



农村“光储直柔”新型电力系统技术导则

Guidelines for Rural PEDF Power Systems

清华大学

中建科技集团有限公司

2024.3.29

关于作者

杨旭东，清华大学建筑学院副院长、教授 xyang@tsinghua.edu.cn

职 远，清华大学博士研究生 zhiy21@mails.tsinghua.edu.cn

郭梓涛，中建科技集团有限公司工程师 1424849007@qq.com

ABOUT THE AUTHORS

Xudong Yang, Professor, Tsinghua University, xyang@tsinghua.edu.cn

Yuan Zhi, PhD student, Tsinghua University, zhiy21@mails.tsinghua.edu.cn

Zitao Guo, Engineer, China Construction Technology Group Limited, 1424849007@qq.com

致谢

本研究由清华大学统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Tsinghua University 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.

目录

1. 引言	1
2. 拓扑类型选择	1
3. 设计容量	3
4. 控制方法及运行模拟	5
5. 案例介绍	8
5.1 数据收集	8
5.2 设计流程	11
6. 总结	14
附录	15

1. 引言

目前，我国大多数农村的用能方式是直接燃烧化石能源，而且农村是我国散煤使用率最高的地区，因此农村地区的用能是我国二氧化碳排放的重要来源之一。同时，农村拥有广阔的屋顶面积，根据卫星影像识别的结果，我国农村屋顶可安装光伏 20 亿 kW，光伏发电潜力是未来农村全面电气化后用电量的 3-4 倍。因此，在农村发展光伏能源来代替化石能源是实现农村“碳中和”的有效路径之一。然而，光伏发电具有很强的波动性和不稳定性，而且供电特征与农村的用电特征存在严重的不匹配性，这也是限制光伏系统在农村广泛应用的重要原因。而“光储直柔”技术是解决光伏系统供需不匹配的有效方法。“光储直柔”的定义是：1，“光”：是指光伏等可再生能源，是系统的发电来源；2，“储”：是指储能技术，包括储电、储热、蓄冷等；“直”：是指系统采用直流电力；“柔”：是系统的最终目标，即柔性负荷，使得负荷侧与发电侧实现良好的匹配。

在农村发展“光储直柔”系统有两大优势：1，广阔的农村屋顶面积带来的巨大的光伏潜力；2，农村在未来全面电气化后将拥有巨大的储能资源，如：农机具、三轮车、小汽车等。但是，农村本身的用电量相比起城市要低很多，无法消纳自身屋顶光伏电力，大量的光伏电力需要送入电网满足周边负荷需求。这就使得未来农村将会从“电力的消费者”转为“电力的产消者”，农村电力系统将承担虚拟电厂的职责。传统的农村电力设计方法单纯从电力消费侧的角度进行系统设计，无法满足未来的变化需求。因此需要新的农村电力系统的设计方法来指导农村“光储直柔”系统的建设，系统的最终目标是：优先自发自用，余电有序上网。本导则的目的是为农村“光储直柔”电力系统的设计规划提供参考依据。

