中国光储直柔建筑战略发展路径研究

子课题 10：农村光储直柔系统示范项目技术方案及商业模式研究

Research on China's PEDF Building System Development

南京国臣直流配电科技有限公司

2022.7.10

Nanjing Golden Cooperate DC Power Distribution Technology Co., Ltd.

July 10, 2022

关于作者

（王菲菲：南京国臣直流配电科技有限公司研发工程师，主要从事直流配电领域工作。Email-1432694480@qq.com。）

ABOUT THE AUTHORS

(Feifei Wang，R&D Engineer of Nanjing Golden Cooperate DC Power Distribution Technology Co., Ltd. She mainly engaged in the field of DC power distribution. Email: 1432694480@qq.com 。)

致谢

本研究由【南京国臣直流配电科技有限公司】统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of [Nanjing Golden Cooperate DC Power Distribution Technology Co., Ltd.] and is funded by Energy Foundation China.

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be

responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.

- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

摘 要

庄上村光储直柔系统项目位于山西芮城黄河北岸的庄上村，分布式光伏总装机容量 2MW，储能 600kWh，包括户级光储直柔系统和村级光储直柔系统，二者组网通过变压器（AC/DC）与交流电网相连。户级光储直柔系统电压等级为 DC220V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑结构，通过直来电实现系统的电压变换和协调控制，主要用于供应居民用电，剩余电量送到村级光储直柔系统；村级光储直柔系统电压等级为 DC750V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑，便于村内各户之间以及与电网的能量交互。经过测算，系统总平均线损约 4%，低于设计限值 7%，实测整体效率达 91.7%。

本项目通过发展“光储直柔”技术，以全面电气化的零排放助力“碳中和”，引领全球乡村区域零碳化运营并依托减碳理念实现乡村焕新。项目实现了分布式光伏的高效消纳，提升发电用电的能效和台区间功率互济的能力；解决了分布式光伏给电网带来的部分扩容压力、三相不平衡、谐波、电压波动及闪变等问题；解决了光伏发电和百姓用电的随机波动性问题；实现了对电网的柔性友好接入，及可观、可测、可控。技术方案上，系统通过电压带控制策略协调控制光伏、电网、储能和负荷，维持建筑配电系统电压稳定，保障稳定运行；提出了一种适应直流系统的剩余电流保护方案，通过低压直流主动监控装置和直流剩余保护执行装置的灵活配合，实现可靠驱动跳闸或者发出跳闸信号。本项目还开发了一种直流灭弧模块，实现直流负荷的无弧通断。

项目被农业农村部和联合国开发署授予“中国零碳村镇项目示范村”，其推广应用将进一步实现国内相关区域从局部脱碳向全面净零碳的迈进。2021 年国务院将本项目“光储直柔”、“直流配电”技术路线纳入《2030 年前碳达峰行动方案》。

本示范工程光伏所发电量优先供庄上村居民使用，多余电量由电网全额收购，不足电量由电网企业提供。以发电总量计算投资方的收益，储能收益算给投资方。FCS 资产无偿移交给电网公司管理，电网公司根据系统与电网交互的电量向投资方结算电费，所产生的线损由电网承担。

项目参与单位包括牵头方芮城县人民政府、投资方中电国际、设计方国核电规划设计研究院、建设运营方南京国臣直流配电科技有限公司、合作方芮城

县供电公司以及屋顶持有方庄上村村民。各参与方按合同/投资协议约定进行利益分配：

庄上村总共 71 户居民铺设光伏，所选光伏组件每块 400W，共有 5000 块，总装机 2MW。年发电 1200 小时，其中 8.52 万 kWh 向当地用户免费赠送（1200kWh/户），10.68 万 kWh 向当地用户出售，剩余电量售卖给电网公司。

社会效益方面，本示范工程光伏装机容量 2MW，平均每年预计可提供 240 万 kWh 清洁电力，节约标准煤 966t，减少排放二氧化碳 2392.8t、二氧化硫 72t、粉尘排放 652.8t、氮氧化物 36t。建设本工程可以减少一定的化石能源的消耗，有利于环节环境保护压力，实现经济与环境的协调发展，节能和环保效果显著。

此外，本示范工程采用光储直柔技术对光伏发电进行传输消纳，与传统分布式能源技术相比，光储直柔技术在电能质量问题、电网的扩容压力问题、电网调度问题、台区重过载问题、线路损耗、供电可靠性等具有明显的优越性，能够避免分布式大规模并网带来的电能质量问题、缓解电网扩容压力、减少线路损耗、提高供电可靠性、提高能源利用效率。

经济效益方面，项目带动农民增收及村集体经济收入（户均增收 1200 元以上），推动乡村振兴。增加 GDP 和财政收入，实现每年发电收益约 100 万元/年（税收约 10 万元），提升地方经济水平。当纳入碳交易后，项目将新增额外的碳指标收入（目前国内价约 12.6 万、国际价约 88.2 万元）。另外，农村光储直柔系统的实施还减少了农村电网升级改造投资以及“煤改电”、“煤改气”等取暖工程的投资支出。

庄上村投建的“户-村”光储直柔示范项目具备明显的经济效益和社会效益，其探索出的商业模式可在芮城县乃至全国各村推广，进而形成“乡镇-县-地市-省”推广模式，打造农村供给城镇的能源生产消费新模式。

Executive Summary

Zhuangshang village PEDF project is located in Zhuangshang village on the North Bank of the Yellow River in Ruicheng, Shanxi Province. The total installed capacity of distributed photovoltaic is 2MW and the energy storage is 600kwh, including household level and village level PEDF system. The two networks are connected to the AC power grid through power electric transformers (ac/dc). The voltage level of household level PEDF system is DC220V. It is an IT system, which adopts unipolar wiring and radial topology. Through DC/DC converters, the voltage transformation and coordinated control of the system are realized. It is mainly used to supply residential electricity, and the remaining electricity is sent to the village level PEDF system. The voltage level of the village level PEDF system is DC750V. The IT ungrounded system adopts unipolar wiring and radial topology, which facilitates the energy interaction between households in the village and with the power grid. After calculation, the total average line loss of the system is about 4%, which is 7% lower than the design limit, and the measured overall efficiency is 91.7%.

Through the development of PEDF technology, the project will promote "carbon neutralization" with comprehensive electrification and zero emissions, leading the zero carbon operation in rural areas around the world. The project realizes the efficient consumption of distributed photovoltaic and improves the energy efficiency of power generation and the ability of power mutual assistance between stations. It solves the problems of partial capacity expansion pressure, three-phase imbalance, harmonics, voltage fluctuation and flicker brought by distributed photovoltaic to the power grid. It also solves the problem of random fluctuation of photovoltaic power generation and satisfies people's electricity consumption. It realizes flexible and friendly access to the power grid, and is observable, measurable and controllable. In terms of technical scheme, the system coordinates and controls photovoltaic, power grid, energy storage and load through voltage band control strategy to maintain the voltage stability of building distribution system and ensure stable operation. A residual current protection scheme suitable for DC system is proposed. Through the flexible cooperation of LVDC active monitoring device and DC residual protection actuator, the reliable driving tripping or sending tripping signal can be realized. This project also develops a DC arc extinguishing module to realize the arc free switching on and off of DC loads.

The project was awarded the "China zero carbon village project demonstration village" by the Ministry of agriculture and rural development and the United Nations Development Agency. Its

promotion and application will further realize the progress of local decarbonization to comprehensive net zero carbon in relevant regions in China. In 2021, the State Council included the technical routes of PEDF and DC power distribution in the "action plan for carbon peak by 2030".

The power generated by the Photovoltaic Station of this demonstration project is preferentially used by the residents of Zhuangshang village. The excess power is fully purchased by the power grid, and the insufficient power is provided by the power grid enterprise. The investor's income is calculated based on the total power generation, and the energy storage income is calculated to the investor. FCS assets are handed over to the power grid company for management free of charge. The power grid company settles the electricity charge to the investor according to the amount of electricity interacted between the system and the power grid, and the line loss incurred is borne by the power grid.

The project participants include the leading Party Ruicheng County People's government, the investor CLP international, the designer National Nuclear Power Planning and Design Institute, the construction and operation party Nanjing Golden Cooperate DC Power Distribution Technology Co., Ltd., the partner Ruicheng County power supply company, and the villagers of zhuangshang village. Each participant shall distribute benefits according to the contract / investment agreement.

A total of 71 households in Zhuangshang village have laid photovoltaic, with a total of 5000 photovoltaic modules of 400W each, and a total installed capacity of 2MW. The annual power generation is 1200 hours, of which 85200 kWh is free to local users (1200kWh per household), 106800 kWh is sold to local users, and the remaining electricity is sold to power grid companies.

In terms of social benefits, the photovoltaic installed capacity of this demonstration project is 2MW, which is expected to provide 2.4 million kWh of clean power on average every year, save 966t of standard coal, and reduce the emission of 2392.8t carbon dioxide, 72t sulfur dioxide, 652.8t dust and 36t nitrogen oxides. The construction of this project can reduce the consumption of certain fossil energy, and is conducive to the pressure of environmental protection, realizing the coordinated development of economy and environment, and has remarkable energy conservation and environmental protection effects.

In addition, this demonstration project adopts the PEDF technology to transmit and absorb photovoltaic power generation. Compared with the traditional distributed energy technology, the PEDF technology has obvious advantages in power quality problems, power grid expansion pressure problems, power grid scheduling problems, heavy overload problems in the substation area, line loss, power supply reliability, etc., and can avoid the power quality

problems caused by distributed large-scale grid connection, alleviate the power grid expansion pressure, reducing line losses, improving power supply reliability and energy efficiency.

In terms of economic benefits, the project will drive villagers' income and village collective economic income (an increase of more than 1200 yuan per household), and promote rural revitalization. It also increases GDP and fiscal revenue and realizes annual power generation revenue of about 1million yuan / year (tax revenue of about 100000 yuan), and improve the level of local economy. When included in carbon trading, the project will add additional carbon index income (the current domestic price is about 126000 yuan and the international price is about 882000 yuan per year for this project). In addition, the implementation of the rural PEDF system has also reduced the investment in the upgrading and transformation of rural power grids and the investment expenditure of heating projects such as "coal to electricity", "coal to gas".

The household-village PEDF demonstration project invested and built by Zhuangshang village has obvious economic and social benefits. The business model it has explored can be promoted in Ruicheng County and even villages across the country, thus forming a "Township-County-City-Province" promotion model, and creating a new mode of energy production and consumption for rural areas to supply cities and towns.

目 录

1 芮城县庄上村能源特点分析及居民用电情况调研 1
1.1 庄上村可再生能源储量调研 1
1.2 庄上村居民用能情况调研分析 2
1.3 本章小结 5
2 农村光储直柔系统关键技术研究 6
2.1 光储直柔定义 6
2.2 农村光储直柔系统架构研究 6
2.3 农村光储直柔系统分层控制策略研究 11
2.4 农村光储直柔系统安全用电技术研究 19
2.5 本章小结 31
3 庄上村光储直柔系统的设计与实施 32
3.1 庄上村光储直柔系统的必要性和可行性分析 32
3.2 庄上村光储直柔系统技术方案 32
3.3 庄上村光储直柔系统核心装备及关键技术 37
3.4 庄上村光储直柔实施方案 40
3.5 系统前期的测试情况 43
3.6 本章小结 45
4 农村光储直柔系统的效益评价及商业推广模式分析 46
4.1 农村光储直柔系统效益评价 46
4.2 庄上村光储直柔系统商业模式 48
4.3 农村光储直柔系统的宣传与推广 51
4.4 本章小结 54
5 总结与展望 55
参考文献 57

1 芮城县庄上村能源特点分析及居民用电情况调研

庄上村坐落在黄河北岸近 50m 的高塬上，隶属芮城县陌南镇。本章根据《芮城县 2021 年国民经济和社会发展统计公报》、《中国能源统计年鉴 2020》和《芮城县碳中和整体规划讨论稿》，以及利用一些实地调研的数据，针对庄上村所在地的能源储量和居民用电情况进行了统计分析。

1.1 庄上村可再生能源储量调研

1.1.1 太阳能资源

庄上村位于山西省芮城县，太阳总辐射量在 4600～5040MJ/m2・a 之间，根据《太阳能资源评估方法》中关于太阳能资源丰富程度等级评定标准，为资源丰富区。根据芮城县气象站 2010～2014 年统计资料，该地区的平均年日照时数在 1916h～2296h 之间，日平均日照时数在 5.24h～6.29h 之间。因此，庄上村拥有发展光伏的良好自然条件。此外，庄上村还拥有海量的屋顶资源，又因为乡村电网的容量利用率普遍偏低，这为安装分布式光伏提供了良好的空间条件和电网网架条件。

1.1.2 风能资源

庄上村所在的中条山区区域位于山西省南端，该区与黄河谷口相邻，中条山自西南向东北穿过，地形作用下该区域有较大风速，且周围居民较少，因此当地目前已建成 17 万 kW 的风力发电厂。2019 年发电量 1.61 亿 kWh，年上网电量 1.55 亿 kWh，历年最大发电量达 1.8 亿 kWh。

1.1.3 生物质资源

庄上村所在的芮城县是我国传统的农业生产和产粮大县之一，具有丰富的生物质资源量，主要有农业物秸秆、果树剪枝、禽畜粪便等。

1）按照 2019 年《芮城县统计年鉴》给出的数据，2018 年芮城县全年主要粮食产量 34.78 吨，对应的秸秆理论资源量和可收集资源量分别为 36.77 万 t 和 30.4 万 t，目前部分秸秆用于饲料（不足 1%），剩余主要被还田；

2）芮城县果树种植面积 18.75 万亩，主要为苹果、梨、桃和杏树，按苹果树每亩地每年可以剪下 400kg 的废弃枝条，其他果树 200kg 计算，合计可产生 6.4 万 t 的果树剪枝，折合标准煤 3.5 万 tce。目前这些果木枝条除少量被农户用做烧炕等燃料之外（不足 5%），其余主要被野外废弃；

3）芮城县 2018 年全县禽畜粪便总量为 40.94 万 t，其中 80.5%为猪粪。芮城县的畜禽粪便可年产沼气 3245 万 m^3，按 $1m^3$ 沼气可替代 $0.6m^3$ 天然气、0.714kg 标准煤计算，共可提纯生物天然气 1947 万 m3，折合标准煤 2.32 万 tce。

综上所述，芮城县庄上村拥有丰富的可再生能源，包括光伏、风电和生物质能源，但是开发不足，资源严重浪费。充分利用本地的可再生能源，可以采取的措施，包括通过建设风力发电厂对风力资源进行开发与利用；生物质资源取消秸秆还田，作为商品资源深度开发利用，建设生物质燃料电厂，补充电力短缺；探索新型配电系统，充分开发利用光伏可再生能源等。本项目主要在庄上村针对光伏可再生资源的开发与利用进行研究。

1.2 庄上村居民用能情况调研分析

1.2.1 庄上村能源消费结构

根据走访调研，庄上村目前年消耗煤炭约 3700 吨、液化天然气 4.5 吨、电能 650 万度（当前已完成煤改电 150 户）、薪柴 90 吨、秸秆 900 吨、汽油 150 吨、柴油 90 吨。庄上村的能源消费结构中，生活用能方面以“煤或生物质燃烧+电”为主，农业生产、交通出行用能以柴油汽油为主，少量用电。推动农村能源转型，首先必须提高电能在能源消费结构中的占比。因此本项目通过探索光储直柔新型配电系统，充分利用当地丰富的光伏可再生能源，以提高终端电气化比例，推动农村能源转型，助力农村地区率先实现碳达峰、碳中和。

1.2.2 庄上村电能消费特征

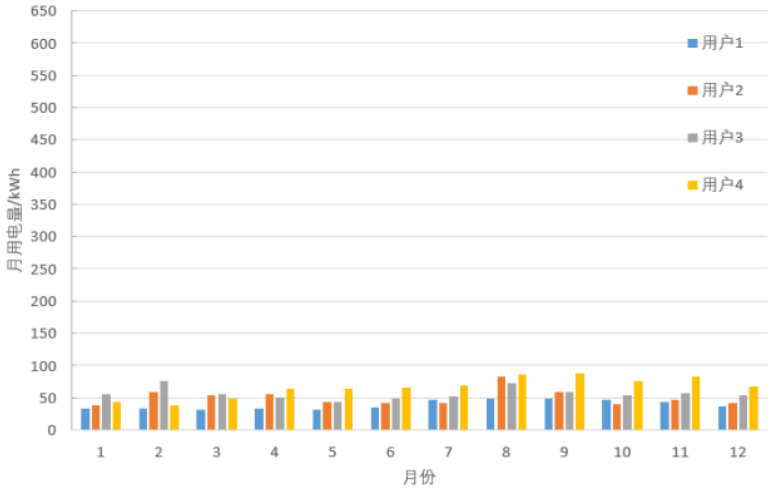
农村各户的常住人口数、电气化水平、经济水平以及出行方式和习惯等具有一定差异，这就决定了各户用电特征存在着一定差异。通过调研村落 67 户农宅 2020 年的用电耗数据进行统计分析，得出农户全年的居住习惯，并据此将农宅分为常住农宅、暂住农宅和无人居住农宅三种类型，其中暂住类型定义为连续居住时间不超过三个月且年居住总时长少于半年的农宅。根据各户逐年用电量的多少，又将常住类型的农宅分为高耗型、普通型和节俭型三类典型用户。调研的 67 户中常住农宅占比最高（72%），常住农宅中又以普通型用电农户为主（48%）；67 户农宅用电量最高为 3011kWh，平均年用电量 903kWh/户。农宅统计信息如表 1-1 所示。

表 1-1 农宅用电信息统计表

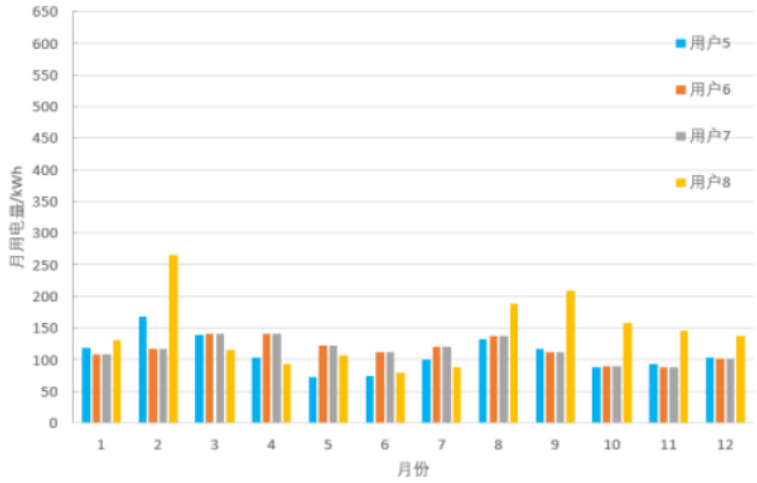
<table>
<tr><td>农户类型</td><td colspan="3">常住农宅</td><td>暂住农宅</td><td>无人居住</td><td>总计</td></tr>
<tr><td>户数</td><td colspan="3">48</td><td>8</td><td>11</td><td>67</td></tr>
<tr><td>占比</td><td colspan="3">72%</td><td>12%</td><td>16%</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">户均年用电量（kWh）</td><td>高耗型
23%</td><td>普通型
48%</td><td>节俭型
29%</td><td rowspan="2">334</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">903</td></tr>
<tr><td>2098</td><td>1130</td><td>624</td></tr>
</table>

