristics following predefined state-of-charge (SOC) constraints.

This control paradigm not only ensures stable operation of islanded microgrids but also prolongs energy storage system lifespan through intelligent power dispatch, offering a viable solution for decentralized renewable energy deployment in remote regions.

**Keywords:** photovoltaic power generation; energy storage system; AC-DC hybrid microgrid; automatic power coordination