2. 拓扑类型选择

确定系统拓扑结构是“光储直柔”电力系统设计的第一步，也是整个方案设计的基础。目前农村“光储直柔”电力系统的拓扑结构大致分为以下三种（只针

对框架结构的不同进行划分，细节上的差别如电压等级、储电位置等就不再专门进行分类)，如图 1 所示。

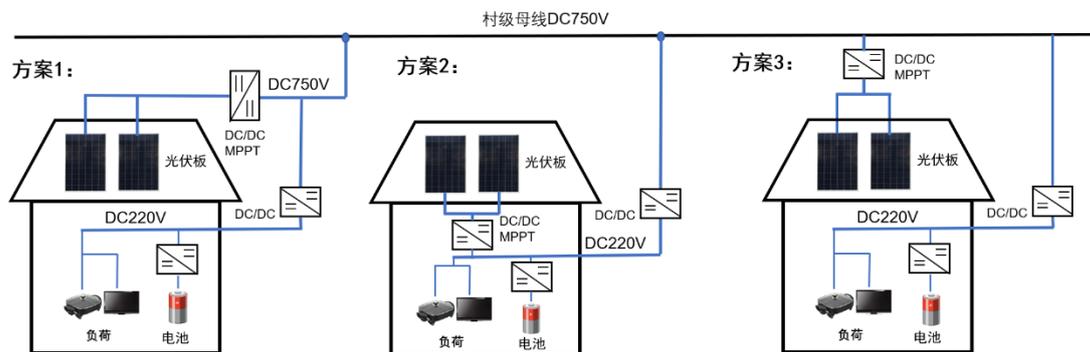


图 1 三种不同的电力系统拓扑结构

不同的拓扑结构会导致不同的发电效率、传输损失、设备容量、控制方法以及投资费用。首先，不同的方案导致变换器的位置和连接的功率不同，就会造成设备容量选型不同，从而导致不同的价格。例如：方案 2 的母线变流器与光伏相连，则变流器的容量要考虑光伏的装机容量，但是方案 1 和方案 3 的母线变流器只与负载相连，变流器的选择只需要考虑农户的负载即可。其次，不同方案的发电收益以及转化传输损失是不同的。例如：方案 1 和方案 3 的光伏电力只需要经过一个变流器，但是方案二的光伏电力经过两个变流器的转换，相对来说，方案 2 的发电量会损失一部分；而且，方案 2 的光伏电力的接入电压更低，因此线路的电流会更大，导致线路损失更大。最后，不同的方案要选择不同的控制方法。对于直流系统来说，一个很大的优势就是可以采用去中心化的母线电压下垂控制的方法来保证系统的运行（具体原理见本册的第四部分），这样也节省了控制器的投资和维护成本。但是，方案 1 的变流器没有与母线直接相连，无法迅速感应电压信号的变化，无法采用电压下垂控制，需要配备控制器，造成了额外的花销。以 10kW 的光伏装机容量为例对三种方案进行对比如表 1 所示。

表 1 拓扑方案对比

对比项目	方案 1	方案 2	方案 3
发电效率	95%	95%×95%	95%
传输损失	低	高	低
光伏变流器容量	10kW	10kW	10kW
母线变流器容量	3kW	10kW	3kW
储电变流器容量		相同	
控制方法	MPC 控制	母线电压下垂控制	

缺点	控制器的投资和维 护需要额外的成本	转换器成本和损失相 对较高	不满足“优先自发自 用”的原则
----	----------------------	------------------	--------------------

三种方案各有利弊，因此在实际项目中需要因地制宜，考虑当地的电价、设备价格、上网政策、柔性目的等进行经济性对比，从而选择性价比最高的方案。但是，对于常规的“优先自发自用，余电有序上网”的电力系统，更推荐方案 2。尽管方案 2 的发电量较低，损失较高，同时设备容量和造价相对较高。但是，方案 2 的控制方式简单，成本低。而且随着未来电子电力设备的发展，变流器的成本会越来越低，容量差异带来的价格差别会越来越少。由于未来农宅户内储电设备增多，通过母线变流器的功率会降低，进一步降低设备容量。农村的居民用电价格低，因此，系统的转化和输电损失造成的经济性损失也是有限的。但是，如果是超低负荷的农户（如独居老人），由于用电量极低而且未来不存在提高生活品质需求的用电潜力，则选择方案 3 的经济性更好。

3. 设计容量

选定电力系统设计方案的拓扑结构后，需要确定系统的设备容量，主要是：光伏装机容量、储电容量以及各种变流器的容量。由于光伏发电能力与天气状况有密切的联系，因此进行“光储直柔”系统的设计需要对当地的气象数据进行调研。同时，当地农户的用电特征也是确定系统计算容量的重要参考。光伏功率和农户负荷在不同的季节也有较大的不同，因此需要获得不同季节的逐时发电功率和农户用电功率。这些数值可以通过建模、实测以及调研的方法获得。

理论上讲，光伏容量越大，发电收益越大；储电容量越大，系统的调控能力越强，柔性潜力也越大。因此，设备容量似乎应该是“多多益善”的，但是在实际工程中，受到成本的限制，系统的设备选择应该是一个优化问题，兼顾系统运行可靠性以及经济性。系统设计容量需要满足两个约束条件：

(1) 除阴天外的最不利天气一天内的光伏发电量不小于农户的用电量。相比起晴天，多云天气的发电量更低，如果保证多云天气下的日发电量高于农户用

电量，则晴天工况也一定可以达到相同的目标，同时大大提高一年内光伏供电的保证率。同时，光伏的选择也要保证节点功率的平衡，约束条件的表达式为：

$$\sum_{i=1}^{24} p_{PV_i} - \sum_{i=1}^{24} p_{L_i} - \frac{E_B}{\eta_c} \geq 0 \quad (1)$$

$$p_{b_i} - p_{L_i} \geq 0, \tau \in (19,24) \cup (1,7) \quad (2)$$

$$p_{PV_i} - p_{L_i} - p_{b_i} \geq 0 \quad \tau \in (8,18) \quad (3)$$

其中， p_{PV_i} 是光伏发电功率，kW； p_{L_i} 是农户负载功率，kW； p_{b_i} 是电池充放电功率，kW，正为放电，负为充电； E_B 是电池的容量，kW·h； η_c 是电池充电效率；公式(1)是指多云天气下光伏发电量大于农户用电量以及电池充电需求；公式(2)是指夜间电池放电功率可以满足农户夜间的负荷；公式(3)是指白天任何时刻光伏发电功率大于农户用电功率和电池充电功率。