（1）常用住宅类型

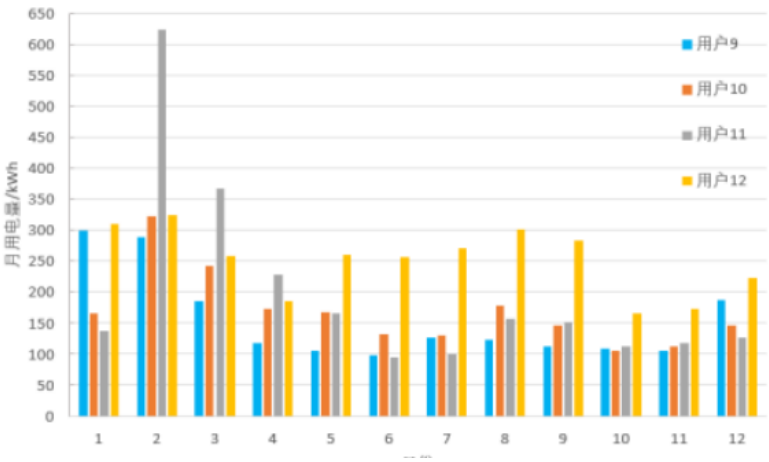
常用住宅类型是目前农村的主体，在节俭型、普通型、高耗型三类中各选取 4 个典型农户，分析三者之间的用电特性差异，逐月电耗数据如图 1-1 所示，各户全年用电量如表 1-2 所示。



（a）节俭型农户月用电量



（b）普通型农户月用电量



（c）高耗型型农户月用电量

图 1-1 典型常住农宅类型逐月耗电量（kWh）

表 1-2 各户全年用电量

单位：kWh

农户	节俭型				普通型				高耗型			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
年用电量	468	602	679	791	1274	1309	1386	1713	1857	2021	2969	3011

根据图 1-1、表 1-2，常住农宅类型中三类农户的逐月用电量大小有明显差异，主要和农户电气化水平和用电习惯有关，但是均具有较明显的季节特性，表现为冬季月份电耗较多，夏季次之，春秋较少。主要原因是冬季（尤其 2 月春节）电器使用较多、时间长，并且涉及电采暖，导致电耗增大；夏季时有空调、电扇、冰箱等长时间运行，且电动车和农机具使用频繁。春秋季属于农忙时节，农户在市内活动时间长减少，电器的使用较少。

（2）暂住农宅

根据调研，暂住农宅的住户一般为外出务工人员，也有一部分为迁到县城工作居住的农村人口以及随子女短期居住的老人，大多会在春节器件返乡居住，部分农户仍参与田间劳作，春秋季在农村居住。典型暂住农宅的逐月电耗数据如图 1-2。

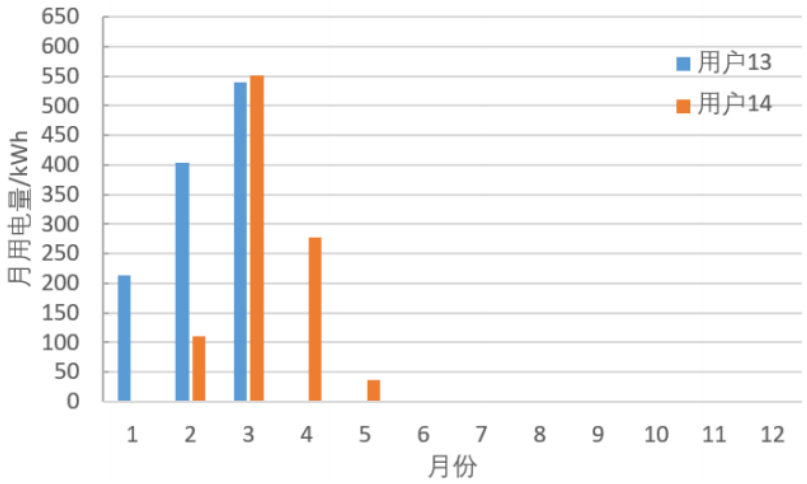


图 1-2 典型暂住农宅类型逐月耗电量（kWh）

暂住型农宅的电耗主要集中在 1～5 月份，主要由于短期在农村居住，对生活质量有一定的要求，家中电气化水平较高，冬天短期居住采用电暖器等设备采暖，导致电耗较大。

（3）无人居住农宅

无人居住农宅在农村占有一定比例，主要是在农转非人口的闲置房屋，还有一部分是搬迁新房后的空置老旧农宅。

1.3 本章小结

本章对芮城县庄上村的可再生能源情况以及居民的用能情况进行了实际的调研与统计，为后续光储直柔系统的构建提供数据支撑。

2 农村光储直柔系统关键技术研究

2.1 光储直柔定义

根据国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》中的描述，光储直柔建筑集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体；根据《民用建筑直流配电设计标准》中的描述，光储直柔建筑配电系统是配置分布式光伏和储能，采用直流电气系统，且末端用电设备具备调节能力的新型建筑能源系统。

综上所述，“光储直柔”中的“光”，即分布式光伏。“储”即储能，通过分布式蓄电和需求侧响应的用电模式，缓解光伏发电和用电负荷时间上的矛盾；“直”即直流配电系统，实现光伏发电“直”发“直”用，大大减少“逆变上网”“整流用电”环节，从而减少传输损耗，提高发电用能能效；“柔”，一方面电器设备自身具备柔性调节的能力，就是根据母线电压的波动动态调整输出功率；另一方面是根据母线电压的波动动态调整输出功率；另一方面是通过光伏、储能以及负荷三者的动态匹配实现与电网的友好对接。典型光储直柔系统架构示意图如图 2-1 所示。

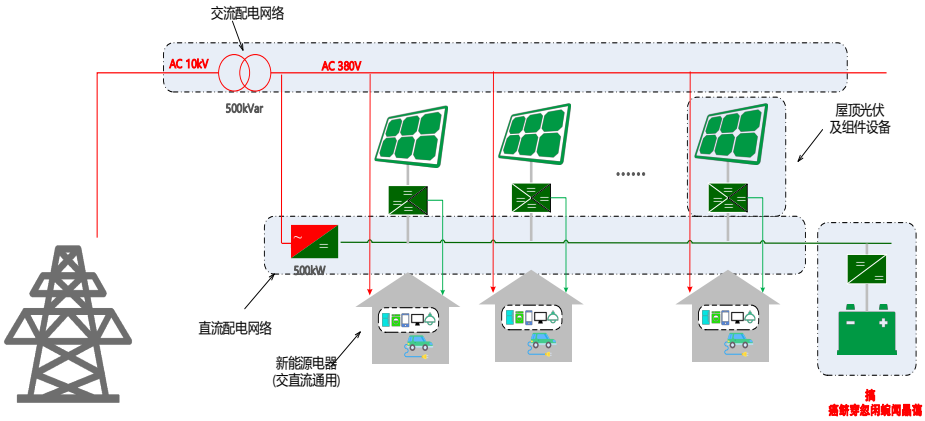


图 2-1 典型光储直柔系统架构示意图

2.2 农村光储直柔系统架构研究

由于光储直柔是一种新型直流配电系统，当前仍以示范性工程为主，尚缺乏相关的标准和技术规范，因此本项目参考低压直流配电系统的有关标准以及工程经验对农村应用场景下的光储直柔系统进行研究。

2.2.1 电压等级研究

GB/T35727-2017《中低压直流配电电压导则》将 110V～1500（±750）V 划定为低压范围，并给出了低压直流电压等级推荐值序列，如表 2-1 所示。

表 2-1 低压直流配电系统的标称电压

优选值	备选值
1500（±750）	
	1000
750（±375）	
	600
	440
	400
	336
	240
220（±110）	
	110
注 1：未标正负号的电压值对应单极性直流线路，标有正负号的电压值对应双极型直流线路。 注 2：基于技术和经济原因，某些特定的应用场合可能需要另外的电压等级。	

从表 2-1 可以看出，目前低压直流负荷的电压需求类型较多，有待统一。对于光储直柔系统电压等级的确定应从传输能力、安全性、适用性等多个角度综合考虑。农村光储直柔配电系统的电压等级包括储能输出电压、光伏输出电压、户级电网电压以及村级直流电网电压。以实用化为主，力求结构简单、安全可靠的农村光储直柔系统，可将光伏和储能的输出电压统一。

在户级电网电压选取时，考虑以下几个方面因素：

1）各负荷内部元器件的耐压值作为选取电压的上限。目前我国市电电网居民入户的供电电压有效值为 220 V，其峰值为 220 V，供电电压波动范围为－15%~+15%，设计时的耐压值在 350 V 以上。直流供电电压应低于此值。

2）负荷工作时的发热情况作为选取电压的下限。对于恒功率负载，在正常工作的电压范围内，电压越高，负载内部发热量越小。以家电中的高耗电产品空调为例，220 V、10 A 的额定工况下，当发热量提高 1.5 倍时，电流升高为=12.25（A），此时电压可达到的下限为 U=220×10/I=179.6（V）。

3）考虑直流负荷的工作有效性。180~350 V 分别规定了此次负荷供电的下限和上限，因而直流供电电压应在 180~350 V 之间选择。除去负荷工作低压保护的下限之外，应考虑工作电压的有效值，使得在直流供电情况下的负荷工作

有效性与交流供电情况下相当或高于交流供电情况下的负荷工作有效性。鉴于交流额定供电电压有效值为 220 V，最终确定的电压等级为 220~350 V 之间。

综上，220 V 电压等级是直流负荷电压等级的最佳选择，可最大限度地兼容目前的交流用电设备，并更有利于降低供电系统的整体损耗，同时降低后续直流家电改造成本。此外，直流 220 V 也是 GB/T 156—2017《标准电压》、IEC 60038《标准电压》中推荐的设备直流电压以及发电厂厂用电的直流电压。

DC750V 为村级光储直柔系统电压等级，主要作用是电能传输，DC750V 直流电压负荷距相比交流 380V 系统明显提高，且直流系统电压偏差更大、适应性更强。

但实际运行中，由于电力电子变换装置在直流配电网中广泛应用，电源端的大范围可调和用电设备的大范围自适应，都提供了超宽“电压带”的可能性。因此，直流 220 V 和 750V 的电压等级并不是严格限制的，实际的工作电压可基于 220 V 和 750V 的基准线上波动。

2.2.2 接线形式研究

低压直流配电系统的常见接线形式如图 2-2 所示。图 2-2（a）的非对称单极接线方式接线最简单、设备最少，在变电站直流系统、轨道交通等领域大规模应用，技术相对成熟；；图 2-2（b）的对称单极接线方式性能和建设成本介于单极接线和双极接线之间。图 2-2（c）的双极接线相比单极接线运行方式更加灵活、可靠性更高，但其使用设备多、结构复杂，建设成本高由于整个农村光储直柔系统的系统结构简单、电压等级低，其本身可靠性就很高，因此宜采用非对称单极接线方式。

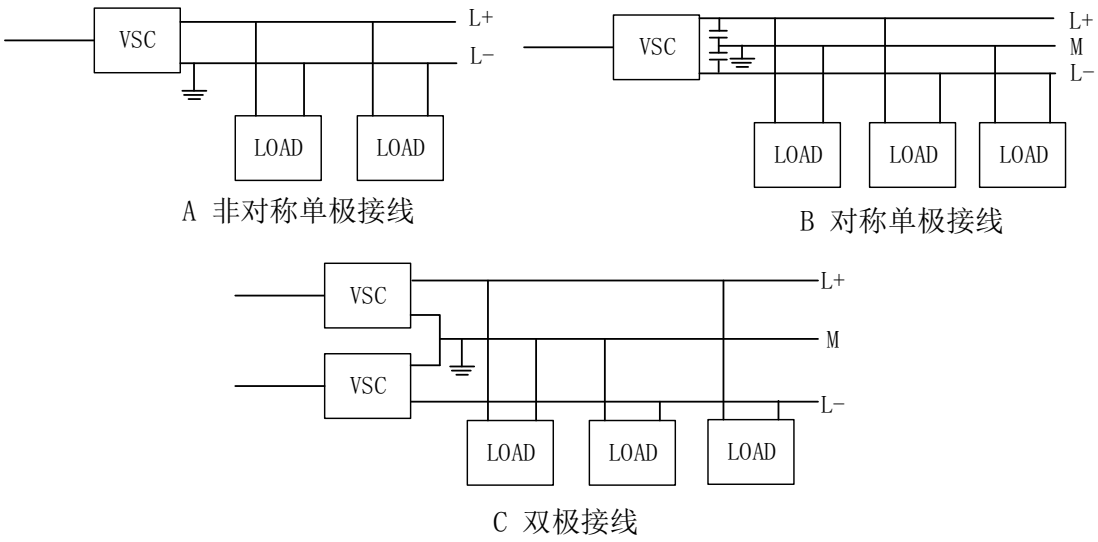
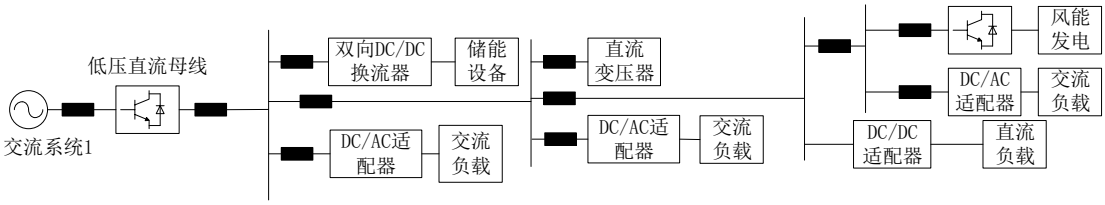


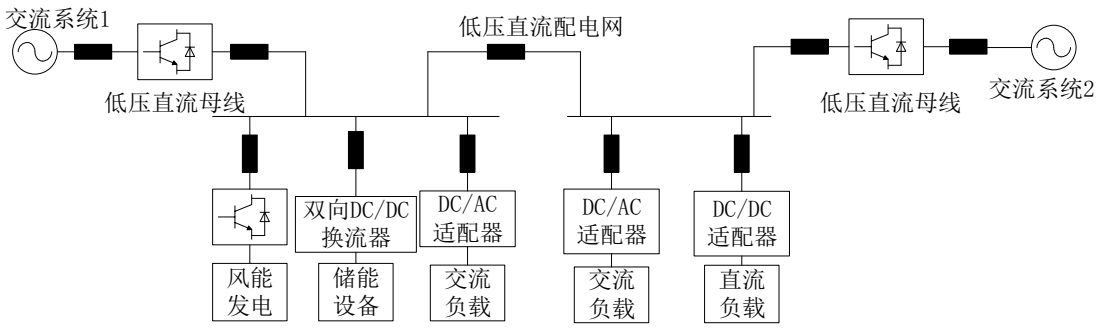
图 2-2 低压直流配电系统接线形式

2.2.3 拓扑结构研究

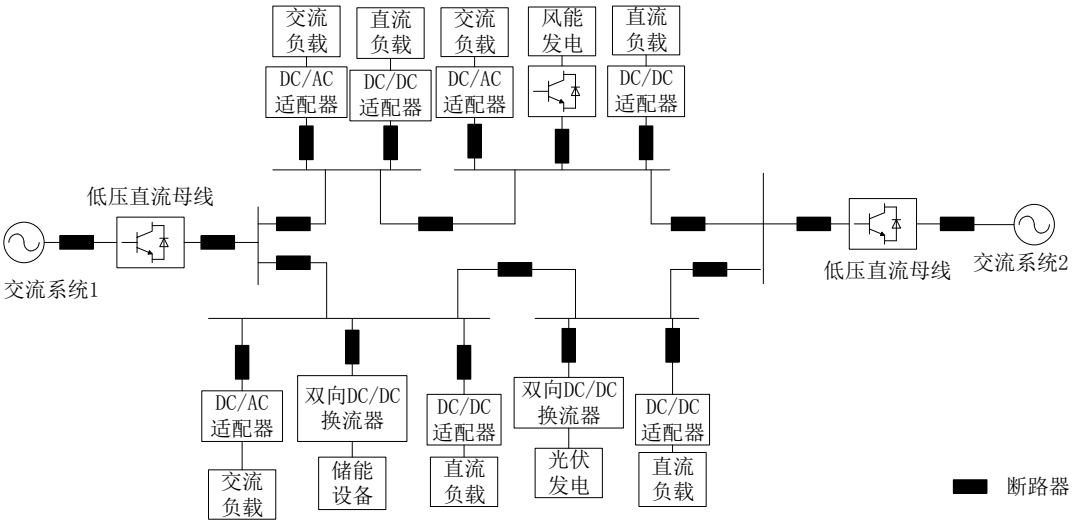
低压直流配电系统拓扑结构如图 2-3 所示。图 2-3a 是放射状拓扑结构，又称为链式或辐射状结构，相较于其他两种结构，放射状结构最为简单，但是这种结构下，位于供电终端的负载只能获取本条线路的电能，因此供电可靠性较低；图 2-3b 是两端供电系统拓扑结构图，采用双电源供电方式，具有较高的可靠性与安全性，是一种特殊的开环环状结构，保护控制相对简单；图 2-3c 是环状配电拓扑结构图，供电可靠性高、运行灵活，但是环网拓扑结构所带来的的弊端就是相配套的保护方案要求高。农村应用场景中的用电负荷基本属于三级负荷，对于供电可靠性的要求相对不高，因此宜采用结构简单、建设成本低的放射状拓扑结构。



a 放射状直流配电网结构示意图



b 两端直流配电网结构示意图



c 环状直流配电网结构示意图

图 2-3 低压直流配电系统拓扑结构

2.2.4 接地型式研究

IEC60364-1《LOW-VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS - PART 1: FUNDAMENTAL PRINCIPLES, ASSESSMENT OF GENERAL CHARACTE-RISTICS, DEFINITIONS》对于直流接地型式进行了定义，类似交流系统，分为 TT 系统，IT 系统，TN 系统三种接地型式，如图 2-4 所示。TN 系统为电源侧直接接地，用电设备外壳经过保护线与电源接地点共同接地，如图 2-4a 所示；TT 系统为电源侧与用电设备外壳直接接地，电气装置的接地点在电气上独立于电源端的接地点，如图 2-4b 所示；IT 系统为电源侧不接地或者经高阻抗接地，用电设备外壳直接接地，如图 2-4c 所示。