(2) 户内电池满足农户夜间以及阴雨天的用电需求。为了满足最不利的场景，即连续阴雨天的负荷，需要调研当地不同季节的连续阴雨天数量以及频率。从而确定电池需要满足最多的连续阴雨天的基础用电量。同时，节点的功率平衡也是需要考虑的，约束条件的表达式是：

$$\frac{E_B}{\eta_d} - \sum_{i=1}^8 p_{L_i} - \sum_{i=18}^{24} p_{L_i} \geq 0 \quad (4)$$

$$\frac{E_B}{\eta_d} - \sum p_{L_i} \geq 0 \quad (5)$$

$$p_{B_i} - p_{L_i} \geq 0 \quad (6)$$

其中， η_d 是电池的放电效率；公式(4)是指农户电池的夜间放电量满足农户夜间用电需求；公式(5)是指农户电池可以满足农宅连续阴雨天的用电需求，至于连续的阴雨天数需要根据当地历史气象数据判断；公式(6)表示电池放电功率大于农户用电功率。



图 2 电动拖拉机实物图

随着农业生产设备电气化进程的不断推进，“光储直柔”系统与电动农业机械的协同将极大地提升农业生产效率和可再生能源利用率。农村微电网不仅供应居

民日常用电和农业生产所需的能源，还与各种电动农业机械电池进行智能电力交互，这一策略的核心在于电动农业机械的电池组不仅作为其动力源，同时也扮演着微电网中动态储能单元的角色，即：农村屋顶光伏电力用于满足农机电池充电的需求，同时农机电池也为微电网提供储能的服务。这样，电动农机成为村级微电网的蓄电池，村级微电网成为电动农机的充电桩。模式需要基于高度自动化的换电柜系统，允许快速、高效的电池组更换，极大提高农业作业效率，并优化微电网的能源分配。基于农机标准化电池的村级储能包括以下几个部分：

1.智能控制系统：系统核心是一个先进的控制系统，负责协调电动农业机械的电池组换电、充电和电网能源管理。这个系统能够实时监测光伏发电情况、电网负荷、电池状态和农业作业需求。

2.标准化电池模块：电动农业机械使用统一标准的电池模块，这些模块设计为快速拔插式，便于在换电柜中快速更换。这种模块化设计允许电池在不同类型的农业机械和换电柜之间通用。

3.换电柜：换电柜是连接电动农业机械和微电网的物理接口，能够自动完成电池组的更换、充电和维护工作。换电柜内部配备有高效率的直流-直流(DC-DC)转换器，确保电池充电过程的高效率和安全性。

以上约束条件需要对比不同季节下的情况，取最大值。当光伏和电池容量确定后，根据计算的功率选择连接的变流器的容量。

4. 控制方法及运行模拟

在确定了系统拓扑和设备容量后，可以选择合适的控制方法模拟系统的运行状况来验证系统的可靠性。对于直流系统来说，电压是最简单也是最重要的运行参数，利用电压信号作为控制信号来改变设备的运行状况就是电压下垂控制的基本思想。具体来说，就是系统中的电力电子设备感应接触点的电压信号，根据电压的高低来改变自己的运行状态。这是一种去中心化无控制器的控制方法，设备根据所在位置的电压信号做出自适应的调节，维持系统的稳定运行。以光伏 DC 变流器为例，当所接触的电压高于设置电压时，变流器运行最大功率点追踪模式；当所接触的电压低于设置电压时，变流器运行恒压模式。同样的，电池的 DC 变

流器也是感应接触点的电压信号，从而控制电池的充放电状态和功率。整个系统的控制基准线是母线电压，为了保证系统的稳定运行，母线的电压需要维持相对的稳定（允许在可控范围内波动），当母线电压相对变高时，各个设备会改变运行状态，最终的目标是减少向母线注入的功率，尽可能消耗母线的电力；而当母线电压相对变低时，各个设备会改变运行状态，最终的目标是增加向母线注入的功率，尽可能不要消耗母线的电力。

节点电压的计算基本公式如下：

$$\Delta P = CU \frac{dU}{d\tau} \quad (7)$$

$$\Delta P = p_g - p_n - p_b - p_l \quad (8)$$

$$k = \frac{U_d - U_{min}}{I_{max}} \quad (9)$$

其中， C 是电路的电容； U 是节点的电压，V； ΔP 是节点吸收或者释放的功率，W； p_g 、 p_n 、 p_b 和 p_l 分别代表发电功率、上网功率、电池充放电功率以及农户负荷，W； k 是电力电子设备的下垂系数，是反映控制性能的一个指标； I_{max} 是指电子电力设备的最大电流，A； U_{min} 是指电子电力设备的最小电压，V； U_d 是指电子电力设备的标准电压，V；