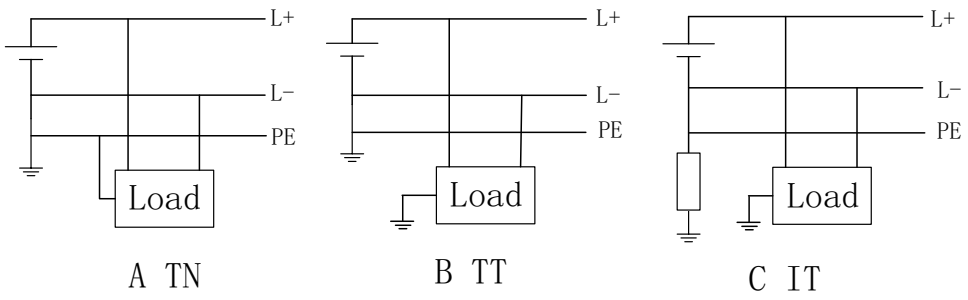


图 2-4 低压直流配电系统接地型式

作为全新的光储直柔配电系统，中线（或负极）接地方式就成为讨论的重点。

支持“直接接地”的一方认为：中线（或负极）接地方式的直流系统，可以像交流系统一样，通过漏电保护保证用电安全，还可以防止悬浮系统电压漂移。但这种方式只要正极接地就跳闸，降低了供电的可靠性。

支持“不接地”一方认为：不接地系统在单极触碰时，理论上无漏电流产生，也就不影响人体安全，还避免了接地系统单极接地故障断电的风险，提高了供电的安全性。但这种方式，如果先发生一极接地后，再发生触电就有人身安全的风险。

但是无论是接地和不接地，为系统安装直流漏电保护器，仍是保证人体安全的必要环节，要求整个产业界尽快推出价廉物美的相应产品。

综上，庄上村光储直柔所采用的系统架构示意图如图 2-5 所示，包含 DC750V 和 DC220V 两个电压等级，均采用单极接线形式，拓扑结构采用结构简单、方便控制的放射状拓扑结构，接地型式将作为一种保护手段在 2.4.2 中作具体研究。

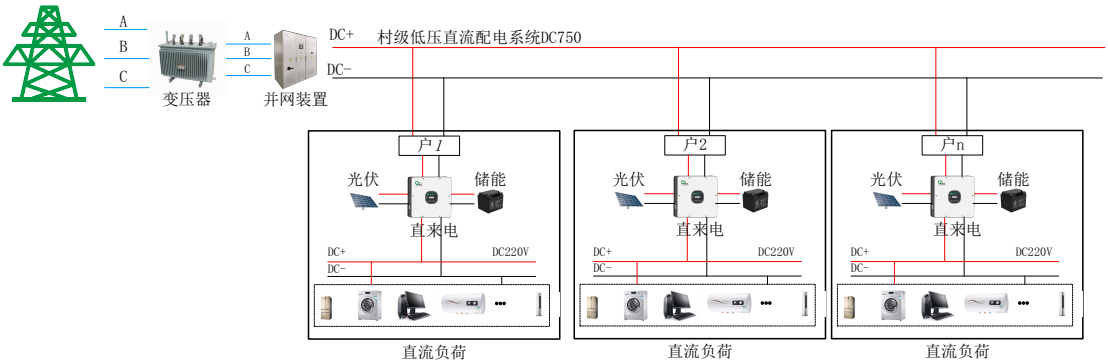


图 2-5 农村光储直柔系统架构示意图

2.3 农村光储直柔系统分层控制策略研究

直流系统对于控制的基本要求是保持供电系统中重要负荷的供电可靠性和电能质量需求，在此基础上实现分布式电源的充分利用。为了实现这一目标，从系统角度出发，根据时间尺度和控制目的可以将直流供电系统控制架构划分为能量优化控制层和电压协调控制层。

光储直柔系统的运行控制框架如图 2-6 所示。上层为调度管理层，通过监控管理系统实现光储直柔系统与电网的能量交互管理，优化系统运行状态，其控制时间尺度通常在秒级别；底层为就地控制层，通过直来电装置协调控制光伏、电网、储能和负荷，维持建筑配电系统电压稳定，保障稳定运行，其控制时间尺度通常在毫秒级别。另外，就地控制层的控制优先级更高。

图 2-6 光储直柔建筑配电系统控制架构图

2.3.1 电压协调控制层

2.3.1.1 基于电压带的变换器协调控制策略

在直流系统中，直流电压直接反映了功率平衡的情况，当流入功率大于流出功率时，直流电压上升；当注入功率小于流出功率时，直流电压下降。电压

协调控制层主要实现短期功率平衡，在接到优化控制指令后，实时调整可控设备的出力或对可控负荷进行相关控制，满足系统功率平衡和维持直流电压稳定。

本项目针对电压协调控制层，提出基于电压带的协调控制策略，即通过设定各电力电子变换设备（AC/DC 和 DC/DC 变换器）的上下限调节直流母线电压，实现系统的电压稳定和功率平衡。具体实施如下：

将来自交流电的 AC/DC（或者来自高压直流的 DC/DC）变换器、光伏电压 DC/DC 输出和储能 DC/DC 电压设置成不同的阈值，来实现三者之间的混合运行控制。本系统中能量消耗优先级为光伏>储能>市电，即：光伏优先利用、余电存储储能、市电后备，则光伏的输出电压 U_{pv}、储能输出电压 U_{bat} 和市电输出电压 U_g 设置成如式（2-1）：

$$U_{PV} > U_{bat} > U_g \tag{2-1}$$

如图 2-7 所示，当正午光照充足时，光伏经 MPPT 控制，可以输出到较高的直流电压，供负载使用，当光照减弱时，光伏变换器输出电压随之下降；当下降到储能输出电压以下时，储能为负载提供电能；当储能系统放电后，电压下降到市电变换器输出电压时，系统由市电进行供电。

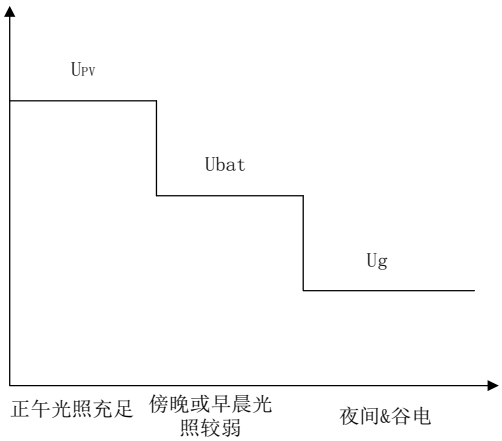


图 2-7 变换器协调控制示意图

基于电压带的协调控制策略能够最大化就地消纳光伏新能源，提高能源利用效率，同时还能够避免新能源大规模并网给电网带来的电网带来的调度压力。由于直流系统不存在频率和相位，直流系统电能质量相比交流系统更加优越，且直流电压控制能力作为评价直流系统性能的关键指标之一，同交流相比，由于直流的柔性特点，直流系统的可调节性能和响应的快速性要好很多，电压带控制使得系统可以在一定电压偏差范围内合理运行。

2.3.1.2 直来电装置的研制

为实现光储直柔系统就地控制层的小型化、规模化和简约化，基于电压带的变换器协调控制策略，本项目研究开发一种直来电装置，为光储直柔系统中的光伏、电网、储能和负荷提供所需的功率交互接口，其拓扑结构如图 2-8 所示。建筑物屋顶能够铺设的光伏组件数量有限，因此光伏系统发出电压较低，需经 Boost 升压斩波电路（即光伏 DC/DC 控制器）升压后接入系统，为最大限度利用光伏能源，一般采用最大功率跟踪（MPPT）实时跟踪光伏的最大功率；储能系统要求能够与系统进行能量双向交互，因此采用 Buck-Boost 升降压电路（即储能 DC/DC 控制器），通过电压电流双闭环控制实现电流限流和电压的精准调节。

直来电装置主要有两方面的作用，一方面协调控制光储直柔系统内部各个控制器，维持系统电压稳定，同时实时上传光储直柔系统的运行状态并接受上层能量调度管理层的指令。

直来电的外形图如图 2-8 所示，具有体积小、重量轻、液晶显示、外观精美、便于、安装的优点，机箱主体采用白色设计，原因在于直来电以户外安装为主，白色能够最大程度避免光照对设备运行的影响。

图 2-8 直来电外形图

直来电产品规格如下：

1）功能特点：

●光伏最大功率跟踪输出；

●直流输入、输出电压范围可设定；

●输出具备稳压限流功能；

●自带多重保护功能；

●提供多种通讯方式；

●具备 GPS 校时功能；

●可并机使用，具有良好的扩展性、互换性。

2）技术参数表：

表 2-2 直来电技术参数表

序号	型号	GC-WPV/HZ/5715N1
输入侧参数		
1	额定输入电压	550.0V
2	输入电压范围	300V~730
3	最大电流	25A
输出侧参数		
1	额定输出电压	750V
2	输出电压允许范围	600V~800V
3	最大输出电流	13.5A
4	最大负载功率	10kW
5	功率方向	单向
7	稳压精度	≤0.01×$U_{额定}$
8	负载调整率	1%
9	电压调整率	1%
其它参数		
1	最大效率	98.00%
2	待机损耗	≤30W
3	绝缘耐压	AC2500V
4	保护	集成常规变换器过流、过压、过温等全部保护功能，停机，封脉冲，上报故障
5	外壳防护等级	IP65
6	热绝缘等级	H 级
7	液晶显示	电压、电流、温度、电量、故障记录
8	工作温度	－10℃～＋50℃
9	相对湿度	95%不凝露

10	最大外形（mm）	286（宽）×450（深）×198（高）
11	重量	13kg

2.3.2 能量优化控制层

能量优化控制主要实现长期能量优化管理，以经济性等指标为优化目标，调整可控设备（光伏、储能、交直流变换器、可控负荷等）的电压、功率等运行状态，优化直流配电系统运行。

2.3.2.1 运行模式设计

本项目中，按照不同系统目标以及与电网间的协调调度控制需求进行了系统运行模式的设计，大致可以分为以下几种：

① 经济模式：保证整个系统的经济性能最佳，实现发电、用电、储电利益最大化。为降低对电网公司的并网管理要求，系统直流侧可以不向交流侧返送功率；当自身功率无法满足需求时，向交流侧实时取电实现功率需求平衡。

② 需求侧响应模式：通过对储能、负荷的控制，可以使传统的需求侧响应电网交流侧的短时要求，如降低对交流侧功率需求（切负荷或释放储能）或返送功率支撑电网交流侧。

③ 限功率取电模式：保证不向电网交流侧汲取超过其容量限制的功率。如果新能源发电和储能配置适当，可以通过协调控制实现对电网交流侧的“恒功率取电”。

④ 应急模式：当电网交流侧或新能源发电短期内可能无法满足用电需求时，需要提前最大化存储电能，并只在应急情况下释放，满足重要负荷在特定应急时期使用。

⑤ 直流侧孤网模式：当交流侧失电时（无电区或交流侧发生故障脱离时），直流侧处于孤立的“发-储-配-用”自平衡状态。

2.3.2.2 能量管理系统的开发

本项目设计了能量管理系统实现光储直柔系统的可观、可测和可控，基于光储直柔系统各要素的实时监测，包括储能电池状态，直来电状态以及交流并网状态等，在此基础上实现系统调度功能，进行运行模式自切换，优化系统能量管理，同时具备状态指示、数据采集记录、运行趋势图绘制等功能。

能量管理系统架构如图 2-9 所示。在电源点（包括电网、光伏）、每户直流进线以及主要负荷点安装双向智能电表，进行光伏发电量、用户及主要负荷用电量、电网售电量等的计量统计。双向电表数据可通过现场总线传送至本地的监控系统，也可通过无线终端采用 4G/5G 通信技术直接传送至远程监控系统。

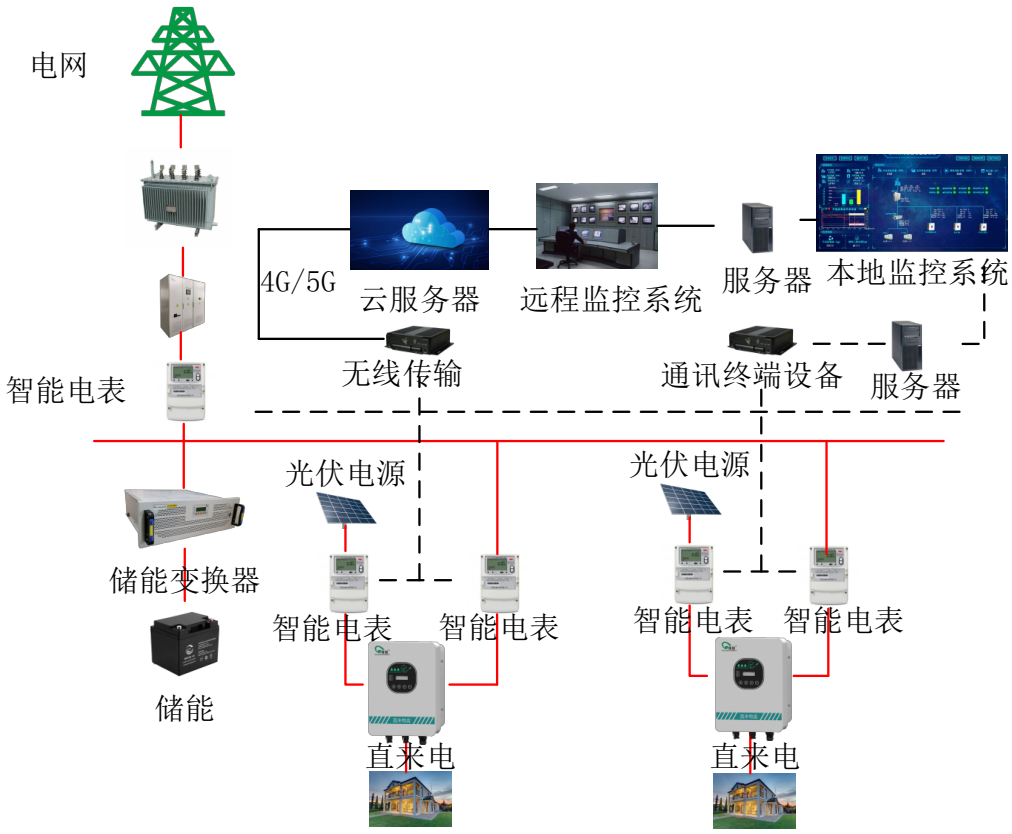


图 2-9 能量管理系统架构图

能量管理系统可以对整个储能系统内设备运行状态进行监视，还可以根据当前储能系统运行情况与外界应用请求制定相应的优化控制策略，针对光伏发电出力的特点采用合理的能量管理优化技术使储存的电量得到最大利用，并可以根据用户功能的要求灵活构成各种应用功能的系统，充分发挥储能单元的优势。具备还包括以下几项功能：

1）系统调度

可根据直流配电网与交流配电网的协调互动，进行电网自平衡和自平滑统一的优化控制，支持经济模式、需求侧响应模式、限功率取电模式、应急模式、直流侧孤网模式等运行模式；具有直流设备运行状态监测、运行数据存储和分析、远方通信、电源/储能/负荷运行状态实时监控、分布式发电预测/负荷预测/可控发电计划、能量优化管理的功能。

2）光伏发电监控

对太阳能光伏发电的实时运行信息、报警信息进行全面监视，并对光伏发电进行多方面的统计和分析。应能显示光伏系统的当前发电总功率、日总发电量、累计总发电量、以及每天发电功率曲线图。

3）储能单元监控

对储能单元的实时运行信息、报警信息进行全面监视，并对储能进行多方面的统计和分析。要求对储能的监控至少显示下列信息：

① 可实时显示储能的当前可放电量、可充电量、当前放电功率、当前充电功率、可放电时间、今日总充电量、今日总放电量。

② 能遥信双向变流器的运行状态、告警信息，其中保护信号包括：低电压保护、过电压保护、过电流保护、器件异常保护、电池组异常工况保护、过温保护。

③ 能遥测双向变流器的充放电电流、电压、功率，以及储能剩余容量、电池单体电压等。

④ 能对储能电池充放电时间、充放电电流、电池保护电压等进行遥调，实现远端对双向变流器相关参数的调节。

⑤ 遥控：能遥控双向变流器充电、放电功率。

4）负荷监控

对直流系统内部负荷进行监视、控制和统计，为直流配电系统功率平衡分析控制等提供依据。在运行时，可对这些负荷进行分组监控。

5）数据采集与监测

① 模拟量采集，包括楼宇直流配电系统各点电压、电流、电量等模拟量的采集。

② 状态量采集，包括开关位置、事故跳闸信号、保护动作信号、异常信号、开关储能状态、终端状态等状态量的采集。

③ 其它数据采集，包括对特定的电网电能质量数据的采集以及 PCS 电源运行状态数据。

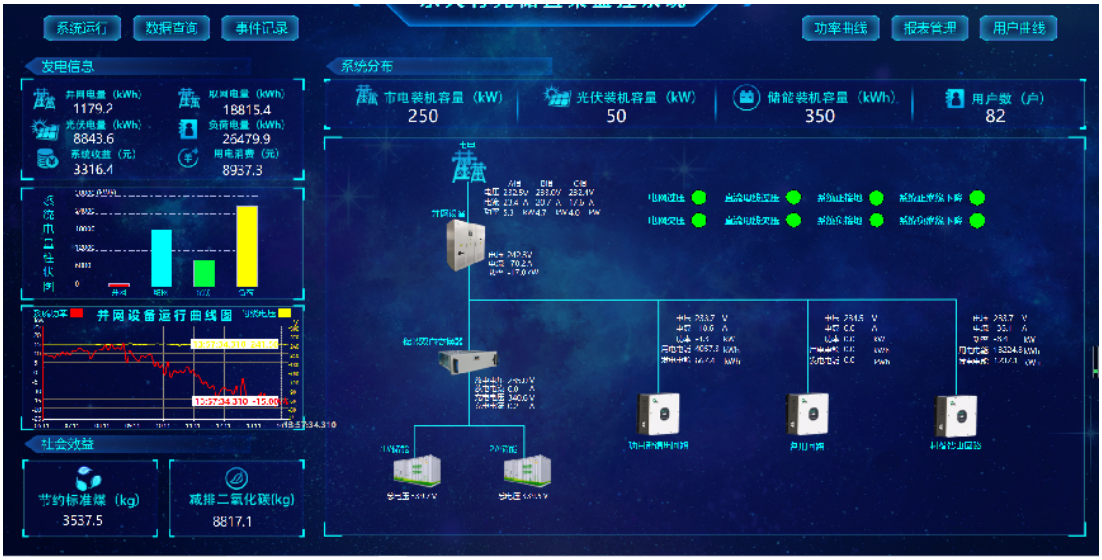


图 2-10 能量管理系统主界面

2.4 农村光储直柔系统安全用电技术研究

2.4.1 直流电的安全性能分析

安全分为设备安全与人身安全。设备安全主要取决于绝缘耐受电压。如果设备承受的电压幅值低于绝缘耐受电压，设备安全。在相同有效值下的电压下，设备的交流耐受电压时直流耐受电压的 1.414 倍。

人身安全主要通过人体的电流大小有关。（图 2-11）和（图 2-12）分别为人体对交流和直流电流感知耐受曲线。可以明显看到，人体对直流的可耐受区域（1 区、2 区））明显大于交流。常用的交流 380V 供电系统中，由于历史原因已经固定为中性点接地系统（如最常用的 TN-S 系统）。因此一旦发生人体触碰，就很容易和大地构成回路，导致电流通过人体，造成安全风险。而低压直流系统可以采用不接地系统（即 IT 系统），这样发生单极触摸后，通过的人体电流就近乎零，大大降低人体触电的风险。

由此可见，无论从设备安全和人身安全，直流比交流更加安全。

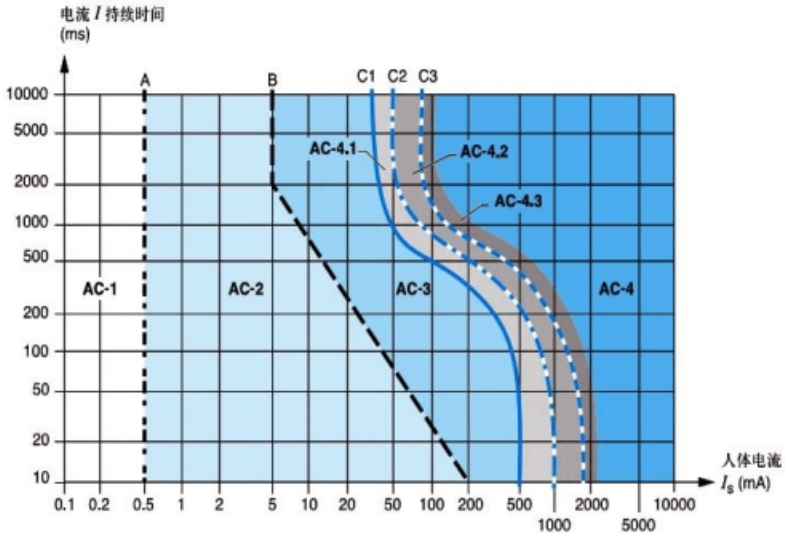


图 2-11 交流电与人体感知耐受

（数据来源：GB/T 13870.1）

AC-1 区：通电无感觉；AC-2 区：通电有感觉，但没有损伤；

AC-3 区：通电有可能会引起一定损伤，但不会引起心室纤颤，没有生命危险；

AC-4 区：通电有可能会引起心室纤颤（AC-4.1、AC-4.2、AC-4.3 可能性分别为 5%、20%、50%）。

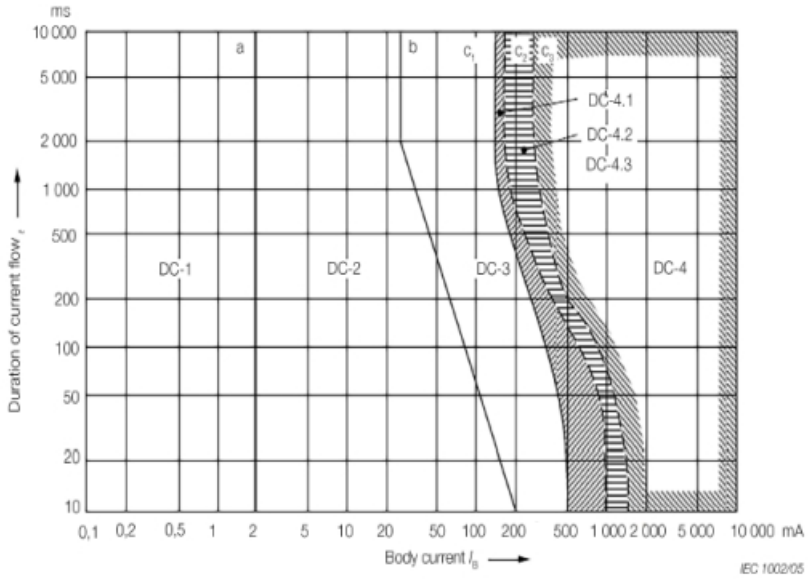


图 2-12 直流电与人体感知耐受

（数据来源：IEC Technology Report：LVDC electricity for the 21th century）

DC-1 区：通电无感觉；DC-2 区：通电有感觉，但没有损伤；

DC-3 区：通电有可能会引起一定损伤，但不会引起心室纤颤，没有生命危险；

DC-4 区：通电有可能会引起心室纤颤（DC-4.1、DC-4.2、DC-4.3 可能性分别为 5%、20%、50%）。

2.4.2 接地保护技术研究

直流系统中的电击防护性能与又跟接地型式有关，根据 2.2.4，光储直柔系统有 TT、TN、IT 三种接地方式。

设备安全与电源侧接地方式有关。TN 系统和 TT 系统的电源侧均直接接地，当电源侧采用单极接地方式时，若非接地极发生接地故障，故障电流较大，若接地极发生接地故障时，产生的故障电流很小，可忽略不计，如图 2-13A 所示；当电源侧采用中性点接地方式时，系统任一极发生故障，均可构成故障回路，产生大故障电流，如图 2-13B 所示；IT 系统的电源侧不接地或经高阻抗接地，当出现单点接地故障时，不构成故障回路，系统可短暂带故障运行，只有当系统又出现一点接地故障时，才会构成故障回路，产生故障电流，如图 2-13C 所示。

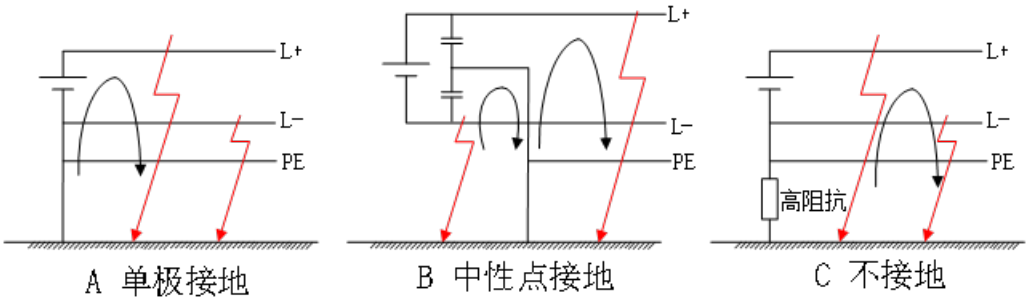


图 2-13 电源侧接地方式

当系统中存在单点接地故障，人体误触可能发生电击事故，存在安全隐患。电击等效事故模型如图 2-14 所示。其中，U_{cm} 表示故障时最大电源电压，取值 220V；R_{es} 表示电源设备接地电阻；R_{el} 表示用户侧接地电阻；R_{ep} 表示用户设备安全接地电阻；R_b 表示测试人体电阻，取值 375Ω；R_l 指的是电源和设备之间电阻；I_e 为故障时对地故障电流；I_b 为人体电击电流。

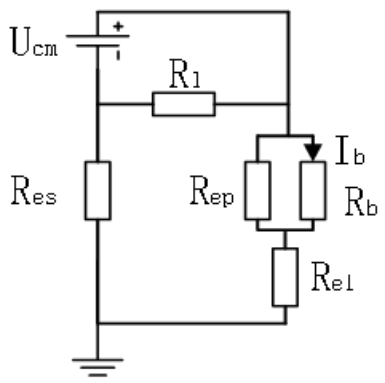


图 2-14 电击事故的等效模型

人体误触是否会发生电击事故，与系统的接地型式、设备是否采取安全接地有关。当采用 TT 接地保护时，R_{es}很小，$R_1=\infty$；当采用 IT 接地保护时，R_{es}很大，$R_1=\infty$；当 TN 接地保护时，R_{es}未知，$R_1=0$。风扇类的小功率电器设备，没有安全接地，故障点对地电阻很大，发生电击事故时 $R_{ep}=\infty$;冰箱类的大功率电器设备，故障点对地电阻很小，发生电击事故时 $R_{ep}=1\Omega$。

根据欧姆定律，由式（2-2）、式（2-3）计算流过人体的电击电流 I_b：

无安全接地：
$$I_b=\frac{U_{cm}}{R_{es}+R_{el}+R_b} \tag{2-2}$$

有安全接地：
$$I_b=\frac{U_{cm}}{R_{es}+R_{el}+R_b//R_{ep}}\bullet\frac{R_{ep}}{R_e+R_{ep}} \tag{2-3}$$

计算结果如表 2-3 所示，可以明显看出 TT 和 TN 两种接地方式在发生故障电击事故时流过人体的电流较高，远远超过人体电流安全阈值 30mA；IT 系统电源侧不接地或者经高阻抗接地，电源侧接地电阻 R_{es}趋向于无穷大，发生故障电击时流过人体电流很低。

表 2-3 不同接地型式下的电击电流值对比

接地方式	人体电流I_b
TT	1A左右
IT	取决于R_{es}
TN	1A左右

因此，无论是从设备安全角度还是人身安全角度，均推荐采用 IT 接地系统，但是仅仅有接地保护是不够的，仍需配置直流剩余电流保护器（ Rcsidual

Current Operated Protective Device for DC，DC RCD），发生接地故障时能够及时跳闸或报警。

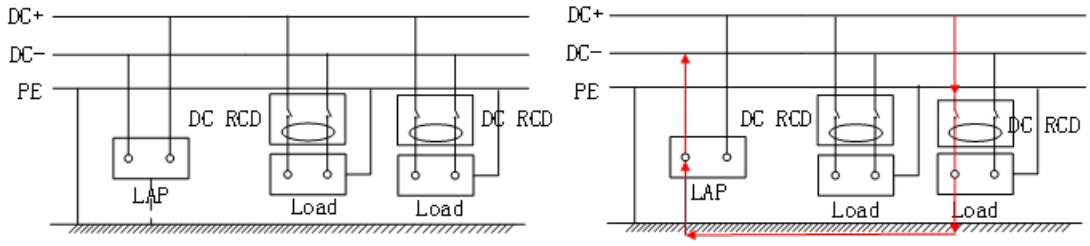
2.4.3 直流剩余电流保护技术研究

在交流领域，传统的剩余电流保护器有 AC 型、A 型、F 型和 B 型。AC 型剩余电流保护主要针对工频正弦剩余电流，通过零序电流互感器测量剩余电流；A 型剩余电流保护与 AC 型原理基本一致，对互感器进行了磁改进，在 A 型的基础上增加了对剩余脉动直流电流的保护；F 型剩余电流保护器除了能像 A 型剩余电流保护器一样确保脱扣，还能在突然施加或缓慢上升的脉动直流剩余电流叠加 10 mA 的平滑直流电流和剩余正弦交流电流时脱扣。B 型剩余电流保护器采用磁通门技术，可以实现对工频交流剩余电流、脉动直流剩余电流、平滑直流剩余电流、高频成分剩余电流以及复合波剩余电流的保护，保护时间在 100 ms 以内。可见，常用剩余电流保护装置仅 B 型可满足直流剩余电流保护需求。但 B 型剩余电流保护装置目前价格较高，不易推广。因此亟需开发一种适应直流系统的剩余电流保护器。

本文提出一种直流剩余电流保护技术方案，如图 2-15A 所示，低压直流主动监控装置 LAP 安装于母线侧、剩余电流保护执行装置 RCD 安装于馈线侧，保护范围是 RCD 馈出后端。其中：

（1）剩余电流保护执行装置 RCD。该装置具有对剩余电流检测和判断的功能，可实现动作跳闸或发出漏电报警信号。装置在配置过程中无需应用剩余电流传感器，在克服剩余电流传感器仅能检测不能执行保护动作的同时，降低了系统配置的复杂性和成本；

（3）低压直流主动监控装置 LAP。该装置用于“光储直柔”低压直流系统的安全监控，具有系统电压和系统绝缘状态的主动监测与安全控制功能，保证系统配电回路保护装置在发生电缆漏电、设备漏电以及人身触电事故时，能够可靠驱动跳闸或者发出跳闸信号。



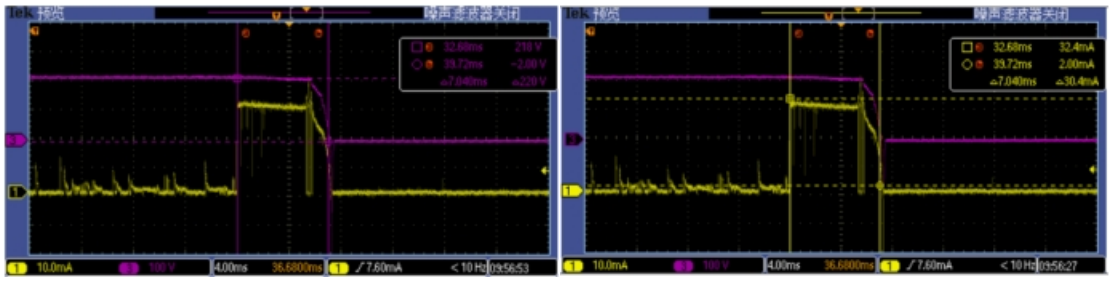
（a）直流剩余电流保护示意图　　（b）直流剩余电流保护工作原理图

图 2-15 直流剩余电流保护技术方案

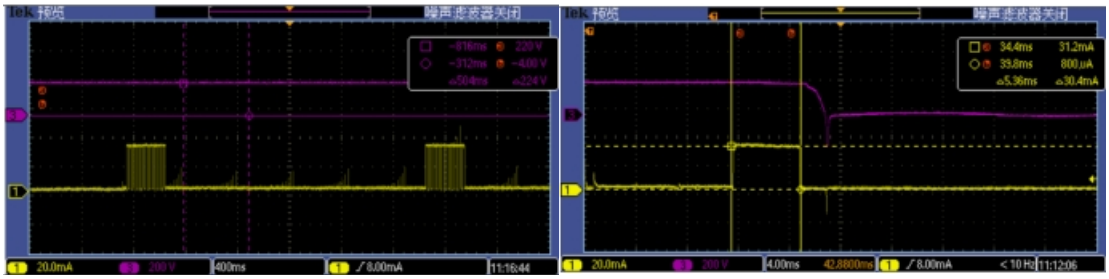
保护工作原理图如图 2-15B 所示，正常运行时，LAP 装置的接地点悬空，直流系统以 IT 型式运行；当系统中发生正极接地故障，当 LAP 装置检测到母线正极绝缘电阻下降，LAP 装置的负极接地点接地，系统开始以单极接地方式运行。若母线正极绝缘电阻持续下降，一旦流过直流 RCD 的感应电流值超过安全阈值，直流 RCD 立即故障报警或脱扣跳闸，从而达到直流单点接地保护的目的。当系统中发生两点接地故障，直接形成故障回路，当流过直流 RCD 的工作电流值超过安全阈值，直流 RCD 立即脱扣跳闸，从而达到两点接地保护的目的。

一个光储直柔系统中，一个 LAP 可以同时与多个直流剩余断路器建立对应关系，出现跳闸或发出告警信号的支路即故障支路，因此还可以实现故障的快速定位。

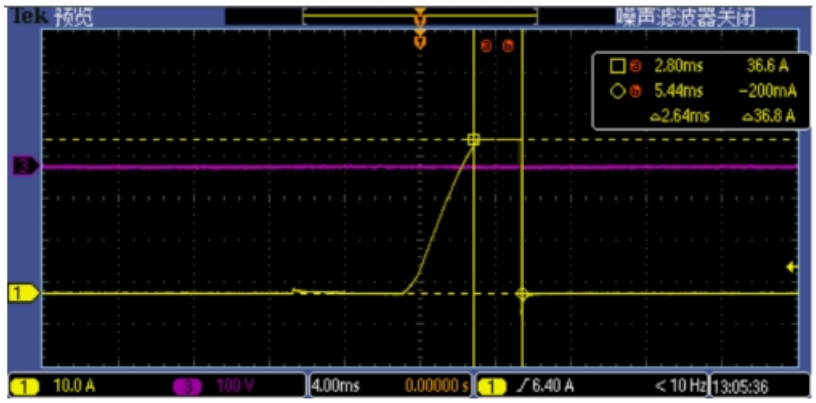
设置直流 RCD 的额定动作电流为 30mA，额定工作电流为 6A，对本保护方案进行功能测试，所得到的测试波形图如图 2-16 所示，图中通道 1 均为直流 RCD 的输出端电压，图 2-16A、图 2-16B 中的通道 4 为通过直流 RCD 的剩余电流，图 2-16C 的通道 4 为通过直流 RCD 的工作电流。图 2-16A 模拟单点接地故障下，产生平滑剩余电流，动作电流为 30.4mA、分断时间 7.04ms；图 2-16B 模拟单点接地故障下，产生脉动剩余电流，动作电流为 30.4mA、分断时间 5.36ms；图 2-16C 模拟两点接地故障下，产生短路电流，短路动作电流为 30A、分断时间 2.64ms。



A 单点接地故障保护（平滑直流）



B 单点接地故障保护（脉动直流）



C 两点接地故障（短路电流）

图 2-16 直流剩余电流保护功能测试波形图

测试结果显示，本保护方案能够实现单点接地故障保护和两点接地故障保护功能，涵盖平滑直流和脉动直流两种剩余电流形式，动作时间达 ms 级。一个光储直柔系统中，一个 LAP 可以同时与多个直流剩余断路器建立对应关系，出现跳闸或发出告警信号的支路即故障支路，因此还可以实现故障的快速定位。

剩余电流保护器 RCD 产品规格如下：

1）功能特点

●(1)适用于低压直流配电系统；

●(2)支持剩余电流保护跳闸或告警；

●(3)主动保护直流电磁线圈类负载在交流窜入时不误动；

●(4)剩余电流保护动作速度快、可靠性高；

●(5)可用于线路的过载、短路保护。

2）技术参数表

表 2-3 直流剩余电流保护器技术参数表

额定电压（V）	DC250V
额定电流	6,10,16,20,25,32,40,50,63
极数（宽度 mm）	2P:72
短路分断能力 Icn	M:10,H:20
脱扣特性	B:4～6ln C:8ln～12ln
接地电阻	5KΩ
动作时间	<0.1s
可装附件	辅助触点 OF 报警开关 SD 分励脱扣器 G65MX
机械寿命	20000

接线能力（mm2）	16
安装方式	标准导轨
保护动作	跳闸、告警（空接点输出）

低压直流主动安全监控装置 LAP 产品规格如下：

1）功能特点

●适用于低压 1kV 以下直流 IT 系统；

●可监测直流母线电压和正负极对地电压；

●可监测交流窜入直流电压和窜入极性；

●可监测正负极对地绝缘电阻；

●可根据监测数据，主动评估是否启动支路选线功能；

●具有齐全的告警类型和告警事件记录功能；

●具有完善的自检功能和自检故障退出功能；

●具有开入连锁和开出连锁功能；

●具有触摸液晶屏显示功能，可进行参数设定、数据查看、事件记录等；

●具有 TCP、RS-485 通信功能，可以方便与其他设备进行数据通信；

●具有 B 码校时功能；

●采用 2U 标准机箱，插拔的接线方式，方便安装调试和后期维护。

2）技术参数表

表 2-4 技术参数表

项 目	参数指标	
模块类型	LAP-500/XL220	
输出特性		
监测母线电压	DC220V	
系统安全状况	系统正常	系统异常
安全保护次数	自动累加并记录，可清除	
输入特性		
输入保护	熔芯	
工作电压	DC220V(1±20%)	
工作环境条件		
工作环境温度	-10℃～45℃	