以上公式集成在 Simulink 中进行模拟，可以获得系统的运行状况。Simulink 模型如图 2 所示，电压计算公式已经集成到 Subsystem 中，模型有 6 项输入：光伏功率、农户用电负荷、电池充放电功率、节点电压、电池 SOC 以及上网功率。模型输出有四项：电池充放电功率、节点电压、电池 SOC 以及上网功率。模拟的时间步长为 1s，每秒的输出项在上一秒的结果上进行计算。其中，光伏功率是通过建立 BOOST 升压电路模型得到的，根据光伏出口电压与设定值的差值改变电路的运行状态，当出口电压高于设定电压，利用 PID 控制调节 IGBT 的占空比实现恒压输出；当出口电压低于设定电压，利用 MPPT 算法（案例中使用电导增量法）实现最大功率点追踪输出。利用 Simulink 模拟的原因是该软件有一些电子电力设备的模块，方便使用者直接进行调用或者编译，可靠性强。

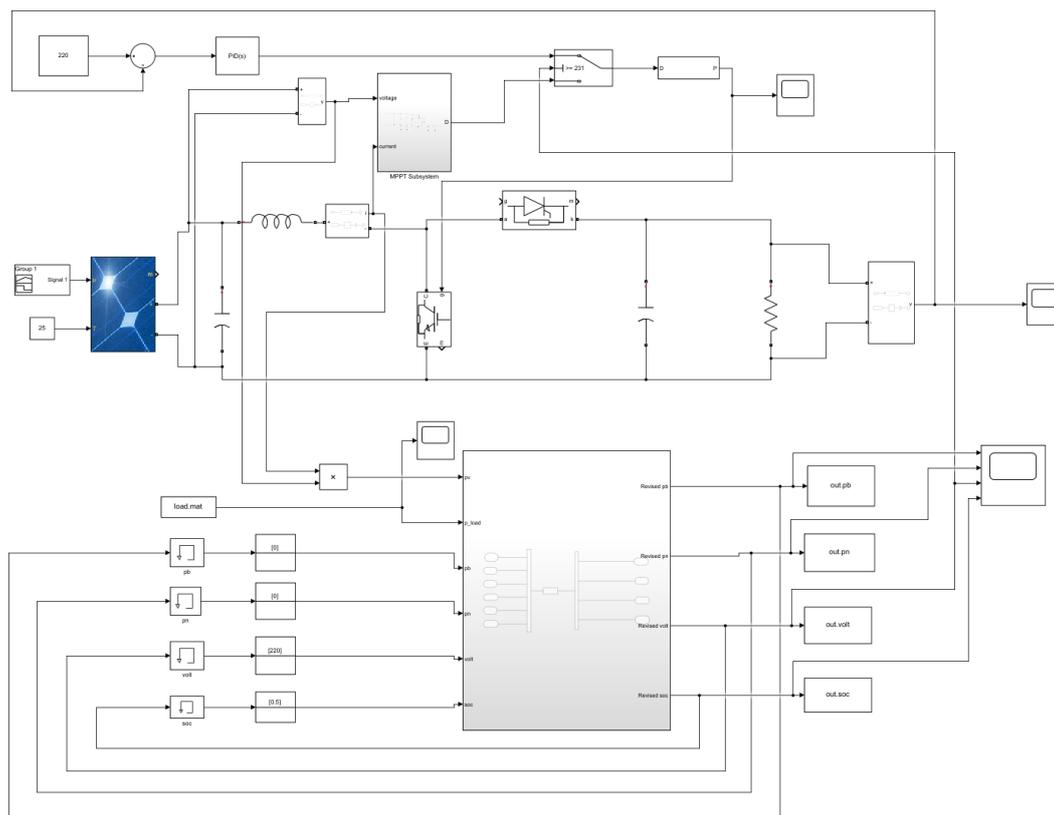


图 2 基于母线电压下垂控制的系统模型

同时，由于采用电压信号作为控制信号，电缆的压降控制就很重要。传统的电力系统设计中，电缆的选择是从能量损耗的角度去选择的，而“光储直柔”电力系统的电缆要确保不同位置的节点电压在同一个响应区间内。及电缆的压降要在电子电力设备的控制范围内。因此，Simulink 的模型要考虑压降的干扰并进行修正。根据压降的数值来重新选择电缆的尺寸。增大线径是降低电缆压降的有效方法，但是也会增大电缆的投资，为了降低电缆的花销，可以采用变线径的设计方法。即：主干线由于电流较大，需要选择较大线径的电缆来降低压降；但是在系统末端，电流较小，就可以选择较小线径的电缆降低投资费用。根据系统模拟得到的结果可以验证设计的“光储直柔”电力系统运行的稳定性以及方案的可行性。

5. 案例介绍

本导则以山西省芮城县的李湾新村的“光储直柔”电力系统的规划为例进行农村新型电力系统设计的介绍。李湾新村是 2017 年建成的整村搬迁村，建筑风格统一，位于山西省运城市芮城县西南部，距离县中心约 10 公里，卫星影像图如图 3 所示。村内有两台 10KV 的变压器，容量分别是 400KVA 和 200KVA。

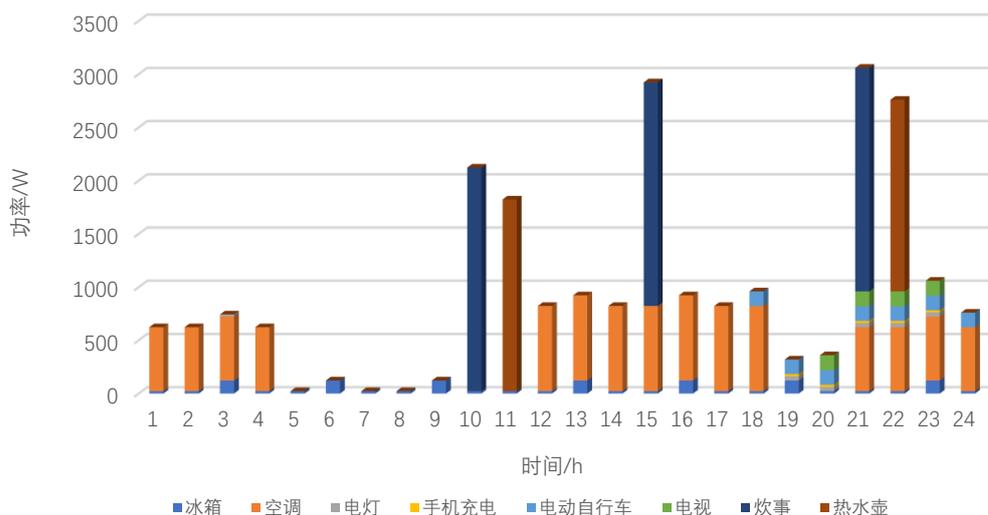


图 3 李湾新村卫星影像

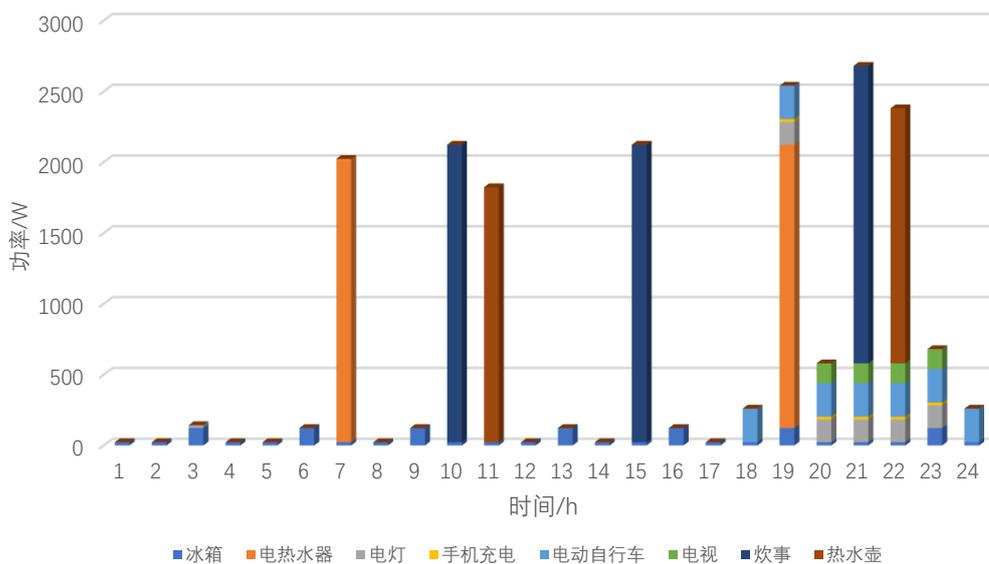
5.1 准备参考数据

规划初期需要进行调研获得一些必要的设计参数。首先是农户的用电负荷，为了便于统计，可以按照农户的用电量分为三类：1，年用电量大于 3000 千瓦时的，为高耗型农户；2，年用电量在 2000-3000 千瓦时的为普通型农户；3，年用电量小于 1000 千瓦时的为节俭型农户。在同一个村子生活的居民生活习惯和文化上差异较小，同一类型的农户用电负荷类似。农户的用电负荷调研的结果要精确到至少小时级，同时要调研不同季节的用电特征。获取方法可以分为以下几种：1，长期监测。在农户家中安装功率传感器，获得农户在不同季节下的用电特征。这种方法准确度最高，但是时间成本高，而且很难获得长期入户测试的权限；2，

入户调研法。即对农户家的电器数量、功率以及农户的使用习惯进行调研，然后结合经验公式，得到农户的用电特征数据；3，与当地国家电网公司合作，获得农户不同季节的日用电量，然后结合当地的生活习惯进行拆分，得到农户逐时用电信息。这三种方法都用在了李湾新村的设计中，三种方法的结果差别较小，都可以反映农户的用电情况，部分结果如图 4 所示。