工作环境	室内
相对湿度	0～95%
海拔	<=2000m
产品安全及可靠性	
绝缘强度	输入对机壳能承受 50Hz 有效值 2000VAC 或等效 2828VDC 耐压 1 分钟
	输入对输出能承受 50Hz 有效值 2000VAC 或等效 2828VDC 耐压 1 分钟
外形尺寸及重量	
外形尺寸 mm	128.7(L)×96(W)×96（H）

2.4.4 主动灭弧技术

交流负荷开断过程中产生的电弧可以在交流过零点时通过拉长电弧、强冷电弧等方式灭弧。而直流由于不存在过零点，因此在操作过程中产生的电弧不易熄灭，对负荷寿命和人员安全都会造成影响，而且持续燃烧的直流电弧还容易引发火灾甚至导致爆炸。因此直流灭弧是低压直流配电系统在户用过程中的一大难点。

2.4.4.1 直流电弧燃弧实践

为了验证实际的电弧特性，通过下面一系列的组合实验，对直流电路中的燃弧现象进行观察和研究。实验平台由 DC220V 直流电源、刀闸 K1 及负载支路组成，如图 2-17 所示。其中负载支路为不同性质的元器件组合而成的不同支路，本实验中共分为 7 组，各支路中电阻、电感、电容的参数为 R=25Ω，L=200uH，C=940uF。

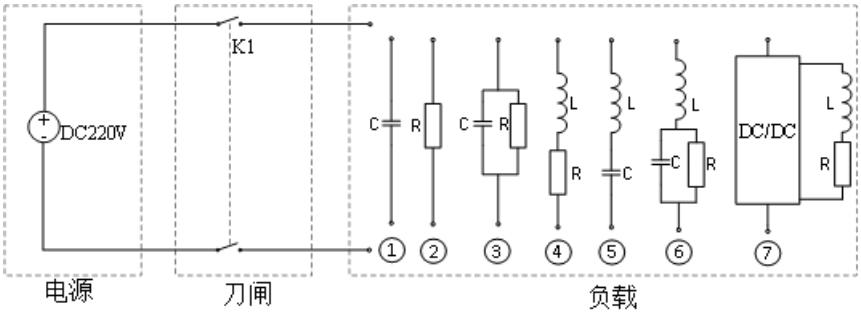


图 2-17 实验原理图

燃弧实验主要模拟工程实践中的开关开断导致的操作电弧产生过程，具体的实验步骤如下：

（1）按上述图 2-17 搭建实验电路；

（2）接通电源待电路稳定工作，断开开关，观察现象；

（3）闭合开关，观察现象；

（4）切换不同负载支路，重复上述步骤（1）~（3）并记录现象。

7 组不同支路的实验现象及原理分析按顺序总结如下：

（1）容性负载燃弧实验初步分析：开关 K1 断开瞬间，开关两端没有压差，ΔU 为 0，没有电流流过，没有观察到火花现象；合闸的瞬间，开关两端有压差，电容快速充电，ΔU 接近 220V，有轻微的火花现象。

（2）阻性负载燃弧实验初步分析：开关 K1 断开瞬间，开关两端有压差，ΔU 接近于 220V，由于负载为纯阻性，有明显的燃弧现象。同样在 K1 合闸的瞬间，开关两端有压差，近似 220V，同样会有电流流过，也会有火花现象。

（3）容性、阻性负载燃弧实验初步分析：K1 在分闸的瞬间,电容将 K1 两端的压差变小，不容易起弧。即使起弧，前端的电源通过 K1，通过电弧给电阻电容同时供电，电容处于充电状态，电流大于 IR,这个大电流会让电弧的动态特性偏离静态特性，更容易灭弧。K1 合闸的过程中，合闸的电流等于电容的充电电流加上电阻的电流 I=IC+IR，所以会有明显的火花。

（4）感性、阻性负载燃弧实验初步分析：开关 K1 断开的瞬间，流过开关 K1 的电流缓慢变小，开关 K1 断开的瞬间，电感上会产生一个电压，与电源电压为串联关系，意味着 K1 的电压差变大，更容易起弧。在开关 K1 闭合的瞬间，电感减小流过 K1 的电流，只看到轻微的火花。

（5）感性、容性负载燃弧实验初步分析：K1 开关开断、闭合的瞬间，因为没有电流，均未观察到电弧现象。

（6）感性、阻性、容性组合负载初步分析：直流电路中，感性、容性、阻性的结合最符合直流负载的实际应用情况。K1 在开断和闭合的瞬间，有轻微的火花，K1 分闸时有微小火花，电容起到了抑制作用，K1 合闸时有微小火花，电感起到抑制作用。

（7）开关电源类负载初步分析：K1 在开断和闭合的瞬间，有轻微的火花，K1 分合闸时产生轻微火花，等效于上述的第六个感性容性阻性组合的实验组合。

无电弧、微小火花以及剧烈燃弧的实验现象分别如图 2-18 的（a）~（c）所示。

（a）无电弧现象　　（b）操作时的火花放电　（c）操作时燃弧

图 2-18 实验现象

通过上述 7 个分组实验，我们对观察到的现象和表现程度进行比较，相关数据见表 2-5：

表 2-5 实验分组比较表

组合	负载	开关开断		开关闭合	
	R=25Ω,L=200uH，C=940uF	现象	程度	现象	程度
1	纯容性	未见	-	火花	轻微
2	纯阻性	燃弧	明显	火花	轻微
3	容性、阻性	火花	明显	火花	明显
4	感性、阻性	燃弧	明显	火花	明显
5	感性、容性	未见	-	未见	-
6	感性、阻性、容性	火花	轻微	火花	轻微
7	开关电源	火花	轻微	火花	轻微

结合实验现象和表 2-5，通过电弧现象的实验，得出以下几点结论：

1）不同的负载条件会影响着电弧现象的发生。电感在电路中会加大开关开断时候的电弧，抑制开关闭合时的电弧；电容在电路中减小开关断开时的电弧，加大开关闭合时的电弧。

2）开关电源电路是一个非常完美的电感、电容、电阻组合，自带灭弧特性。

3）在上述实验过程中，我们甚至观察到飞弧短路的现象。应研制相关保护或灭弧装置，在电弧产生时迅速灭弧。

4）电路燃弧时金属接头有明细的灼烧痕迹，如何更有效地模拟电弧对电极的灼烧过程和电弧的能量释放，还需要进行大量的研究过程。

2.4.4.2 直流灭弧方法

对于直流灭弧方法，仍处于研究探索阶段。而在低压直流应用过程中，人们的关注点主要是电器产品操作电弧的灭弧，对于低压直流电器产品而言，目前最突出、也最具优势的就是直流主动式灭弧装置，主动灭弧核心模块实时检

测家电开关两侧的电压、电流，当电压电流发生起弧判定条件内的变化时，主动灭弧核心模块迅速限压限流，阻断电弧。在阻感电器的电源输入端增加主动灭弧装置可以直接实现阻感负载的无弧开断，其示意见图 2-19。

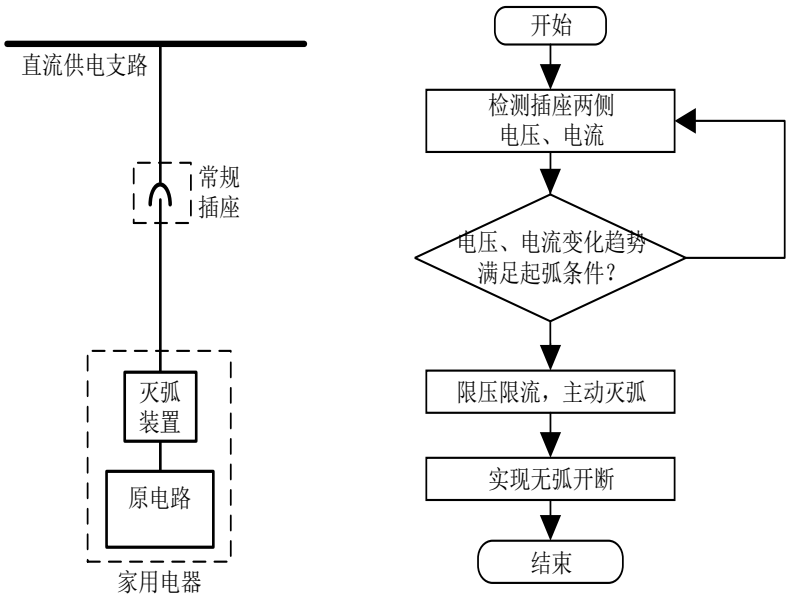


图 2-19 直流主动灭弧示意

对装置的灭弧效果进行测试，测试电路见图 2-20，其中电源电压为直流 220 V，开关 S 为铜片触点，电阻阻值 10Ω，电感 200μH。

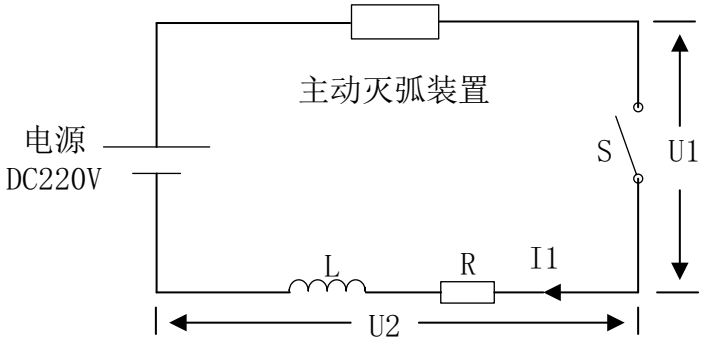
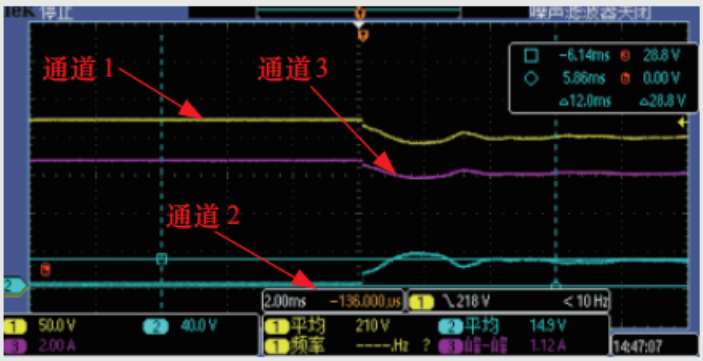
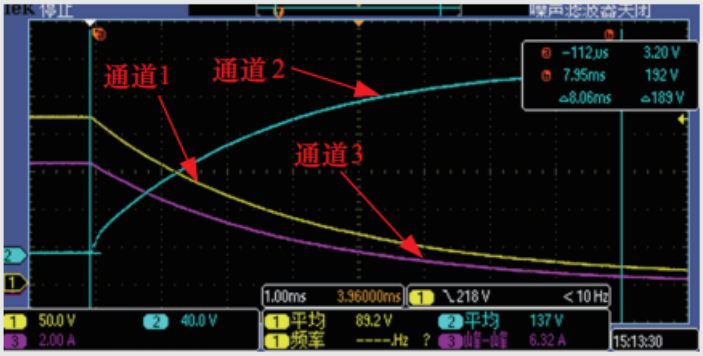


图 2-20 主动灭弧测试电路图

示波器通道 1 测试开关 S 在断开过程中的电压 U1，通道 3 测工作回路电流，通道 2 测阻感负载两端的电压 U2，加主动灭弧前后的电压、电流波形见图 2-21。由图 2-21（a）可见未加主动灭弧装置前，断开 S 过程中，U1 从 0 V 增加到约 28.8 V，工作回路电流约有 1.12 A 的降幅， U2 相应下降约 28.8 V。上述电压电流值即为 S 在断开过程中拉弧所形成的电弧电压和电流；加主动灭弧装置后，在断开 S 过程中，U1 迅速上升为电源电压，工作回路的电压电流也随之降为 0，无电弧产生，见图 2-21（b）。



(a) 未加主动灭弧装置时



(b) 加主动灭弧后

图 2-21 主动灭弧测试波形

主动灭弧模块的具体参数如表 2-6 所示。

表 2-6 电弧灭弧电路原理图

序号	项目	参数
1	直流输入电压范围	220V-375V
2	直流输出电压范围	220V-375V
3	最大工作功率	4.5KW
4	额定工作功率	3KW
5	工作环境	-10℃~+45℃，湿度 90rh%以下
6	温升	40℃

2.5 本章小结

本章对光储直柔系统的电压等级、接地形式、接线方式以及控制策略和用电安全进行了研究，为后续项目的实际实施提供技术支撑。

3 庄上村光储直柔系统的设计与实施

3.1 庄上村光储直柔系统的必要性和可行性分析

近两年，在“清洁采暖”和大气污染治理政策的推行下，已在庄上村推行“煤改电”政策，预计未来用电量将呈上升趋势。但当前“煤改电”政策推行也出现一定问题，目前村民反映采暖季电费较高，因此也出现了少量返煤情况。因此对于村民而言，采用“自发电”解决电费贵问题是十分必要的。

根据 1.1，庄上村地处山西南部，属于光伏资源 III 类地区，光伏年利用小时 1200 小时左右，拥有大量可利用的光伏可再生资源。如图 3-1 所示，庄上村农宅结构布局基本相似，屋顶多为半坡半平，安装光伏的基础条件较好，加上房屋周围的荒地资源，约有 320 平米可开发利用。这为在庄上村建设“光储直柔”系统奠定了良好的基础。

图 3-1 村内建筑屋顶（部分已完成光伏板安装）

3.2 庄上村光储直柔系统技术方案

根据第二章关键技术研究，设计的农村光储直柔系统架构如图 3-2 所示，包括户级光储直柔系统和村级光储直柔系统，二者组网通过变压器（AC/DC）与交流电网相连。户级光储直柔系统电压等级为 DC220V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑结构，通过直来电实现系统的电压变换和协调控制，输出电能主要满足用户炊事、采暖、家庭用电需求，剩余电流送到村级光储直柔系统；户级光储直柔系统的直来电的输出并联，构成村级光储直柔系统，电压等级为 DC750V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑，便于村内各户之间以及与电网的能量交互，同时满足公共照明、农机具等公共场所

的用电需求。户级蓄电池容量按用户需求配置，村级蓄电池容量按比例配置：400kVar 台区容量的 20%，200kVar 台区容量的 40%，其主要作用是保障用电，平抑功率波动。

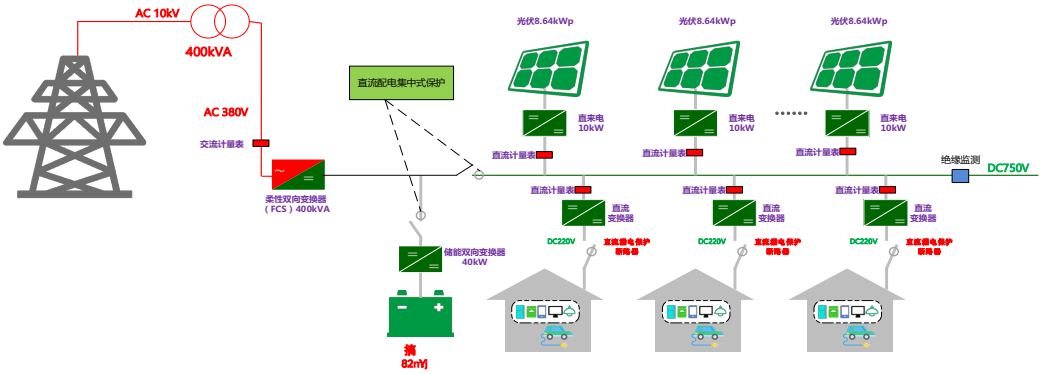


图 3-2 庄上村光储直柔系统架构示意图

农村光储直柔系统工作流程图如图 3-3 所示。光资源始终保持最大利用状态；户级光储直柔系统优先利用光伏发的电，如有多源电量则送到村级光储直柔，如电量不足则优先从村级光储直柔系统取电，再不足部分则从原有供电公司的电网取电，从而始终保持新能源的最大化就地利用。

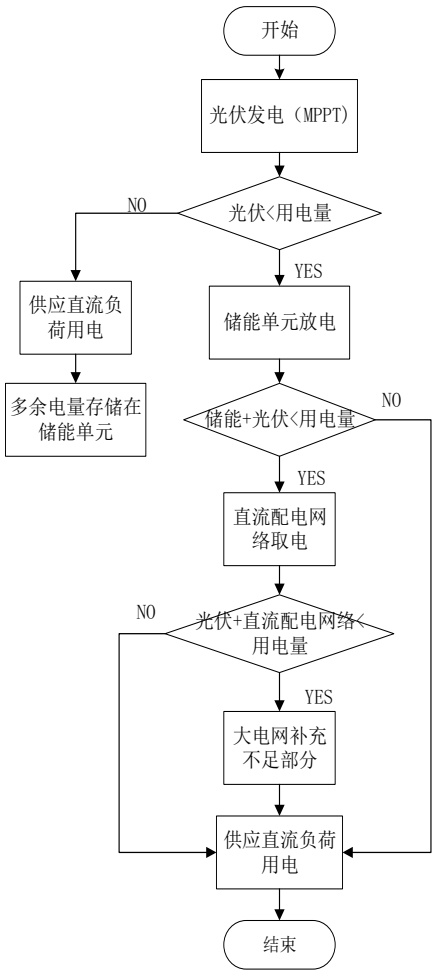


图 3-3 农村光储直柔系统工作流程图

容量配置方面，主要针对光伏、储能以及电网接口变换器进行讨论。根据商业模式的不同，容量配置原则也有所差异。配置原则如表 3-1 所示，已知本项目的商业模式为自发自用，余电上网模式。

表 3-1 光储直柔建筑容量配置推荐表

序号	系统商业模式	容量配置类型		
		光伏	储能	电网接口变换器
1	自发自用	满足负荷需求即可	综合考虑储能首要用途及配置成本	整流型，满足负荷需求即可
2	全部上网	满足空间约束，容量尽可能大	考虑集中储能，单个用户不配置	逆变型，满足光伏发电逆变需求
3	自发自用，余电上网	满足空间约束，容量尽可能大	综合考虑储能首要用途及配置成本	AC/DC 双向，逆变满足光伏发电的逆变需求；整流满足负荷用电需求

3.2.1 户级光储直柔设计方案

庄上村农宅集中分布于 4 处，均为一层砖混结构，24 砖墙，坡屋顶比例较高，可利用屋顶面积约为 204m^2，常住农宅、暂住农宅、无人居住农宅分别占比 72%、12%和 16%。常住农宅住户作为农村人口的主体，是农村电力的主要消耗者，而暂住农宅和无人居住农宅基本可作为电力主要输出者，为增大闲置房屋的经济价值和光伏收益，在实际光伏铺设工程中应酌情考虑，将农宅屋顶物尽其用。

对于常住农宅和暂住农宅，户级光伏直柔母线电压设置为 220V，通过直来电装置与村级直流母线相连接，结构如图 3-4。对于无人居住农宅，家庭单元主要是屋顶的光伏阵列和单向输出电力的 DC/DC，光伏尽量铺满屋顶，结构如图 3-5。

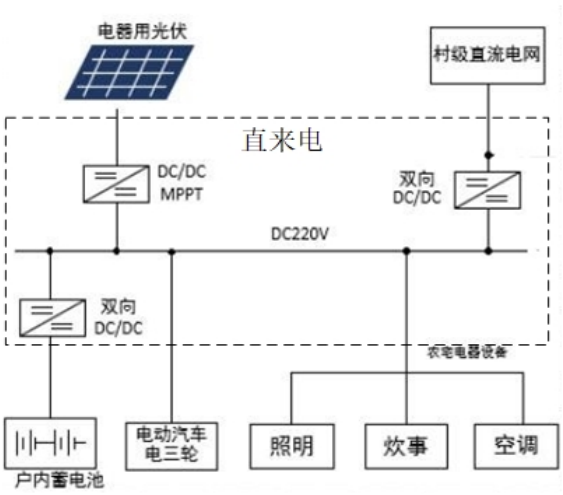


图 3-4 常住农宅和暂住农宅户级光储直柔系统

图 3-5 无人居住农宅户级光储直柔系统

3.2.2 村级光储直柔设计方案

户级光储直柔直来电输出并联，电压等级为 DC750V，经 AC/DC 并网，满足村内的路灯、公厕等公共区域的用电需求。村内配置合理容量的储能，用于削减光伏输出峰值、保证夜间公共照明和冬季用电。

具体实现方式上，采用 DC750V 电压等级作为配电网电压，光伏发电通过光伏变换器“T 接”接入配电网，配电网通过台区互联装置与台区变压器之间实现双向功率互动，不同台区之间可直接通过直流母线实现互联，配合台区互联装置的控制策略，实现不同台区之间的功率互济和储能共享。台区互联系统的拓扑如图 3-6 所示。

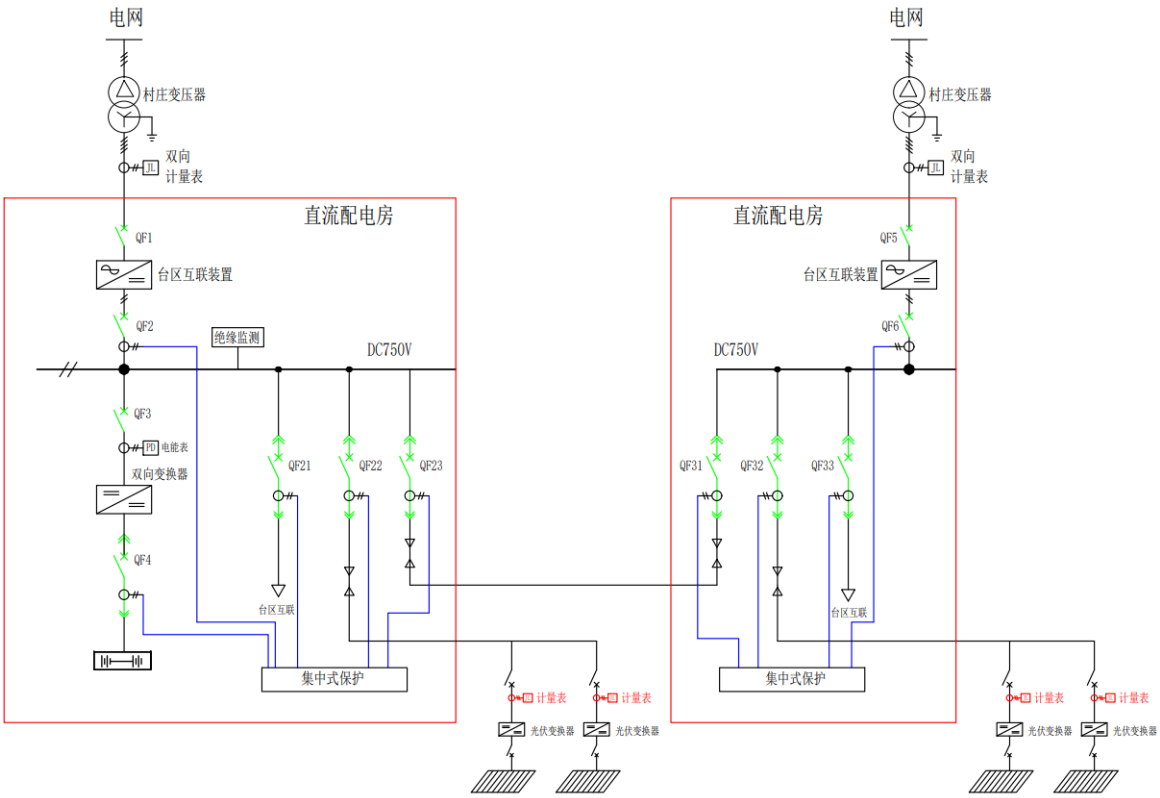


图 3-6 台区互联系统拓扑结构图

以两个台区为例，说明台区互联系统的运行模式划分及协调控制逻辑（余量上网模式）。

运行模式 S1：两台区正常并网运行

柔性互联装置、光伏及储能 DC/DC 变换装置均采用定电压模式，优先消纳光伏。直流侧负荷无法消纳光伏时，多余部分逆变上网；

当台区负载率超过 50%时，以均载逻辑计算需转供的功率，通过光伏及储能 DC/DC 的负载均衡实现功率互济；当光伏及储能功率不足时，负载率低台区的柔性互联装置优先向负载率高的台区供电。

运行模式 S2：单个台区失电

当单个台区失电时，相应柔性互联装置会进入孤岛保护，切断与电网功率传输，优先由光伏及储能提供故障台区功率。当光伏及储能不足时，由另一台区供电。

运行模式 S3：2 个台区失电

当 2 个台区同时失电，柔性互联装置 1、2 会自动识别进入孤岛保护，切断与电网功率传输。随后由光伏及储能给负荷供电，并配合负荷功率调整维持固定时间供电，直至故障恢复，转至 S1 或 S2 运行。

3.3 庄上村光储直柔系统核心装备及关键技术

3.3.1 台区柔性互联装置

柔性互联装置根据是否是电器隔离分为隔离型装置与非隔离型装置，非隔离型台区互联装置直流侧配置两路出线间隔，采用非隔离型双向变流器，仅用于台区间互联，实现多台区功率互济或协同消纳。隔离型台区互联装置直流侧配置四路出线间隔，采用隔离型双向变流器，适用于分布式光伏、分布式储能、直流充电桩等采用直流方式接入台区内及多台区间的功率互济或协同消纳。

综上所述，农村台区互联场景采用隔离型台区互联装置，隔离型台区互联装置通过三相全桥变换器，实现整流、变流。整流输出经 EMC 滤波器滤波后注入直流母线。变流输出经滤波器滤波发成正弦波电压，再由三相变压器隔离升压后并入交流电网。隔离型台区互联装置内部的主电路原理如图 3-7 所示。

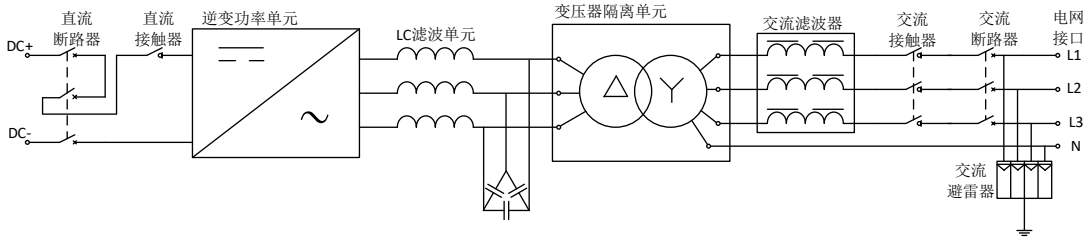


图 3-7 台区互联装置拓扑

装置的关键技术参数如表 3-2 所示。

表 3-2 台区互联装置关键参数

序号	项目	参数		
1	电压等级	AC380/DC750V		
2	额定容量	250kVA/400kVA/500kVA		
直流侧参数				
3	工作电压范围	DC500V-820V		
4	最大输出直流电流	500A/800A/1000A		
交流侧参数				
5	最大过载率	10%（不小于 1min）	额定功率下的功率因数	>0.99
6	最大总谐波失真	<3%（额定功率）	功率因数可调范围	超前 0.9~滞后 0.9
7	允许电网电压范围	AC310~450V	允许电网频率范围	45~55Hz
保护及其他参数				
8	直流侧保护	过压保护、欠压保护、过流保护、短路保护、极性反接保护		

9	交流保护	过压保护、欠压保护、过流保护、短路保护
10	模块温度保护	具备

3.3.2 功率变换及保护测控装置

3.3.2.1 功率变换装置

1）光伏 DC/DC 变换器

采用交错并联 boost 升压结构，融合 MPPT 最大功率点跟踪及精确限压限流策略，可实现光伏发电的高效率转化，具体参数如表 3-3 所示。

表 3-3 光伏 DC/DC 变换器关键参数

序号	项目	参数
1	额定功率	10kW
2	最大功率点电压	550V
3	MPPT 电压范围	300~800V
4	额定输出电压	DC750V
5	额定输出电流	15A
6	通讯接口	RS485，Modbus 协议

2）DC750V/DC220V 降压变换器

配合余电上网模式，对于有直流负荷用电需求的场合，采用 DC750V/DC220V 降压变换器实现光伏发电的自发自用，为农户家中的直流负荷供电。

3.3.2.2 保护测控装置

系统中的断路器一般要求无极性且具有灭弧功能，不应配置欠压、过压脱扣装置 **Error! Reference source not found.**。除断路器外，系统内配置绝缘监测装置以及直流线路集中保护装置。控制方面，台区互联装置具备恒功率、直流恒电压、交流恒压恒频、直流下垂控制、虚拟同步控制等功能，并可根据需要自适应或根据控制指令切换控制模式，配合台区融合终端，可实现不同台区间的功率互济。

1）绝缘监测装置

绝缘监测装置是 IT 接地直流系统中常用的监测保护装置 **Error! Reference source not found.**，常规情况下在各母线段均需配置，但需配置互锁逻辑，并设

定主装置，考虑到绝缘监测装置多采用桥式电路，在台区互联运行时，仅主绝缘监测装置运行，以避免不同装置桥臂电阻的相互影响。

2）直流线路集中保护装置

直流线路集中保护装置具备多路（最多可支持 12 路）直流线路的保护、测量、控制与监视功能，可实现方向速断、方向过流、过欠压以及开入量保护，装置的原理图如图 3-8 所示。

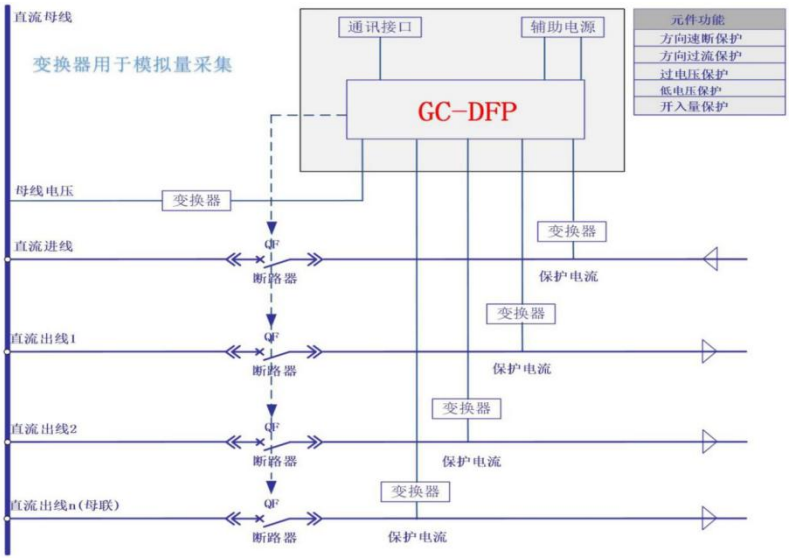


图 3-8 直流线路集中保护装置原理示意

直流线路集中保护装置具体参数指标如表 3-4 所示。

表 3-4 直流线路集中保护装置关键参数

序号	项 目	参数指标
1	电流整定范围	0.1 In～5.00In
2	电压整定范围	0.1Un~1.20 Un
3	短延时时间定值整定范围	0.000～1.000s
4	长延时时间定值整定范围	1.000～600.000s
5	电流动作值误差	≤±3％
6	动作时间	速断动作时间 <3ms（去除机构动作时间，机构动作时间<10ms），短延时段动作值平均误差不超过±10ms；长延时不超过±40ms。
7	事件记录分辨率	≤ 2ms

3）台区融合终端

现有的台区融合终端除具备电压、电流、有功功率、无功功率以及功率因数等参数的监测功能以外，部分高级业务功能还包括了支持实现分布式能源相关设备接入，并对分布式能源进行监控和管理。在具体的运行控制方面，后续一方面可以考虑将台区融合终端数据开放给台区柔性互联装置以实现策略调整，一方面也可以通过台区柔性互联装置相互间的通信实现不同台区数据的交互。

电能就地消纳后余电集中上网，辅以储能和柔性控制技术，实现多个台区的功率互济，实现了分布式光伏的高效消纳，提升发电用电的能效；有效解决了分布式光伏给电网带来的部分扩容压力、三相不平衡、谐波、电压波动及闪变等问题；解决了光伏发电和百姓用电的随机波动性问题，实现了对电网的柔性友好接入，及可观、可测、可控。

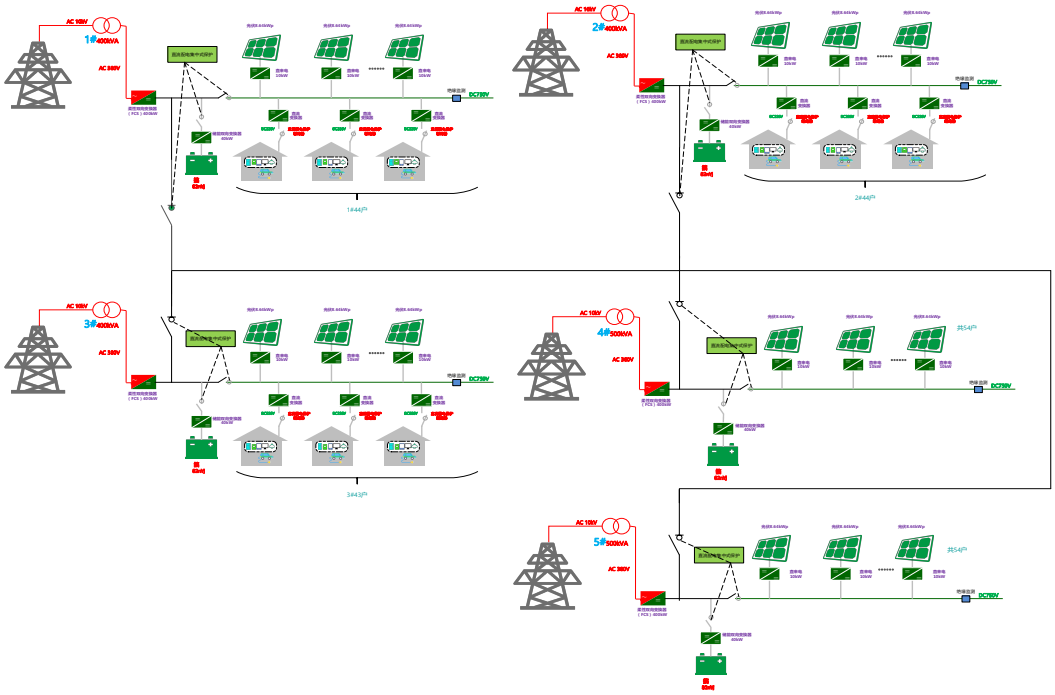


图 3-9 农村光储直柔系统柔性互联方案

3.4 庄上村光储直柔实施方案

对庄上村 233 户农户屋顶进行荷载检测，实际能铺设光伏的用户 136 户，根据农户自身意愿最终在 71 户农户屋顶进行光伏铺设，71 户中斜屋顶数量 15 户，平屋顶数量 56 户。具体工程实施方案如下：

光储直柔系统分为台区改造、光伏发电、储能、户用共四大部分，系统拓扑如图 3-10 所示。

本次项目涉及村内新建的 4 个 400kVA 台区及现有的 1 个 200kVA 台区，每个台区在台区变压器 380V 下口增设 AC/DC 双向变换器，将 380VAC 整流为 750VDC 系统，新增 750VDC 设备，线路为新架设 750VDC 线路。

庄上村共安装 5 座光伏发电单元，4 个台区平均接入容量为 0.449MWp 的光伏发电单元，1 个台区接入 0.233MWp，光伏发电规划建设总容量 2.06496MWp，拟考虑采用 750VDC 接入每户光伏配电箱，经线路汇流后接入台区。

储能系统在台区下口就地设置，各台区按 80kW/120kWh 配置一个储能子系统，全村配置储能总容量为 400kW/600kWh。

户用部分采用 220VDC 系统，户用电器设备均采用 220VDC。

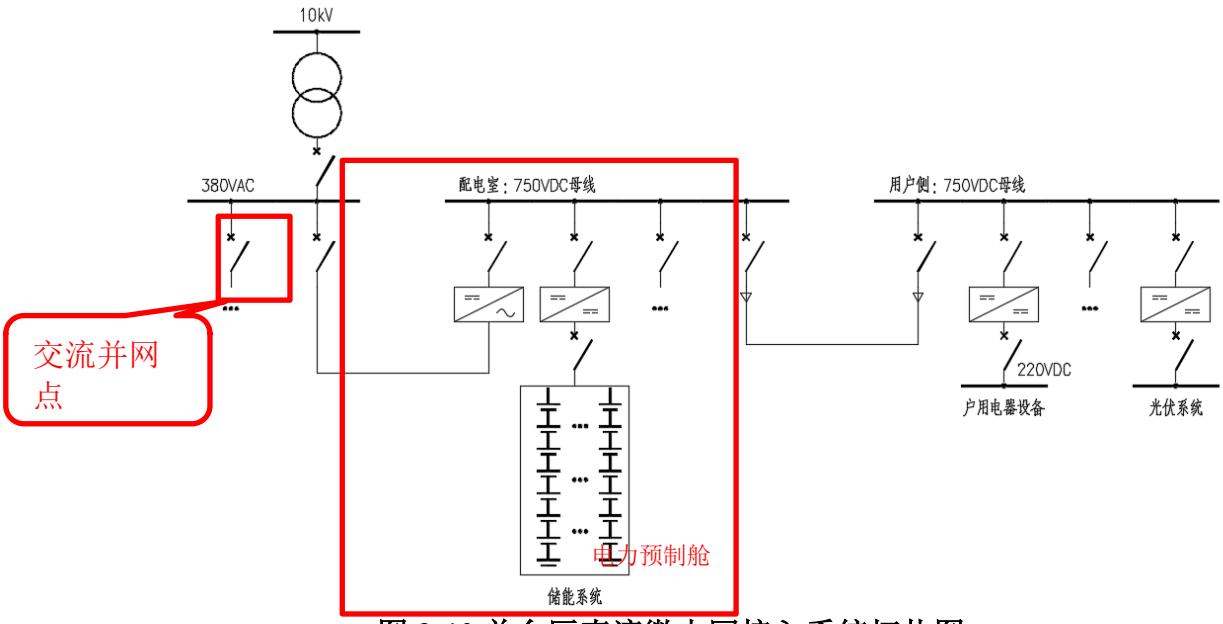


图 3-10 单台区直流微电网接入系统拓扑图

3.4.1 设计依据

设计参照执行的规程、规范:(不限于此)