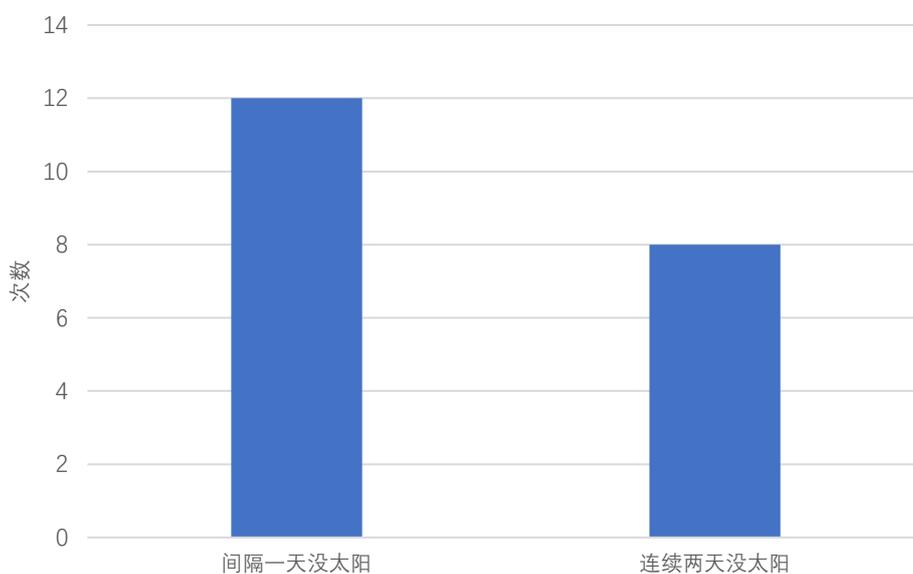
(a)



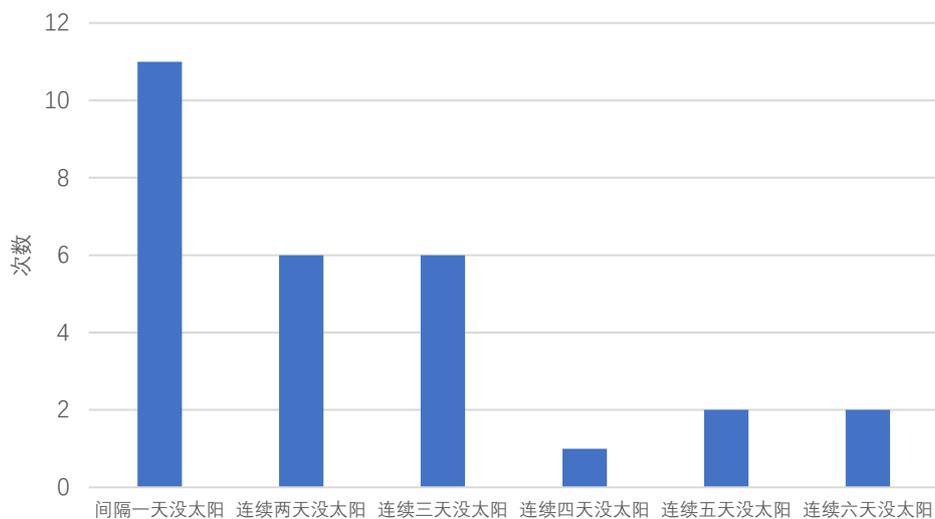
(b)

图 4 农户用电特征。(a) 高耗型农户夏季用电特征；(b) 高耗型农户冬季用电特征。

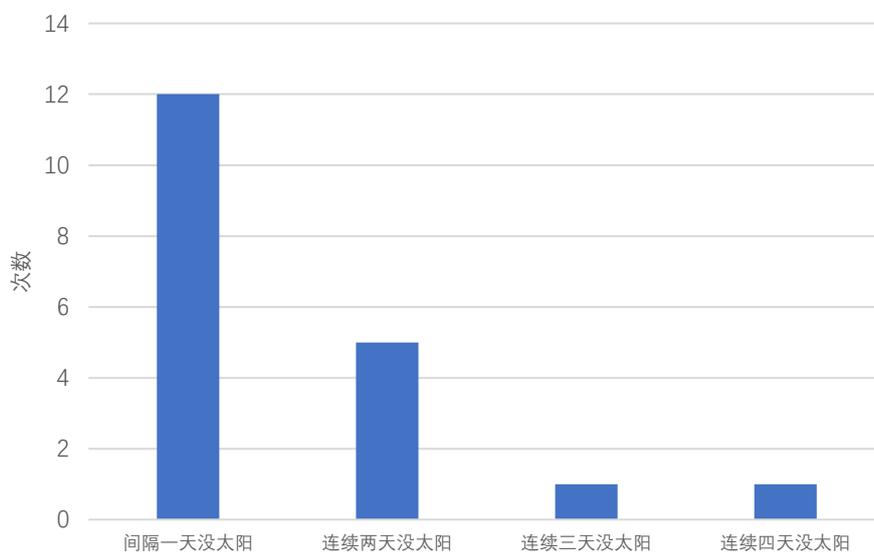
“光储直柔”系统的目标就是解决供需不匹配的问题，因此，光伏供电特征也是电力系统设计必需的参数。同样的，光伏功率至少精确到小时级。获得光伏功率有两种方法：1，实测法。在当地搭建光伏测试试验台，获得光伏全年的发电特征，该方法准确度高，但是时间成本太高；2，模型推算法。根据当地的逐时辐照度以及光伏参数以及倾角信息，建立数据驱动模型或者物理模型获得光伏在不同季节和天气状况下的功率。除了电力供需数值，相关的参数如：居民用电价格、上网电价、电力设备市场价格等参数用于对比不同拓扑方案的经济性。同时，光伏系统运行状况与天气状况息息相关，设备容量的选择也需要参考天气状况，因此，要对当地的历史气象参数进行统计。芮城县不同季节下连续阴雨天的时长和频率如图 5 所示。为了提高系统的保证率，容量配置的时候要能包含最不利的情况，即最长连续阴雨天的情景。以芮城县为例，系统设备的容量选择应该满足过渡季连续 6 天阴雨天的农户负荷以及供冷季连续 4 天阴雨天的农户负荷。由于某些长期连续阴雨天的情况出现频率很低，为了提高系统的经济性，也可以通过不考虑极端情况下的容量计算来降低系统的初投资成本。