《船舶直流电力系统短路电流计算方法》（GBT35715）

《光伏电站接入电力系统技术规定》（GB/T 19964）

《光伏电站接入电力系统设计规范》（GB/T 50866)

《光伏发电系统接入配电网技术规定》（GB/T 29319）

《光伏发电接入配电网设计规范》（GB/T 50866)

《光伏系统并网技术要求》（GB/T 19939）

《光伏电站无功补偿技术规范》（GB/T 29321）

《太阳能光伏与建筑一体化应用技术规程》（DGJ 32/J87）

《建筑设计防火规范》（GB 50016）

《火力发电厂与变电站设计防火规范》（GB 50299）

《继电保护和安全自动装置技术规程》（GB 14285）

《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》（GB 50062）

《中低压直流配电电压导则》（GB/T 35727）

《低压直流系统与设备安全导则》（GB/T 39042）

《低压直流系统标准电压和电能质量要求》（IEC TR 63282）

《并网型交直流混合微电网运行与控制技术规范》（T/CEC 151）

《直流配电网与交流配电网互联技术要求》（T/CEC 167）

《建筑物防雷设计规范》（GB 50057）

《电能量计量系统设计技术规程》（DL 5202）

《外壳防护等级（IP 代码）》（GB 4208）

《电力工程电缆设计规范》（GB 50217）

《3.6kV ～ 40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》（DL/T 404）

《3kV ～ 10.75kV 高压配电装置设计规范》（GB 50060）

《电力变压器选用导则》（GB/T 7468）

《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228）

《分布式电源接入电网技术规定》（Q/GDW 480）

《电力工程直流系统设计技术规程》（DL/T 5044）

《多功能电能表》（DL/T 614）

《建筑物防雷设计规范》（GB 50057）

《电能质量 电压波动和闪变》（GB 12326）

《电能质量 供电电压允许偏差》（GB 12325）

《电能质量 公用电网谐波》（GB 24337）

《电能计量 装置技术管理规程》（DL/T 448）

《电能质量 三相电压允许不平衡度》（GB/T 15543）

《电能质量 电力系统频率允许偏差》（GB/T 15945）

《火灾自动报警系统设计规范》（GB 50116）

《电力装置的电测量仪表装置设计规范》（GB/T 50063）

《地区电网调度自动化设计技术规程》（DL/T 5002）

《电力系统调度自动化设计技术规程》（DL/T 5003）

《火力发电厂、变电站二次接线设计技术规程》（DL/T 5136）

以上规范均以最新版为准。

3.4.2 电气主接线

1） 光伏单元主接线

根据台区分布、建筑分布、屋顶可利用面积以及装机容量，光伏场区共安装 5 座光伏发电单元，4 座光伏发电单元发电容量为 0.449MW，1 座光伏发电单元发电容量为 0.233MWp。

本工程采用分布式发电、就地直流并网的方式进行设计，选用单晶硅 540Wp 光伏组件和 10kW 直流光伏变换器。

经核算，适配 10kW 直流光伏变换器，采用 16 块光伏组件串联成一路光伏组件串。每台 10kW 直流变换器可接入 1 串，经直流电缆就近上杆后，通过穿刺线夹与架空铝绞线连接。

2） 0.75kV 电气主接线

光伏电站新建 0.75kV 预制舱 5 座，每座预制舱配置进线 1 回，出线 2 回，储能馈电回路 1 回，每个 750V 系统采用单母线接线方式，并设计集中式保护 1 台。

3.5 系统前期的测试情况

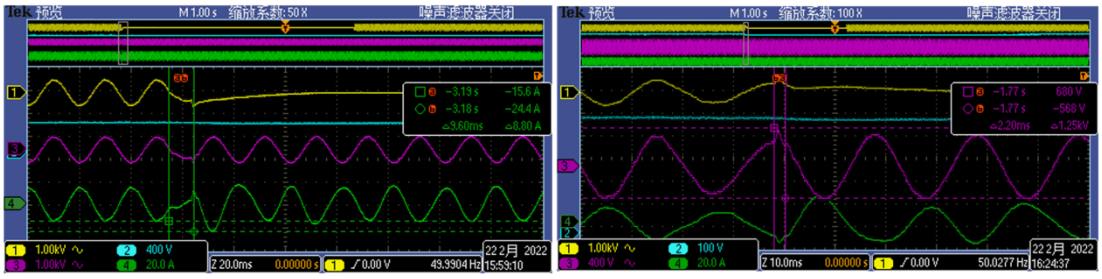
3.5.1 台区互联装置离网切换

并网状态，20%负载条件下，测试装置在不同运行模式下的切换特性：

台区互联装置运行于限压逆变模式，此时切换到离网，切换时间约 9.6ms，如图 3-11（a）所示。

台区互联装置运行于恒压整流模式，此时切换到离网，切换时间约 2.2ms，如图 3-11（b）所示。

切换时间满足常规敏感负荷的电压暂降耐受时间，基本上不会对负荷供电产生影响。



（a）限压逆变切换至离网　　（b）恒压整流切换至离网

图 3-11 台区互联装置切换波形

3.5.2 线路损耗情况

不同时间段在不同线路测得的线路损耗比值如图 3-12 所示，线路损耗 1.8%~6.3%，总平均线损约 4%，低于设计限值 7%。

东支线线路损耗比值

时间	东支线直来电总功率/kw	东支线电表显示功率/kw	差值	损耗百分比
11：00	161.23	157.35	3.88	2.4%
12：00	201.97	186.55	15.418	7.6%
13：00	140.46	132.07	8.39	6.0%
14：00	149.23	141.00	8.23	5.5%
15：00	167.67	153.58	14.09	8.4%
16：00	92.52	86.16	6.36	6.9%

西支线线路损耗比值

时间	西支线直来电总功率/kw	西支线电表显示功率/kw	差值	比值
11：00	125.94	123.29	2.65	0.0210
12：00	157.78	155.04	2.74	1.7%
13：00				
14：00	147.98	146.25	1.73	1.2%
15：00	103.35	100.91	2.44	2.4%
16：00	65.23	68.24	-3.01	-0.0461

东支线线路损耗比值

时间	东支线直来电总功率/kw	东支线电表显示功率/kw	差值	比值
11：00	154.27	143.04	11.23	7.3%
12：00	151.64	143.64	8	5.3%
13：00				
14：00	159.98	151.99	7.99	5.0%
15：00	161.54	152.35	9.19	5.7%
16：00	95.70	87.67	8.03	8.4%

西支线线路损耗比值

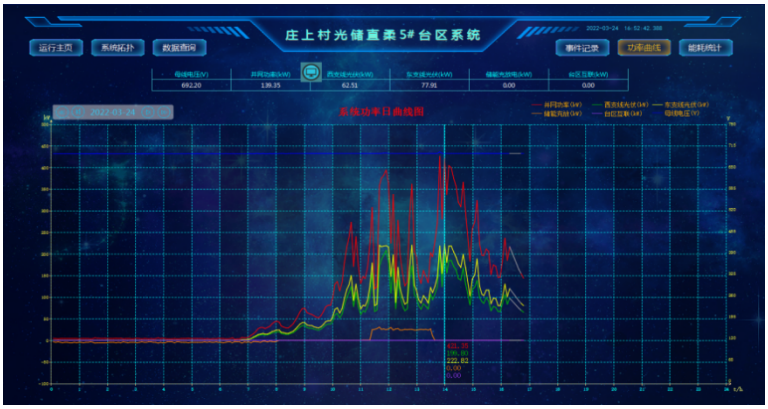
时间	西支线直来电总功率/kw	西支线电表显示功率/kw	差值	损耗百分比
11：00	139.07	139.41	-0.34	(0.0024)
12：00	168.13	164.75	3.38	2.0%
13：00	165.24	162.84	2.4	1.5%
14：00	157.42	155.20	2.22	1.4%
15：00	129.62	126.71	2.91	2.2%
16：00	71.21	69.88	1.33	1.9%

图 3-12 线路损耗情况

3.5.3 功率及电量情况

5 号台区装机容量 466kW，从 2022 年 1 月份运行，运行时间最早，目前并网电量已经超过 20 万千瓦时，从电网取电约 179 千瓦时。所有台区目前总电量超过 36 万千瓦时，按照芮城并网电价 0.375 元/度计算，已产生收益 13.94 万元。整个台区互联系统的监控界面如图 3-13（a）～（c）所示。

（a）系统主界面



（b）系统功率曲线

用户17-5数据

故障状态	0
输入电压(V)	665.50
输入功率(kW)	7.15
输出电压(V)	751.70
输出功率(kW)	6.92
模块温度(℃)	25.00
日发电量(kWh)	19.00
累计发电量(kWh)	775.00

用户16-1数据

故障状态	0
输入电压(V)	670.90
输入功率(kW)	7.17
输出电压(V)	745.90
输出功率(kW)	7.06
模块温度(℃)	21.00
日发电量(kWh)	18.90
累计发电量(kWh)	792.30

用户8-1数据

故障状态	0
输入电压(V)	682.10
输入功率(kW)	6.91
输出电压(V)	738.50
输出功率(kW)	6.91
模块温度(℃)	20.00
日发电量(kWh)	18.90
累计发电量(kWh)	854.10

用户8-2数据

故障状态	0
输入电压(V)	651.60
输入功率(kW)	7.67
输出电压(V)	743.40
输出功率(kW)	7.58
模块温度(℃)	28.00
日发电量(kWh)	13.70
累计发电量(kWh)	814.10

（c）用户运行数据

图 3-13 台区互联系统监控界面及发电情况

3.6 本章小结

本章主要介绍了庄上村光储直柔系统示范工程的具体技术方案及设计方案，并给出了现有系统的建设调试进度情况以及系统运行效果，当前已实现各台区的独立运行，并具备互联运行条件，下一步将对各个台区进行柔性互联运行测试。

4 农村光储直柔系统的效益评价及商业推广模式分析

4.1 农村光储直柔系统效益评价

4.1.1 社会效益

1）参考中华人民共和国生态环境部官方文件：每产生 1kWh 电能相当于消耗 0.404kg 标煤，释放 0.272kg 粉尘，0.997kg 二氧化碳，0.03kg 二氧化硫，0.015kg 氮氧化物计算。本示范工程光伏装机容量 2MW，平均每年预计可提供 240 万 kWh 清洁电力，节约标准煤 966t，减少排放二氧化碳 2392.8t、二氧化硫 72t、粉尘排放 652.8t、氮氧化物 36t。建设本工程可以减少一定的化石能源的消耗，有利于环节环境保护压力，实现经济与环境的协调发展，节能和环保效果显著。

2）本示范工程采用光储直柔技术对光伏发电进行传输消纳，与传统分布式能源技术相比，光储直柔技术在电能质量问题、电网的扩容压力问题、电网调度问题、台区重过载问题、线路损耗、供电可靠性等具有明显的优越性，能够避免分布式大规模并网带来的电能质量问题、缓解电网扩容压力、减少线路损耗、提高供电可靠性、提高能源利用效率，具体对比分析如表 4-1 所示。

表 4-1 光储直柔技术与传统分布式能源技术的对比分析

项目	传统分布式能源技术	光储直柔技术
电能质量问题	**1、有电压双向越限问题** 在日间日照较好的情况下，光伏发电量较大、用电负荷较轻，易出现功率倒送导致过电压的情况较为明显，严重时甚至造成用户设备损毁引发投诉。另一方面，随日落后光伏发电量下降、用户负载上升，部分用户又存在低电压问题。	**1、无电压双向越限** 光伏发电充足或不足时，光储直柔系统通过自身调节使直流工作电压始终工作在电压带宽内，不会存在电压越限问题。
	2、有电压波动和闪变问题 由于光伏发电的出力波动性较大，随太阳辐射度变化而变化，若与负荷变化叠加在一起，	**2、无电压波动和闪变问题** 光储直柔技术配置储能进行柔性调节，不会受到光伏发电不稳带来的电压波动和闪变

	会引起更大电压波动和闪变。	问题。
	3、有谐波超标问题 传统分布式能源技术每家每户都有一个并网点，并网点多带来谐波问题严重。	**3、无谐波超标问题** 光储直柔技术是以一个台区为单位进行并网，并网点只有一个，无谐波超标问题。
	4、有三相不平衡问题 单相并网进一步加剧低压配电网三相不平衡。	**4、无三相不平衡问题** 光储直柔系统通过三相并网，无三相不平衡问题。
电网的扩容压力问题	**有电网的扩容压力问题** 面临如此海量的新能源接入，必须相应配套配电网和输电网，资金、走廊、投资经济性，都使电网面临巨大难题。	**电网的扩容压力小** 户户直流互联，光伏发电量优先就地消纳。配置一定储能进行多余发电量存储。台区通过直流互联，能量相互流动，最大化利用光伏发电，减少上网电量。光伏发电经过户户直流就地消纳、储能存储、台区互联后，实现了最大化就地消纳，减少上网电量，解决电网扩容难题。
电网调度问题	**有电网调度问题** 每个村有上百至上千户，每户都有一个并网点，不易调度。	**无电网调度问题** 将上百至上千户通过直流互联后集中到一起通过柔性双向变换器三相上网，只有一个并网点，调度非常容易。
台区重过载问题	**有台区重过载问题** 1、台区低压光伏电站发电量远超台区用户消纳能力，会造成电能大量上送，造成台区重过载。 2、光伏在接入与退出配网系统的瞬间，引发配网系统电压波动与闪变，出现输出功率的动态变化，也会造成台区电压瞬间重过载或轻载。	**无台区重过载问题** 1、本台区光伏发电用户无法消纳可通过储能存储多余部分在通过台区直流互联，输送到别的台区，减少本地台区消纳压力，避免重过载。 2、光伏发电部不稳定时，通过储能的柔性调节，避免功率动态变化，以及台区电压瞬间重过载或轻载。

线路损耗	**线路损耗大** 比如将 100kW 荷载，通过 AC380V、线径 70m² 电缆传输 0.5km,线路损耗为 17.9%。	**线路损耗小** 比如将 100kW 荷载，通过 DC750V、线径 70m² 电缆传输 0.5km，线路损耗损只有 3.74%，为交流线损的 20.9%。
供电可靠性	**可靠性低** 电网出现电压暂降或短时中断时，传统分布式光伏直接退出运行，无法保证用电可靠。	**可靠性高** 电网出现电压暂降或短时中断时，光储直柔系统形成微网系统，光伏、储能可继续为用户提供可靠稳定电源，确保供电的高可靠性。

4.1.2 经济效益

本示范工程年发电量 240 万 kWh，产生电量 8%就地消纳，92%余电上网。本项目的实施为村民带来的直接经济收益，包括节约电费约 4.25 万元/年以及屋顶租金 10 万元/年；投资商的经济收益包括余电上网收益 73.3056 万元/年、碳交易收益 11.9640 万元/年以及直接向居民售电 4.806 万元/年，年固定支出则包括保险、运行维护费和屋顶租金，合计 21.4 万元/年，因此本示范工程年固定利润为 68.6756 万元，还包括向村集体/政府一次性支出 15 万元。根据附件光储直柔造价表，庄上村光储直柔总建设投资 899.485 万元，一次性向村集体/政府支出 15 万元，经计算农村光储直柔系统年投资回报率 7.63%，投资回报年限 13.32 年，具体计算过程见 4.2.3。另外，农村光储直柔系统的实施还减少了农村电网升级改造投资以及“煤改电”、“煤改气”等取暖工程的投资。

4.2 庄上村光储直柔系统商业模式

4.2.1 基本原则

企业直接投资、村民不出资、不贷款、不占用村民征信额度。

4.2.2 合作模式

本示范工程采用投资商发供一体模式，即光伏所发电量优先供庄上村居民使用，多余电量由电网全额收购，不足电量由电网企业提供。如图 4-1 所示，ΣW4=发电总量计算投资方的收益，W2 收益算给投资方。FCS 资产无偿移交

给电网公司管理，电网公司根据 W1 向投资方结算电费，所产生的线损由电网承担。

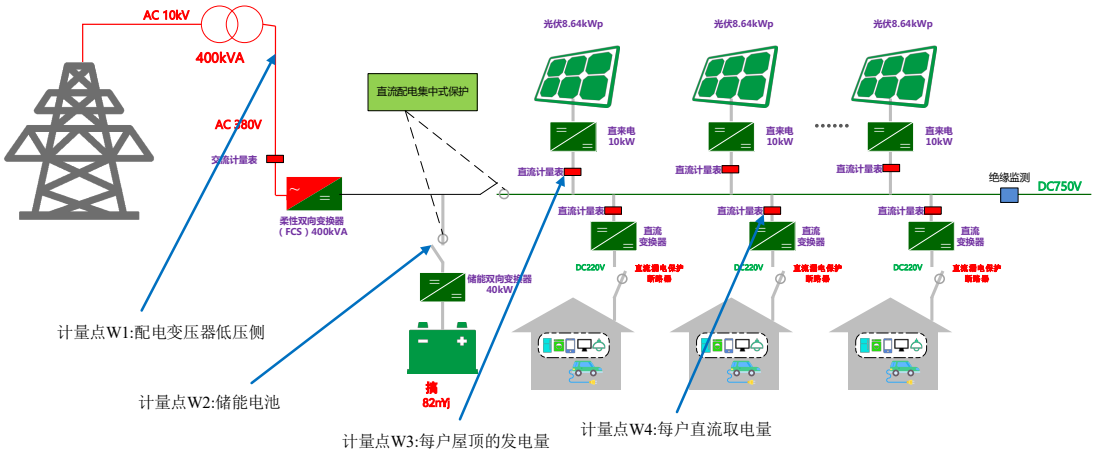


图 4-1 庄上村光储直柔合作模式示意图

项目参与单位包括牵头方芮城县人民政府、投资方中电国际、设计方国核电规划设计研究院、建设运营方南京国臣直流配电科技有限公司、合作方芮城县供电公司以及屋顶持有方庄上村村民。各参与方按合同/投资协议约定进行利益分配：

（1）芮城县人民政府与中电国际签署《战略框架协议》，将庄上村的户用和工商业资源打包进行投资；

（2）中电国际和国核电力规划设计研究院、南京国臣直流科技有限公司分别签署《工程设计合同》、《工程承包合同》；

（3）庄上村村民与中电国际签署《屋顶租赁合同》；

（4）芮城县供电公司与中电投签署《售电合同》。

4.2.3 盈利模式

庄上村总共 71 户居民铺设光伏，所选光伏组件每块 400W，共有 5000 块，总装机 2MW。年发电 1200 小时，年发电量 240 万 kWh，所发电量约 8%就地消纳，92%余电上网。就地消纳电量中，8.52 万 kWh 向当地用户免费赠送（1200kWh/户），剩余 10.68 万 kWh 向当地用户出售，出售价格为 0.45 元/度（比正常用电便宜 0.027 元/度）。

（1） 村民收益

对于村民而言，该示范项目零投资、零风险，经济收益包括全年累计节约的电费支出 8.52*0.477（正常用电 0.477 元/度）+10.68*0.027=4.25 万元，以及

10 万元屋顶租金（20 元/块，根据地域不同情况调整），连续 25 年不变（项目寿命周期），平均收益 1200 元/户/年以上。

（2）村集体/政府收益

由政府牵头，村集体配合，负责以下工作：1、跑户、收集资料：身份证户口本复印件即可、房产证（没有房产证需要村过镇政府出具房产证明）、和村民签署合同；2、办理农户开通二级银行卡，主卡用于百姓回收屋顶租金，二级卡由“合作方”持有，用于回收发电收益（电费）；3、组织人员测量房屋尺寸、出具简单排布图（可手绘）、拍摄屋面照片（4 张以上）；4、手续办理：县级发改委备案和县级电网审批。

由此所产生的收益如下表所示，收益来源为投资方配套出资。

表 4-2 政府/村集体总收益

序号	收益主体	工作内容	单价（元/块）	总收益（万元）	备注
1	村集体	跑户、收集资料等	10	5	一次性
2	村集体	手续相关（发改和电网）	10	5	一次性
3	政府	综合服务费	10	5	一次性

（3） 投资方收益

如表 4-3，该示范工程全年固定收入包括电费收入 10.68*0.45+240*0.92*0.332=78.1116 万元和碳交易收入 240*0.997*10*50=11.9640 万元（0.997kg/度，50 元/吨），累计年收入约 90 万元（净收入需考虑具体的运维、保险成本等，此部分数据根据项目所在地具体情况的不同存在差异，表 4-3 给出了庄上村项目的情况）。项目建设总投资 899.485 万元，寿命周期 25 年。

表 4-3 庄上村光储直柔示范工程的收入与支出

单位：万元

序号	具体项目	金额	备注
1.建设总投资	建设总投资（万元）	899.850	
2.一次性支出	政府、村集体	15	

2.年固定支出	保险（万元/年）	1.4	
	运行维护费（万元/年）	10 （预）	
	屋顶租金（万元）	10（预）	
3.年固定收入	居民售电收入（万元/年）	4.806	民用 0.45 元/度（比正常用电便宜 0.027 元/度）
	余电上网收入（万元/年）	73.3056	上网 0.332 元/度
	碳交易收入（万元/年）	11.9640	0.997kg/度，50 元/吨

4.3 农村光储直柔系统的宣传与推广

4.3.1 宣传活动

为了更好的推广庄上村光储直柔模式，有必要采取一定的宣传措施，让更多人了解到什么是“光储直柔”、为什么要建设“光储直柔”系统、农村地区建设“光储直柔”系统的可行性和必要性。通过宣传和科知识科普，让光储直柔的概念深入人心，为光储直柔的推广奠定广阔的群众基础。当前已开展了如下宣传活动：

1）在庄上村，利用宣传栏、橱窗和标语等进行宣传，印刷简洁易懂的宣传册分发给乡镇村民，在党群活动中心设置图书角增加“碳中和”、“直流用电”相关科普读物，定期举办专家讲座和读书分享会等；

2）邀请江亿院士、农业部、能源基金会、国内各大高校代表等各路专家参观庄上村光储直柔示范工程，打开庄上村光储直柔项目在行业内的知名度，提高了光储直柔系统的认可度；

3）以报刊杂志、网络电台、互联网为传播媒介，对庄上村光储直柔示范项目进行宣传。截止目前，庄上村光储直柔模式已经陆续在光明日报、山西日报、人民网、运城晚报、山西卫视、运城电视台、芮城融媒等媒体平台，直流建筑联盟、能源发展与政策、南京国臣、清华大学建筑节能中心等公众号平台，通过动画、视频、长图等多种形式开展宣传；

4）成立了直流建筑联盟、中国建筑节能协会光储直柔专业委员会、直流配用电技术联盟、IEEE PES 直流配电网技术分委会等光储直柔相关的专项委员会，通过开展学术交流和研发竞赛、推动上下游产业链配套合作、提供科技咨询和培训服务、普及科学技术知识、制定行业标准等方式，汇集社会各方力量，搭

建“产、学、研、用”一体化平台，吸引各类市场主体共同参与光储直柔这一新兴产业发展，构建以新能源为主体的新型电力系统。

下一步宣传计划，着重打开光储直柔在群众中的知名度：

1）针对重点科普单位，如中小学，通过组织低碳创意竞赛、“直流用电”科学小发明等活动，让青少年发挥创造力，积极参与到低碳实践中；

2）邀请知名专家（研究学者、能源企业和科技企业的负责人、环保公益组织等社会各界热心低碳的人士）进一步宣讲“碳中和”相关内容，可采用“大讲师进课堂”的形式在线上线下同时开展；

3）在全县各级党群活动中心等适合进行集中宣传教育的场所，开展集中宣传、互动活动等宣传活动；

4）在室外人流较大的公共区域，通过商圈的广播大屏幕、社区街道和乡村宣传栏和横幅标语等渠道进行更广泛的宣传。

4.3.2 商业推广

依据庄上村模式，在其他地区陆续开展光储直柔示范工程建设，典型项目包括宁波北仑台区柔直互联、保定市徐水区德山二街村光储直柔和无锡锡东新城谈村社区光储直柔，项目概况如下所示：

（1）项目名称：宁波北仑台区柔直互联

投运时间：2021 年 4 月 29 日

项目概况：宁波北仑双狮村台区互联工程是泛梅山多元融合高弹性电网综合示范区建设的一项重要内容。通过低压柔直系统将双狮村 1#、2#、5#台区的互联，实现了台区间的负载均衡、削峰填谷、故障转供、容灾备份，提升了区域电网的整体承载力和安全性，进一步提高了供电可靠性。

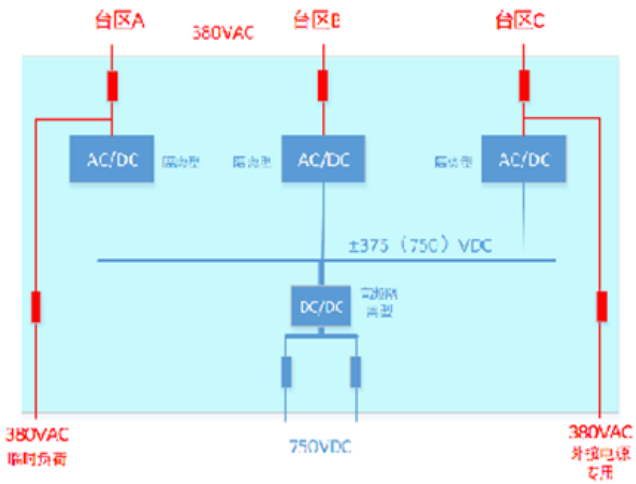


图 4-2 宁波北仑台区柔直互联

（2）项目名称：保定市徐水区德山二街村光储直柔

预投时间：2022 年 02 月 25 日

项目概况：3 个台区保留原低压交流网，满足用户正常用电。在现有台区分别新增一路 DC750V（±375V）直流配电网，台区内光伏、储能、充电桩、大负荷、直流电机、家用直流电器等直接并入直流网，台区间通过 DC750V 线路实现互联，直流低压网通过柔性双向变换器在变台处接入低压交流网，实现与原有配电网连接。可有效解决功率反向过载、电压越限、谐波、三相不平衡等问题，同时可降低线路损耗。

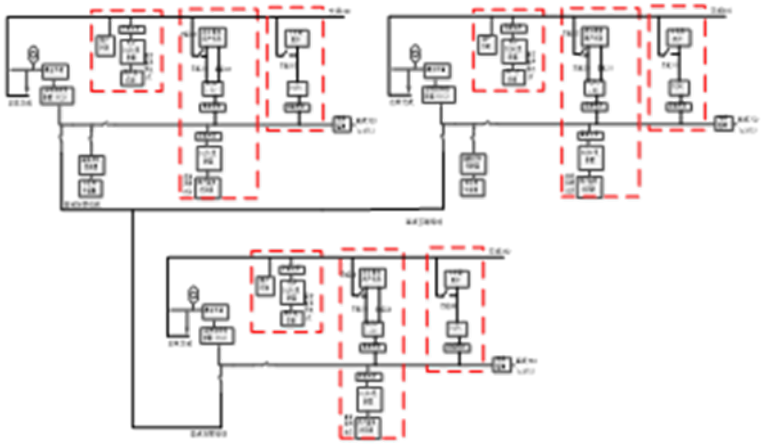


图 4-3 保定市徐水区德山二街村光储直柔

（2）项目名称：无锡锡东新城谈村社区光储直柔

预投时间：2022 年 03 月 20 日

项目概况：以 35 户居民为单位，和一个台区配电组成一个光伏发电系统，连成一个小规模的光储直柔直流配电网，每户通过直来电（直来电）进行光伏

发电，户与户之间、台区之间通过低压直流配电网互联，每个台区通过 1 个集中并网点与交流网交互实现系统的。每户配置光伏 7.4kW,35 户建设成一套系统，接入 250kW 光伏并网柜。210 户分为 6 个系统，对应 6 个台区进行和电网进行互动。

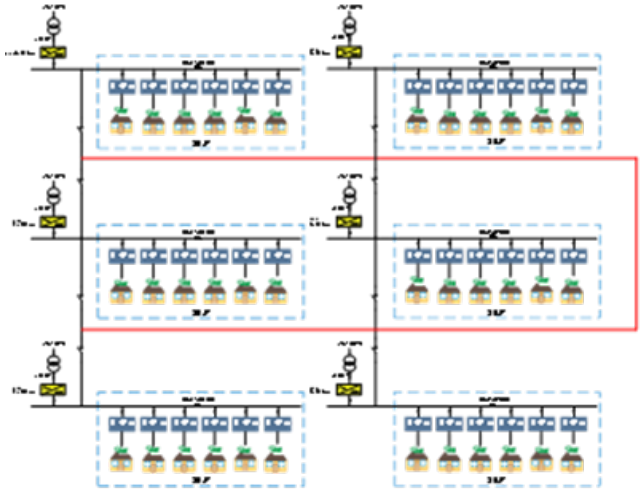


图 4-4 无锡锡东新城谈村社区光储直柔

同时，以庄上村为起点，继续探索整县域光储直柔新模式。测算在芮城县可利用的屋顶（政府机关、企事业单位、学校、民房、大鹏、畜舍等）、荒坡等资源，安装分布式光伏，通过光储直柔技术实现大规模光伏资源的高效消纳，助力芮城县在全国范围内率先实现“碳达峰、碳中和”。

4.4 本章小结

本章主要从农村光储直柔的经济性研究角度对系统的经济效益、商业模式以及推广宣传活动进行了整体概述。

5 总结与展望

本报告主要针对农村应用场景下的光储直柔进行研究，以庄上村为试点，研究了农村光储直柔系统的系统架构、控制策略、安全用电技术等关键问题，并提出了有效的解决措施。庄上村的光储直柔系统包括户级光储直柔系统和村级光储直柔系统，分别给出了具体的设计方案，并在此基础上进行了光储直柔台区互联的探讨。目前庄上村的台区互联试点已经开始，各台区系统已经开始并网发电并通过了功能测试，台区之间通过台区互联装置实现互联，互联系统运行策略通过验证。庄上村投建的“户-村”光储直柔示范项目具备明显的经济效益和社会效益，其商业模式可在全国各村推广，进而形成“乡镇-县-地市-省”推广模式，打造农村供给城镇的能源生产消费新模式。

但是在庄上村光储直柔示范工程的实施过程中，我们也遇到了以下问题：

1）标准制订

在直流配电领域，标准的缺乏是目前不得不面临的局面。这也是新生事物诞生后的常见状态。交流系统可以大量等同采用和参考 IEC 等国际标准相比，直流配电的标准研究在全世界范围都处于起步阶段。因此，制订大量原创性的直流配电相关标准是一项艰巨的系统工程。同制订独立的某个标准相比，标准体系的规划和建设，更为迫切。

目前关于电压等级的国家标准已经出台，虽然仍存在争议，但给直流配电的产业发展起了很好的示范作用。随着示范工程的不断开展，相应的团体标准和某些特殊场景（或行业）的标准也已陆续出台或正制订中。在直流配电的标准制订中，不仅需要相关方的广泛参与，也要突破交流的传统思维。

2）系统的性价比

在当前的示范项目中，经济性一直是被人们追问的问题。作为一个起步伊始、产业规模极其有限的产业，由于大量的研发投入无法在有限的市场中得以摊销，价格没有足够优势是正常现象。直流配电的经济性应首先放在能源变革的大环境下考虑，以整个社会效益来评价。光伏产业在当初起步的时候，其性价比一度受到广泛的质疑。通过国家产业政策的阶段性鼓励，以及产业的不断聚集、技术和产品的不断迭代，目前的光伏产业已经越过了盈亏平衡点，被广泛接受。直流配电的发展过程恐怕也需经过这么一个过程，但也许这个过程要更短。

当然在比较性价比的维度上，必须走出将老人机和智能机简单相比的误区，不能将其直接与常规的无法交互、低可靠、低电能质量的交流配电系统相比。在传统交流配电系统上改造成互动良好、供电高可靠、电能质量优秀的系统，其投入不比建设一个直流配电系统低。而直流固有的安全性，是交流无法用经济投入来解决的。

3）直流负荷

寻找直流负荷恐怕是目前消费者使用中最困惑的大问题。目前交流电的使用历史超过一百年，市场上的负荷（即使本质上使用的是直流电）普遍是基于交流供电设计的。然而由于计算机技术和电力电子技术的发展，开关电源几乎已成为负荷的标配部件。这为负荷的直流化供电提供了非常有利的基础。基于开关电源的大量负荷都可以直接用直流供电；有部分电器因其特殊的电路原理或电弧开断能力不够，可通过适当的改造达到直流供电的目的。对于交流电机类负载，大多已经实现了变频化，可以当作直流负载看待。因此，负荷的直流化不是一个解决不了的技术问题，而是一个需要产业推动聚集的商业问题。随着直流配电的广泛应用，大量的直流负荷（和交直流通用负荷）将不断面世，满足直流供电的接入需求。

因此，我们下一步应通过产业实践和运行数据积累，持续推动相关标准制订和产业进步、进一步探索整个村级系统商业和运营模式的创新，鼓励各方的投资积极性，同时进一步挖掘可以快速推广的农村负荷直流化应用场景 。

参考文献

[1]. 清华大学建筑节能研究中心、中国电力国际发展有限公司、华能山西综合能源有限责任公司、深圳市建筑科学研究院股份有限公司、北京太和人居能源科技有限公司. 芮城县碳中和整体规划讨论稿[R]. 山西运城:清华大学建筑节能研究中心, 2021.

[2]. 国家能源局统计司. 中国能源统计年鉴 2020[M]. 1. 北京:中国统计出版社, 2021.

[3]. 运城市统计局、国家统计局运城调查队. 芮城县 2021 年国民经济和社会发展统计公报[R].山西运城市芮城县：运城市统计局，2022.

[4]. 于留辉. 建筑直流配电系统应用研究[D].郑州大学,2019.

[5]. 刘永岗,严建海,韩肖清,王金浩,杨光辉,张保,李惠斌,陈文波.低压直流配电系统在农村地区的应用研究[J].供用电,2021,38(01):17-24.

[6]. 秦文军,陈文波,房建军,李忠,严建海.低压直流配电在建筑中的应用研究[J].建筑节能,2020,48(07):108-112.

[7]. 李雨桐,郝斌,赵宇明,童亦斌,陈文波,冯威.低压直流配用电技术在净零能耗建筑中的应用探索[J].广东电力,2020,33(12):49-55.

[8]. 马慧卓,于士京,严建海,李忠,刘向东.低压直流系统户用能量路由装置研究[J].内蒙古电力技术,2020,38(05):30-33.

[9]. 李忠,严建海,王福林,李雨桐,李秋实,汤向华,袁晓冬,陈文波.楼宇低压直流配电系统示范应用[J].供用电,2018,35(06):33-40.

[10]. 汤向华,李秋实,侯丽钢,严建海,李忠,陈文波.楼宇交直流混合配电系统及其运行管理[J].电子设计工程,2020,28(13):184-188+193.

[11]. 李雨桐,郝斌,童亦斌,陈文波,赵宇明,赵志刚,王福林,李忠.民用建筑低压直流配用电系统关键技术认识与思考[J].建设科技,2020(12):32-36+43.

[12]. 张保,邹学毅,严建海,武远征.柔性直流双向变换器及其控制策略研究[J].电工电气,2020(08):12-16+36.

[13]. 陈文波,郝斌.碳中和背景下农村光储直柔系统建设分析——以山西省芮城县东夭村为例[J].建设科技,2021(07):86-89.

[14]. 刘向东,王强,王菲菲,严建海.一种光储一体化交直流混合配电系统[J].电工技术,2021(18):151-152.

[15]. 南京国臣直流配电科技有限公司. 可切换接地方式的直流系统:CN202020712282.9[P]. 2020-11-17.

[16]. 苏州新丰综合能源服务有限公司. 一种直来电:CN201822061163.7[P]. 2019-08-06.

[17]. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司,南京国臣直流配电科技有限公司. 一种户用多级能源管理装置:CN202020617948.2[P]. 2020-10-13.

[18]. 国网江苏电力设计咨询有限公司,国网江苏省电力有限公司经济技术研究院,南京国臣直流配电科技有限公司. 一种交直流混合供电系统:CN201922056455.6[P]. 2020-07-31.

[19]. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司,南京国臣直流配电科技有限公司,国家电网有限公司. 一种户用直流供电系统:CN202022359565.2[P]. 2021-12-31.

[20]. 南京国臣直流配电科技有限公司. 一种直流系统柔性安全供电方法:CN202010830010.3[P]. 2020-11-17.

[21]. 南京国臣直流配电科技有限公司. 一种灵活接地方法及实施该方法的直流系统:CN202010369790.6[P]. 2020-07-31.

[22]. 南京国臣直流配电科技有限公司. 一种直流漏电保护方法:CN202010359967.4[P]. 2020-08-04.

[23]. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司,平高集团有限公司河北雄安综合能源科技分公司,南京国臣直流配电科技有限公司,等. 一种直流接地系统的故障监测保护装置及保护方法:CN202210223464.3[P]. 2022-05-06.

[24]. 国能四川能源有限公司江油发电厂,南京国臣直流配电科技有限公司. 直流系统的保护装置、方法及直流系统:CN202111538429.2[P]. 2022-03-22.

[25]. GB/T35727-2017,《中低压直流配电电压导则》[s]

[26]. IEC 60364-1，LOW-VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS - PART 1: FUNDAMENTAL PRINCIPLES, ASSESSMENT OF GENERAL CHARACTERISTICS, DEFINITIONS[s]