(a)



(b)



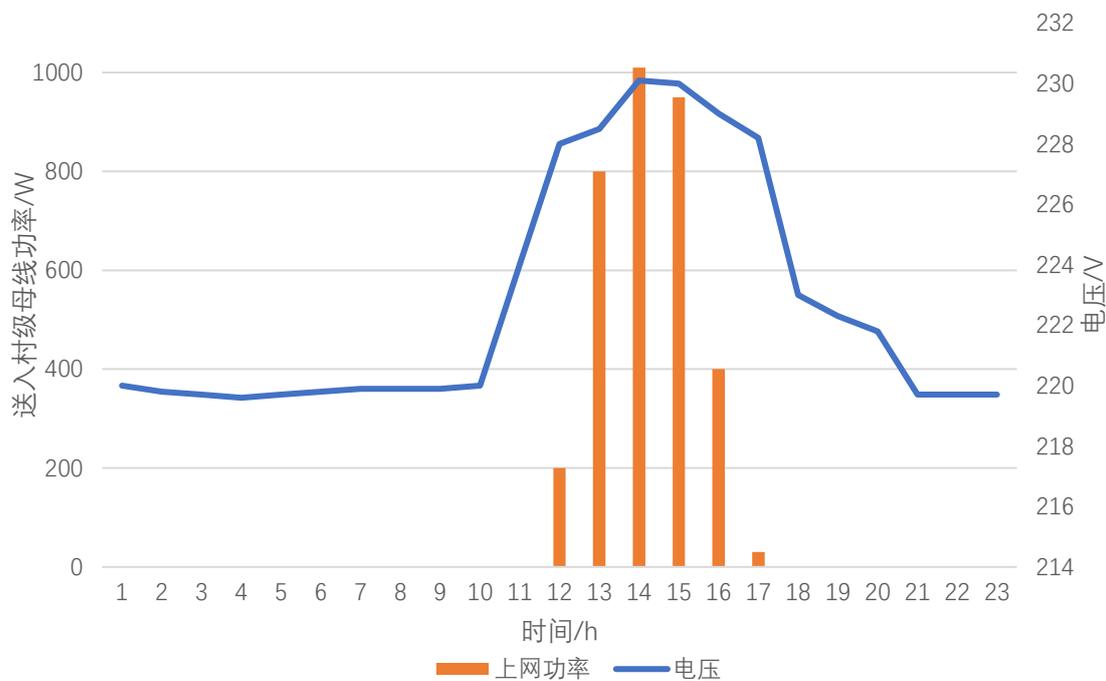
(c)

图 5 芮城历史连阴雨天情况。(a) 供暖季；(b) 过渡季；(c) 供冷季。

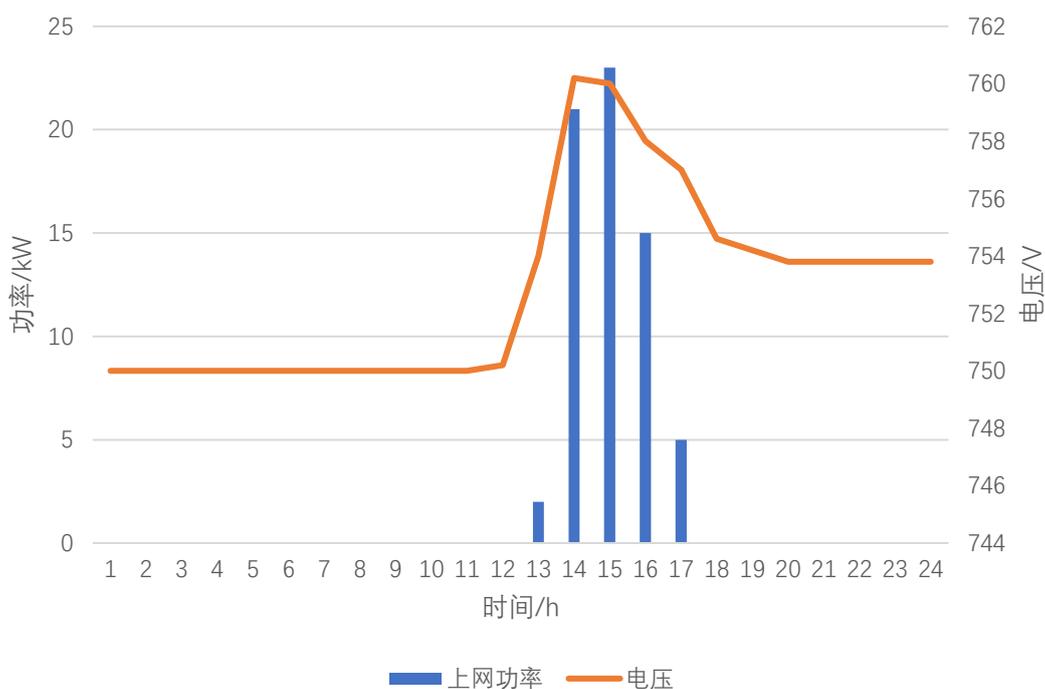
5.2 设计流程

首先要确定李湾新村的电力系统拓扑结构，当地的上网电价是 0.33 元/W，农村居民用电基础电价为 0.5 元/W。因此，尽可能消纳光伏电比上网卖电经济性更高。同时，低电价导致电力转换和运输损耗带来的经济性差异很小。不同方案的回收期对比计算，方案 2 的经济性最好。因此，本案例的拓扑方案选择方案 2。

然后，结合公式(1)–(6)以及前期的调研数据，计算光伏容量以及电池容量，结合拓扑选取变换器的容量。最后，利用 Simulink 建立的模型仿真电力系统的运行状况，进行方案的可靠性验证。以冬季的某个晴天的结果为例，农户的母线电压和送入村级母线的功率如图 6(a) 所示，台区的母线电压和送入电网的功率如图 6(b) 所示。



(a)



(b)

图 6 电力系统模拟结果。(a) 单户系统运行结果；(b) 台区运行结果。

根据模拟的结果，可以得到农户以及台区的一天内的运行状况。1, $0 < t < 8:00$ ，无光伏电力，用电负荷导致户内母线电压降低，当户内母线电压低于电池放电设置电压时，户内电池放电维持电压稳定，为负荷提供电力；2, $8:00 < t < 12:00$ ，光伏发电满足负荷需求，光线较弱，户内母线电压低于光伏逆变器设置电压，光伏在 MPPT 状态下运行，若户内母线电压高于电池充电电压，户内电池充电；户内母线电压高于母线逆变器设置电压，向村级母线送电；3, $12:00 < t < 17:00$ ，光伏发电满足负荷需求，光线较强，户内母线电压高于光伏逆变器设置电压，光伏在恒压状态下运行； $13:00$ 向村级母线送电；村级母线电压高于 PCS 设置电压，台区向电网送电；4, $18:00 < t < 23:00$ ，同第一种情景。台区的电缆位置如图 7 所示，电缆选型如表 2 所示。母线的压降低于 5%，低于逆变器的控制范围。案例的工程系统图见附录。



图 7 台区电缆位置

表 2 台区电缆信息

线路	长度/m	最大电流/A	标称截面/mm ²
主路	105	400	185（双芯）
线路 1	112	110	70（F 单铜芯）
线路 2	112	216	150（F 单铜芯）
线路 3	112	74	25（F 单铜芯）

6. 总结

“光储直柔”系统是未来农村能源系统的发展方向，相比起传统的“直接逆变上网”的光伏系统，“光储直柔”系统可以实现农户优先消纳光伏电力，多余的电力有序上网，这样就减少了变压器的扩容压力，让更多的农户参与当中。农村“光储直柔”系统的设计与传统的电力系统设计方法不同，分为以下几个步骤：1，必要的参考信息调研，包括当地气象参数、光伏功率、农户用电负荷、电费信息以及电力设备价格；2，通过对比不同拓扑结构的经济性选择合理的系统拓扑方案，经济性指标包括初投资、运行费用、收益以及回收期等；3，根据约束条件计算光伏容量以及电池容量，不止是总量上满足条件，功率上也要满足；4，基于母线电压下垂控制的方法利用 Simulink 对系统进行模拟验证系统运行的可靠性。

相比起传统的农村光伏直接逆变上网的系统，“光储直柔”新型电力系统的“新”主要体现在：1，优先自发自用，余电有序上网的设计理念；2，基于母线电压下垂控制的拓扑设计；3，基于电压信号一致性的线径的电缆选择方案。

